

ХАРЬКОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

**Прогонный Алексей Николаевич**

УДК 656.212.5:625.156.8

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ-УСКОРИТЕЛЯ  
ДЛЯ ПОДГОРОЧНЫХ ПУТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ**

05.22.20. - Эксплуатация и ремонт средств транспорта

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Научный руководитель:  
Соколов Виктор Михайлович,  
кандидат технических наук, доцент

Харьков - 2000

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ	
1 Л. Анализ существующих устройств регулирования скорости отцепов на сортировочных горках	11
1.2. Тенденции развития специализированных средств регулирования скорости .....	20
1.3. Техничко-эксплуатационные требования к устройствам регулирования скорости на подгорочных путях	23
1.4. Постановка цели и задач разработки и исследования электромагнитного замедлителя-ускорителя	28
Выводы по разделу 1 .....	29
РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ-УСКОРИТЕЛЯ	
2.1. Выбор и обоснование исходных параметров математической модели замедлителя-ускорителя .....	31
2.2. Исследование динамики взаимодействия замедлителя-ускорителя с движущимся колесом .....	38
2.3. Исследование магнитной системы ЭМЗУ....	44
2.3.1. Анализ магнитной цепи тягового звена ЭМЗУ	44

2.3.2. Разработка методик расчета магнитной цепи ЭМЗУ	53
2.4. Математическая модель электромагнитного замедлителя-ускорителя	58
Выводы по разделу 2	66
<b>РАЗДЕЛ 3. СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ТЯГОВОГО ЗВЕНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ-УСКОРИТЕЛЯ</b>	
3.1. Синтез тягового звена электромагнитного замедлителя-ускорителя	68
3.1.1. Конструкционные размеры тяговых звеньев замедлителя-ускорителя	68
3.1.2. Параметры обмотки возбуждения тягового электромагнита	73
3.2. Исследование эксплуатационных характеристик замедлителя-ускорителя	79
3.2.1. Тяговая и нагрузочная характеристики ЭМЗУ	80
3.2.2. Время включения тяговых звеньев ЭМЗУ	84
3.3. Экспериментальные исследования тяговой и нагрузочной характеристик лабораторного образца замедлителя-ускорителя	89
3.4. Энергетическая эффективность тягового электромагнита замедлителя-ускорителя	91
Выводы по разделу 3	97

РАЗДЕЛ 4. СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ЗАМЕДЛИТЕЛЯ-УСКОРИТЕЛЯ И ЕГО ТЕХНИКО-  
ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

4.1. Синтез электромагнитного замедлителя-  
ускорителя на подгорочных путях сортировочных  
горок 100

4.2. Реализация скорости движения отцепов на  
подгорочных путях с помощью замедлителя-  
ускорителя 106

4.3 .Технико-экономическая эффективность  
электромагнитного замедлителя-ускорителя ..... 114

Выводы по разделу 4..... 121

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ..... 123

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.. 127

ПРИЛОЖЕНИЯ

1.Приложение А. Технико-эксплуатационные  
характеристики технических средств регулирования  
скорости ..... 140

2 .Приложение Б. Результаты экспериментальных  
исследований макета замедлителя-ускорителя ..... 145

3 .Приложение В. Показатели качества  
сортировочного процесса при различных вариантах  
технического оснащения парковых путей ..... 147

4 .Приложение Д. Акты об использовании  
результатов диссертационной работы ..... 148

5 .Приложение Е. Расчет экономической  
эффективности ЭМЗУ ..... 150

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Важным участком работы железнодорожных станций Украины является формирование составов на сортировочных горках. Для прицельного регулирования скорости отцепов при автоматизации роспуска применяются парковые тормозные позиции, оборудованные механическими балочными замедлителями. Эти устройства воздействуют на колеса вагонов за счет силы трения и не обеспечивают стабильной тормозной характеристики. В процессе работы на многодетальные балочные замедлители оказываются значительные динамические нагрузки, что приводит к нарушению регулировочных размеров и изменению их эксплуатационных показателей. Тяжелые, металлоемкие средства с пневмо-гидроприводами довольно инерционные, особенно при оттормаживании. При этом тяжело обеспечить расчетную скорость роспуска, что приводит к повреждению вагонов и грузов или требует дополнительных подтягиваний локомотивом. Некоторые недостатки существующих устройств устраняют электромагнитные замедлители, но они также имеют подвижные части, а их эффективность зависит от случайных факторов.

Опыт работы сортировочных горок, теоретические исследования показывают, что сохранность вагонного парка и грузов, заполнение подгорочных путей без «окон» обеспечивается при использовании замедлителей-ускорителей. При этом, кроме парковой позиции, такими средствами оборудуются и подгорочные пути. Предложенные ранее электромаг-

нитные замедлители-ускорители, имея ряд значительных недостатков, не могут быть реализованы.

Поэтому актуальной проблемой при внедрении систем автоматического регулирования скорости отцепов на подгорочных путях является разработка электромагнитных устройств, оказывающих замедляюще-ускоряющее действие.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Диссертационная работа является продолжением научно-исследовательской темы кафедры "Электротехника и электрические машины" Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта по заказу Лисичанского нефтеперерабатывающего завода. Усовершенствование технического оснащения железнодорожных станций - одна из задач, поставленных Комплексной программой развития железных дорог Украины.

**Цель и основные задачи работы.** Целью диссертационной работы является обеспечение высокого качества сортировочного процесса за счет усовершенствования исполнительных органов систем регулирования скорости отцепов на подгорочных путях сортировочных горок путем разработки электромагнитного замедлителя-ускорителя (ЭМЗУ).

В соответствии с поставленной целью в работе решены основные задачи:

-проведен анализ существующих средств регулирования скорости отцепов, направления развития специализированных средств для подгорочных путей и определены основные требования к их технико-эксплуатационным характеристикам;

- исследована магнитная система ЭМЗУ и предложены методики ее расчета;
- усовершенствована математическая модель замедлителя-ускорителя;
- синтезировано тяговое звено электромагнитного средства регулирования скорости;
- исследованы эксплуатационные характеристики ЭМЗУ;
- предложено техническое решение по расположению разработанного устройства на сортировочных путях и определена его технико-экономическая эффективность.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач использованы методы анализа электрических и магнитных полей. Методики расчета магнитной цепи тягового звена разработаны на основе графического метода и аналитического метода численного интегрирования.

**Научная новизна:**

- установлена зависимость электромагнитного момента, развиваемого тяговым звеном ЭМЗУ, от расположения колеса относительно полюса электромагнита;
- разработаны методики расчета магнитной системы тягового электромагнита для определения необходимой намагничивающей силы его обмотки возбуждения;
- усовершенствована математическая модель предложенного устройства, получено новое аналитическое выражение для тягового момента;
- определена энергетическая мощность замедлителя-ускорителя на основе теоремы об изменении количества движения, получено выражение для определения изменения

скорости вагона при взаимодействии с тяговым звеном ЭМЗУ;

**Достоверность** научных выводов основана на фундаментальных положениях физики, теоретической механики. Расчет основных эксплуатационных характеристик замедлителя-ускорителя по приведенным методикам подтверждается результатами исследований лабораторного образца.

**Практическая ценность.** Определены конструктивные размеры и оптимальный интервал расположения тяговых электромагнитов ЭМЗУ. Предложена схема включения обмоток возбуждения. Получены эксплуатационные характеристики. Синтезирован ЭМЗУ для подгорочных путей в выбранном варианте технического оснащения систем регулирования скорости, обеспечивающего высокое качество сортировочного процесса. Результаты исследований могут использоваться при изготовлении и эксплуатационных испытаниях замедлителя-ускорителя.

**Уровень реализации работы.** Материалы диссертации переданы в проектную организацию "Институт Харьковский Промтранспроект" для разработки технической документации. Результаты исследований и рекомендации использованы на сортировочной горке ст. Харьков-Сортировочный Южной железной дороги при изготовлении экспериментального образца электромагнитного замедлителя-ускорителя.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались на научно-технических конференциях Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта 1996-1999г.г. В полном объеме работа докладывалась на

расширенном заседании кафедры “Электротехника и электрические машины” в 1999 году.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 4 печатные работы, в том числе три статьи в научных журналах и одно авторское свидетельство на изобретение.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа изложена на 120 страницах машинописного текста и состоит из вступления, четырех разделов, выводов и приложений, иллюстрирована 37 рисунками, 2 таблицами. Список использованных литературных источников состоит из 103 наименований.

В первой главе проведен анализ технических средств регулирования скорости отцепов на сортировочных горках и их классификация. Рассмотрены особенности специализированных средств регулирования скорости для подгорочных путей и их эксплуатационные характеристики. Ряд существенных недостатков таких устройств не позволяют применять их на отечественных сортировочных горках.

Анализ путей совершенствования тормозной техники показал перспективность электромагнитного замедлителя-ускорителя. Определены основные технико-эксплуатационные требования к разрабатываемому устройству регулирования скорости отцепов на подгорочных путях сортировочных горок.

Вторая глава посвящена разработке математической модели замедлителя-ускорителя, отличительным уравнением которой является зависимость тягового момента. Специфиче-

екая конструкция ЭМЗУ потребовала принятия ряда допущений, не оказывающих существенного влияния на эффективность работы устройства, но облегчающих его анализ. В ходе исследования динамики взаимодействия тягового электромагнита (ЭМ) с движущимся колесом выяснено, что тяговый момент звена ЭМЗУ создается нормальной составляющей тяговой силы и имеет колоколообразную форму с максимумом посередине шага расположения электромагнитов.

Исследована магнитная цепь ЭМЗУ, которая представляет собой систему с распределенными параметрами. Рассмотрены методы решения дифференциального уравнения, выражающего зависимость магнитного потока в цепи тягового ЭМ. Предложены методики расчета магнитной системы: по среднему значению магнитного потока - графически, и на основе численного интегрирования - аналитически.

Получено новое выражение, определяющее зависимость тягового момента звена от расположения колеса вагона относительно полюса ЭМ и уточняющего математическую модель замедлителя-ускорителя.

В третьей главе синтезировано тяговое звено ЭМЗУ. Установлены его конструкционные параметры и интервал расположения соседних электромагнитов. Представлена методика расчета обмоток возбуждения тягового звена, позволяющая получить необходимые тяговые усилия. Исследованы основные эксплуатационные характеристики ЭМЗУ: нагрузочная, тяговая. Теоретические выводы подтверждаются результатами проведенных экспериментальных испытаний лабораторного образца.

Получены временные параметры тягового звена и представлена электрическая схема включения обмоток возбуждения ЭМ, позволяющая регулировать время включения устройства.

Определена энергетическая мощность ЭМЗУ. Основываясь на теореме об изменении количества движения, получено выражение для определения изменения скорости вагона после взаимодействия с тяговым звеном замедлителя-ускорителя.

В четвертой главе диссертационной работы рассмотрены возможности реализации ЭМЗУ на подгорочных путях, приведена структурная схема управления ЭМЗУ. Разработана электрическая схема включения тяговых электромагнитов.

Исследованы факторы, влияющие на погрешность реализации скорости. Получено выражение для оценки погрешности от динамической составляющей тяговой силы электромагнита за счет дополнительных сил трения.

Сравнительный анализ с существующими устройствами по энергетическим затратам, трудоемкости обслуживания, металлоемкости показал преимущества разработанного устройства.

## РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ  
СКОРОСТИ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ1.1. Анализ существующих устройств регулирования  
скорости отцепов на сортировочных горках

В последние десятилетия, с дальнейшим развитием микропроцессорной техники, разработаны и внедрялись системы комплексной механизации и автоматизации сортировочных горок. В нашей стране это системы АСУ РСГ и КГМ РИИЖТ, которые включают в себя ряд локальных систем автоматики [1]. Для поддержания необходимых интервалов между скатывающимися отцепами, обеспечения необходимой дальности пробега и безопасной скорости соударения с вагонами, стоящими на подгорочных путях, предназначена система автоматического регулирования скорости скатывания (АРС). На отечественных горках внедрялись системы АРС-ЦНИИ и АРС-ГТСС [2], отличающиеся определением скоростей выхода отцепов из первой и второй тормозных позиций. Они включают устройства для определения ходовых свойств отцепов (АРС-ЦНИИ), измеритель весовой категории, вычислитель расчетной и фактической скорости движения, устройства управления тормозными позициями. На автоматизированных сортировочных горках устраивается три тормозные позиции: первая и вторая на спускной части для интервального или интервально-прицельного торможения (I ТП и II ТП), третья - на подгорочных путях (III ТП) для при-

цельного торможения [1,2,3]. В качестве технических средств регулирования скорости отцепов применяются балочные замедлители весового или нажимного принципа действия [4,5,6]. Все эти механизмы в основном имеют пневматические привода. В 80-е годы разработаны и внедрены замедлители ЦНИИ-ЗВ с гидравлическим приводом [7] для парков, пневмогидравлические ВЗПГ-ВНИИЖТ [8]. Его особенностью является наличие пневмогидравлического привода, осуществляющего преобразование энергии сжатого воздуха от компрессорной станции в энергию рабочей жидкости. Эксплуатация этих устройств связана со значительными трудозатратами на обслуживание пневмо-гидропривода. Наиболее полно эксплуатационным требованиям отвечал вагонный замедлитель с пневматическим приводом типа ВЗП-ВНИИЖТ [9]. В настоящее время в России проведено усовершенствование парковых замедлителей и внедряются РНЗ-2М и ПНЗ-1 [10]. Действие клещевых балочных замедлителей основано на использовании сил трения, которые возникают при воздействии тормозных шин на колесо и зависят от ряда факторов:

- рода металла взаимодействующих поверхностей;
- состояния трущихся поверхностей и их обработки;
- величины удельного давления тормозных балок на колесо;
- скорости движения.

При этом очень тяжело добиться стабильности тормозной характеристики замедлителя.

К недостаткам балочных замедлителей относится их большая инерционность, особенно при оттормаживании, что недопустимо при автоматизации процесса роспуска [11]. Металлоемкие, многодетальные устройства постоянно подвергаются динамическим нагрузкам, что приводит к нарушению регулировочных размеров и требует тщательного технического обслуживания [12,13,14,15]. Для нажимных замедлителей должно предусматриваться несколько градаций нажатия, которые выбираются по условиям недопустимости выжимания легковесного вагона.

Большинство эксплуатируемых замедлителей устанавливаются глубоко от уровня головки рельса (УГР) и их монтаж осуществляется в специально сооружаемые котлованы. Например, при применении пневматических балочных замедлителей на механизацию тормозных позиций затрачивается 60-70 % общей суммы капитальных вложений, выделяемых на автоматизацию горок [16].

Главным недостатком механических балочных замедлителей являются их привода. Пневматические или гидравлические привода требуют сооружения и содержания компрессорной станции с сетью трубопроводов и специальных устройств [4,17]. При использовании пневматического привода возникает целый ряд недостатков:

- утечка воздуха в стыках трубопроводов и в цилиндрах;
- колебания давления в моменты расходования воздуха;
- медленная подача давления к исполнительным орга-

нам.

Гидравлические привода эффективнее пневматических, но требуют более тщательного содержания трубопроводов, особенно стыков.

Одним из основных резервов повышения эффективности торможения балочных средств регулирования скорости является увеличение подъёма тормозных шин над уровнем головки рельса (УГР), что ограничивается требованиями габарита [18]. Поэтому сила торможения не может быть увеличена конструктивными мерами выше определенного значения, в чем заключается принципиальный недостаток механических балочных замедлителей как весового, так и нажимного типа.

По принципу действия, определяемым формой тормозной характеристики, технические средства можно разделить на три группы [16].

Первая группа. Нажимные балочные замедлители (КНП-5, ВЗПГ, ВЗП, РНЗ, Е-160, Вупперталь и т.д.), у которых сила сжатия колеса изменяется ступенчато в зависимости от массы отцепа (рис.1.1, кривая 1).

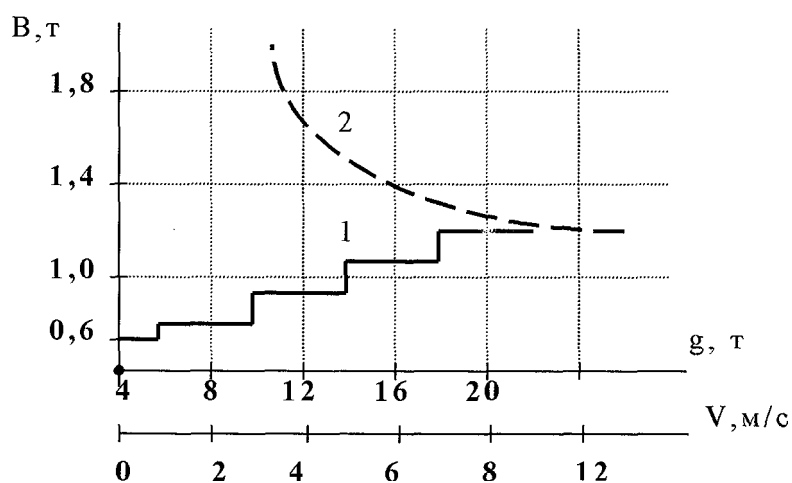


Рис. 1.1. Зависимость тормозящих усилий нажимных замедлителей

При возрастании скорости тормозящие усилия начинают снижаться (рис. 1.1, кривая 2). Для погашения избыточной кинетической энергии необходимо увеличивать строительную длину, что приводит к удорожанию устройств механизации.

Вторая группа. Весовые балочные замедлители (ЦНИИ-ЗВ, КВ, ТГ), сжимающее усилие которых устанавливается автоматически прямопропорционально массе отцепов (рис. 1.2).

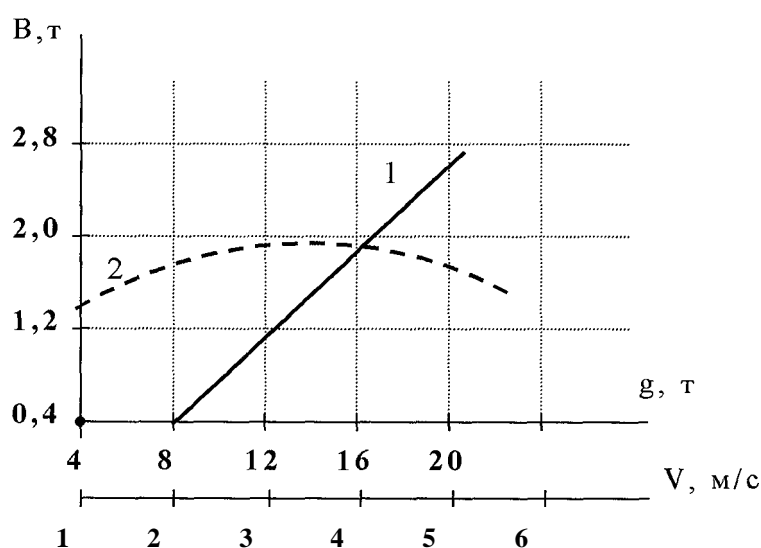


Рис.1.2. Зависимость тормозящих усилий  
весовых замедлителей

По реакции на массу весовые замедлители соответствуют оптимальному режиму, а по реакции на скорость схожи на нажимные.

Третья группа. Тормозные средства, реагирующие в основном на скорость отцепов: электродинамические (Германия), точечные DOR (Англия), винтовые ASEA (Швеция). Тормозящие усилия таких замедлителей с увеличением скорости могут возрастать, но с увеличением нагрузки на ось не

изменяются. Зависимость тормозных усилий от скорости и нагрузки на ось для электродинамического замедлителя приведена на рисунке 1.3.

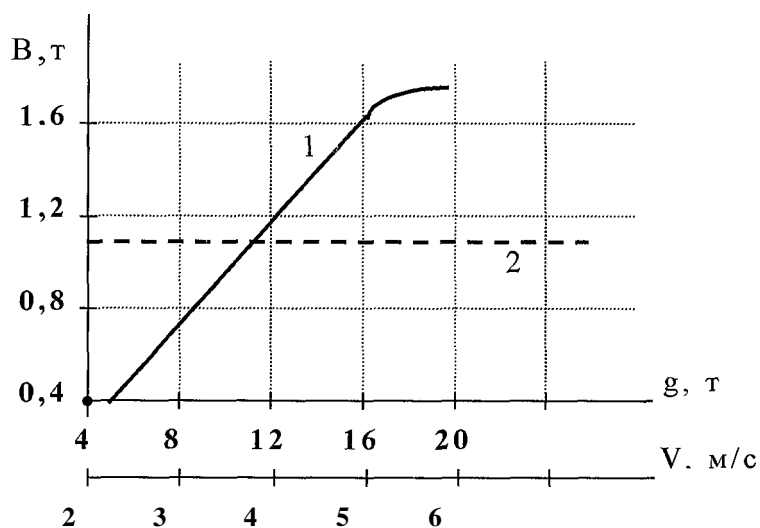


Рис.1.3. Зависимость тормозящих усилий электродинамических замедлителей

Существующие отечественные и зарубежные технические средства регулирования скорости возможно классифицировать по техническим и эксплуатационным показателям [19,20]. Среди технических характеристик выделяют качественные данные, которые дают возможность разделить устройства по назначению:

горочные (Г), используемые только на спускных позициях;

парковые (П), устанавливаемые на сортировочных путях;

унифицированные (У), применяемые на горочных и парковых позициях.

Качественные показатели позволяют также классифицировать устройства регулирования скорости по принципу действия, типу привода, форме тормозного органа, характеру и длительности воздействия.

По количественным данным, к которым относятся кинематическая схема, сложность конструкции, масса на единицу мощности, длина и глубина заложения над УГР можно судить о надёжности конструкции, затратах на изготовление, установку и обслуживание устройств. Качественные и количественные данные существующих технических средств приведены в приложении А (рис. А.1, А.2).

Определяющими в классификации устройств регулирования скорости являются эксплуатационные показатели (рис.1.4), среди которых наиболее значимые: тормозная мощность, время реакции, допустимая скорость входа на замедлители, стабильность тормозной характеристики, погрешность в реализации скорости отцепов, а также трудоёмкость обслуживания. Большие требования предъявляются к ограничению уровня шума при работе. Основные технико-эксплуатационные характеристики весовых и нажимных балочных замедлителей приведены в приложении А (табл. А.1 и А.2).

По приведенной классификации и данных таблиц можно охарактеризовать, например, замедлители РНЗ-5, широко применяемые на подгорочных путях.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ

эконом $T < 80$ чч/м	Трудоемкость обслуживания на 1 м.э.в.  ( чел. час/мес)	высокая, $>8$ м/с	Допустимая скорость входа
ср. $T - 80-100$ чч/и		средняя, 6-8 м/с	
труд. $T > 100$ чч/м		малая, $< 6$ м/с	

мощные, $>1.2$ м. э. в.	Тормозная мощность	бесшумные, $<80$ дБ	Степень воздействия на окружающую среду (ДБ)
средние, 0.8-1.2 м.э.в.		средние, 80-100дБ	
маломощн., $< 0.8$ м.э.в		шумные, $>100$ дБ	

быст. дейст. .КО.5	Время реакции при загормаживай, (в сек)	стабильные $<0.14$	Стабильность по коэффициенту вариации мощности
средние $1=0.5-0.9$		средние 0.14-0.2	
инерцион. $t>0.9$		нестабильные $>0.2$	

быст. дейст. .КО.3	Время от.  (в сек.)	точные $V < 0.3$	Реализ, скорость Для горочн. $V$ ( в м/с)
средние $1=0.3-0.7$		ср. точн. 0.3-0.4	
инерцион. $1>0.7$		низ.точн $V>0.4$	

мощные $>0.12$	Или удельная тормозная мощность ( в.м.в./ м)	точные $V<0.2$	Для парков $V$ (Хм/с)
средние 0.08-0.12		средние 0.2-0.3	
маломощн. $<0.08$		низкие $V>0.3$	

надежные  $P>0.98$  -----  
 ----- Констр.  
 ----- надежность  
 средние 0.94-0.98

ненадежные  $P<0.94$  -----

Рис. 1.4. Эксплуатационные характеристики технических средств регулирования скорости

У них значительная тормозная мощность (0,41 м.э.в.), сравнительно небольшая масса (около бт.), малая глубина заложения (0,4 м.), но инерционен при оттормаживании (0,6 с.), что увеличивает погрешность скорости выхода отцепа до 0,6 м/с.

Как показывают выполненные исследования [19], условия работы парковых тормозных позиций значительно отличаются от горочных. Так количество включений замедлителей на подгорочных путях автоматизированной горки в 20-40 раз меньше чем на спускной части, а соотношение трудозатрат на однотипные горочные и парковые замедлители отличаются примерно в 2,5 раза. Таким образом, если на первой и второй тормозных позициях установка однотипных устройств оправдана, то для третьей необходимы специальные средства, более простые в эксплуатации и обслуживании. Кроме того, к парковым устройствам предъявляются и другие требования: повышенная точность в реализации скорости выхода отцепов, небольшая глубина заложения, легкость управления.

Анализ технико-эксплуатационных характеристик весовых и нажимных балочных замедлителей показывает, что среди механических устройств отсутствует такой, который отвечал бы установленным требованиям. В связи с этим возникает необходимость в дальнейших разработках технических средств регулирования скорости для подгорочных путей.

## 1.2. Тенденции развития специализированных средств регулирования скорости (ССРС)

Наряду с эксплуатацией и усовершенствованием механических балочных замедлителей, как в нашей стране так и за рубежом, ведутся работы по созданию специализированных устройств. Разновидностью балочных замедлителей стали устройства, тормозящий эффект которых создаётся сопротивлением потока жидкости (тип TDJ-302, Китай) [21], упругостью резины (тип TG, Германия), фрикциями (тип ФЗ, СНГ) [22]. Они предназначены для парков, но широкого применения, особенно в нашей стране, эти устройства не находят из-за своих недостатков:

- низкая надёжность и сложность изготовления - для ФЗ;
- применение специального эластомера - для TG;
- большое количество для установки и трудоёмкость обслуживания - точечные TDJ.

Важным направлением совершенствования замедлителей для парковых путей выделяются разработки устройств, в основу действия которых положено использование электромагнитной энергии. Здесь просматривается два пути. Во-первых, создание электромеханических замедлителей, эффект действия которых создаётся действием вихревых токов и за счет трения колеса о тормозные шины. Было предложено немало вариантов такого типа замедлителей в разных странах:

- электродинамический типа В в Японии;
- электродинамический замедлитель в Германии [23];

-электромагнитные замедлители типа ЭМЗ [24,25,26] и ЭВЗ [27] и т.д.

На рисунке 1.5 представлены характерные конструкции электромагнитных замедлителей. Хотя все они названы по-разному, но принцип действия их сводится к следующему: во время прохождения колеса между тормозными балками или мимо разрыва магнитопровода возникает магнитное поле, приводящее в движение тормозные шины до полного их прижатия к колесу. Электромагнитные замедлители устраняют некоторые недостатки балочных механических, и в первую очередь, отпадает необходимость в неэкономичных пневмогидросетях. Электромагнитные ССРС обладают ещё рядом положительных качеств:

- удобство сопряжения с управляющими и питающими устройствами, так как являются электрическими аппаратами;
- отсутствие явления выжимания колёс вагонов;
- бесшумность в работе;
- простота технического обслуживания.

Эксплуатационные характеристики рассмотренных устройств приведены в приложении А (табл.А.3). Все специализированные замедлители эксплуатируются только на парковых позициях. Показатели быстродействия для парковых замедлителей характеризуются такими данными:

- время затормаживания от 0,1 до 0,8с., в среднем 0,45с.
- время оттормаживания от 0,1 до 0,5с., в среднем 0,3с.

По мощности они пригодны для парковых путей, где мощности несколько ниже, но выше требования по реализации скорости выхода и надёжности.

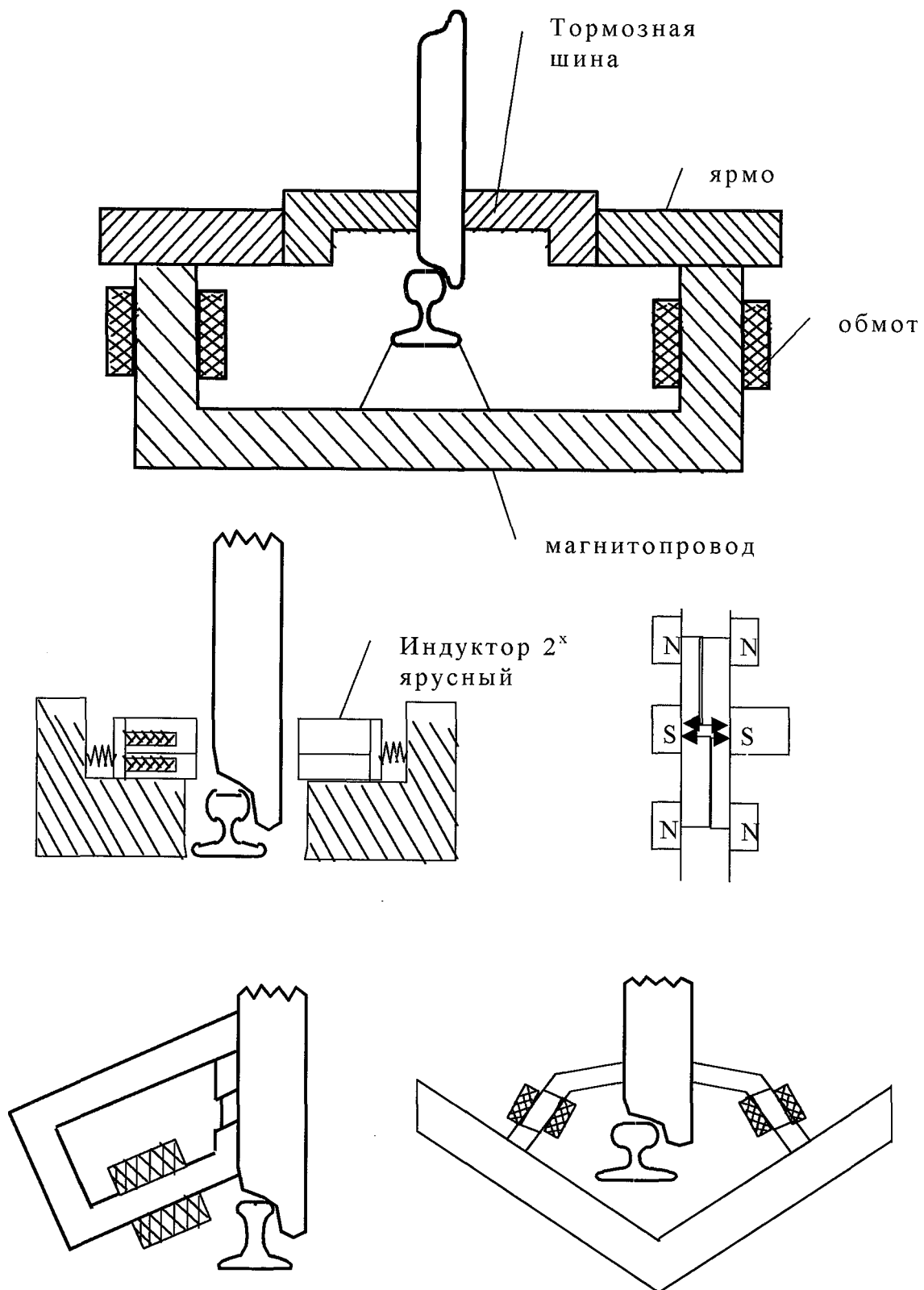


Рис. 1.5. Электромагнитные замедлители

В то же время, остаётся главным недостатком механическое взаимодействие тормозных шин и колеса, наличие подвижных частей. Поэтому ведутся разработки электромагнитных устройств, действие которых основано на использовании только сил электромагнитного поля, устраняющих существующий недостаток. Они отличаются тем, что не имеют подвижных и трущихся элементов, за счет чего можно получить стабильную и плавную тормозную характеристику. Перспективность этого пути развития средств регулирования скорости отцепов подтверждают результаты изучения патентной литературы. Разработки в этом направлении имеются в Японии [28.29], Швейцарии [30], СНГ [31]. Эти устройства, не имея подвижных частей, могут оказывать и ускоряющее действие. На рисунке 1.6 показаны электромагнитные устройства, защищенные патентами Японии. Но эти средства регулирования скорости также не лишены недостатков: пропуск большого тока через рельсы и колесную пару, громоздкость конструкции, низкий КПД. Анализ конструкций и характеристик ССРС показывает отсутствие приемлемой модели.

### 1.3. Техничко-эксплуатационные требования к устройствам регулирования скорости отцепов на подгорочных путях

Опыт работы сортировочных горок показывает, что часть скатывающихся с горки отцепов не обладает достаточной энергией, чтобы пройти требуемое расстояние в сортировочном парке [5,32].

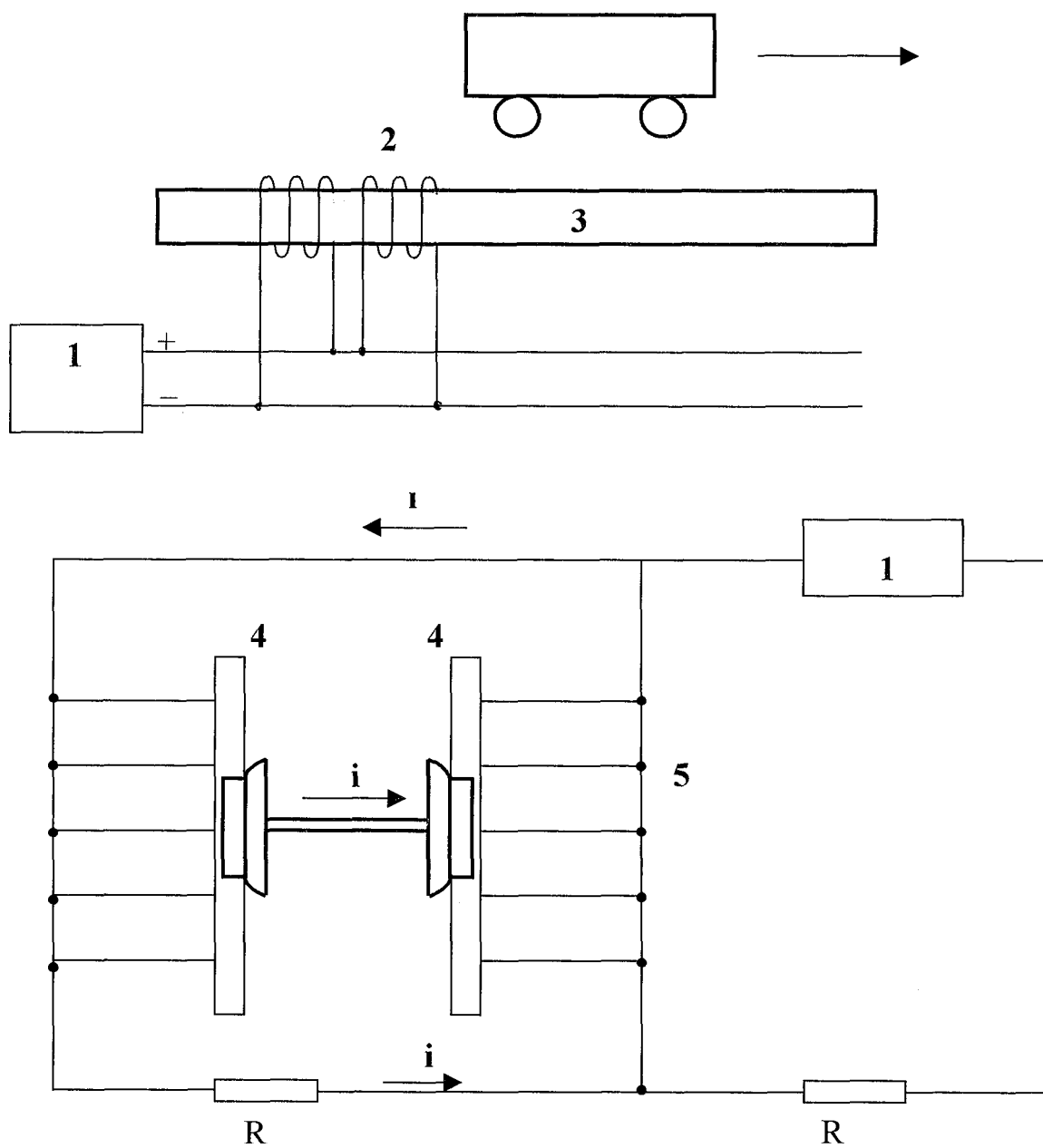


Рис. 1.6. Электромагнитные замедлители-ускорители

- 1 - источник постоянного тока;
- 2 - обмотка электромагнита;
- 3 - магнитопровод;
- 4 - рельсы;
- 5 - шины.

Экспериментальные исследования прицельного регулирования скорости отцепов [33] свидетельствуют о низком качестве этого процесса. Около 15% поступающих на сортировочные пути отцепов останавливаются с «окнами», не докатываясь до впередистоящих вагонов в среднем на 100м. Степень заполнения сортировочных путей составляет 70-80%. Для уменьшения вероятности возникновения «окон» операторы допускают завышенный уровень скоростей соударения отцепов. Для обеспечения заполнения сортировочных путей без «окон», необходимо увеличивать кинетическую или потенциальную энергию таких отцепов либо осаживать их на нужное расстояние

Повысить кинетическую энергию отцепов при входе в сортировочный парк возможно в основном двумя путями: увеличением высоты горки и ускорением отцепов ускорителями. Но повышение высоты горки имеет ряд отрицательных сторон:

1. Для заполнения путей без "окон" в зимних условиях необходимо увеличить высоту горки на 0,7м. При этом удлиняется и усложняется конструкция сортировочной горки.

2 .Потребуется увеличение мощности технических средств для торможения хороших и очень хороших бегунов.

3 .Повышение высоты горки ограничивается скоростью входа отцепа на замедлители.

Для увеличения потенциальной энергии отцепов при входе их в парк увеличивают уклон его путей, что влечет за собой установку на каждом пути цепи замедлителей. Это дополнительные эксплуатационные расходы.

В мировой практике для прицельного регулирования скорости отцепов применяются осаживатели (канатные, приводимые в действие электроприводами, и работающие по принципу линейного асинхронного двигателя) [34]. Сложность конструкции применяемых осаживателей не позволяет внедрять их на наших горках.

Более целесообразно для повышения скорости отцепов использование ускорителя, т.к. при одинаковых условиях для доведения всех вагонов до конца подгорочного парка путем ускорения плохих бегунов требуется меньше энергии, чем путем торможения хороших бегунов [5,35].

Распространенной конструкцией ускорителей является винтовая [35,36]. Ускоритель содержит винтовой барабан со спиральным ребром, образующим неполный виток, контактирующий боковой поверхностью с ребордой колеса вагона при его проходе. Винтовой барабан соединен с электродвигателем. Ускоритель в рабочем положении обеспечивает ускорение вагонов, движущихся со скоростью менее 5км/ч, и свободный пропуск при скорости 5км/ч. В систему управления привода ускорителя вагонов входят датчики включения и отключения. Даже краткое описание конструкции показывает ее сложность, что затрудняет их внедрение. Кроме того, использование только ускорителей на сортировочных путях не приносит должного эффекта.

Проведенные учёными ХарГАЖТ аналитические расчеты и выводы по результатам исследований процесса заполнения путей сортировочного парка, приводят к заключению, что качественный процесс заполнения сортировочных путей мо-

гут обеспечить замедлители-ускорители при квазинепрерывном воздействии на вагон [37]. В результате имитационного моделирования движения отцепов были получены зависимости, из которых видны основные требования к конструкции, установке и эксплуатационным характеристикам замедлителя-ускорителя:

1) Возможность установки как на парковой тормозной позиции (прицельное регулирование), так и на сортировочных путях (квазинепрерывное воздействие), без дополнительных переоборудований, в кривых участках, на типовые рельсы, с принятой шириной колеи, на глубину менее 0,6м.

2) Устройство должно иметь электрический привод, что облегчает его управление и сопряжение с микропроцессорными устройствами.

3) Не должен иметь подвижных частей, а трущиеся поверхности сведены к минимуму.

4) Замедлитель-ускоритель должен соответствовать эксплуатационным показателям:

- тормозная мощность тягового звена не ниже ОДм.э.в.;
- время реакции при включении не более 0,3с.;
- погрешность реализации скорости не более 0,2м/с.;
- допустимая скорость входа 5м/с.

5) Допускать устройство рельсовых цепей.

6) Отвечать критериям энергоёмкости, металлоёмкости и трудоёмкости обслуживания.

Известные на сегодняшний день замедлители-ускорители не в полной мере удовлетворяют предъявляемым требованиям.

#### 1.4 Постановка цели и задач разработки и исследования электромагнитного замедлителя-ускорителя

Проведенный выше анализ свидетельствует, что разработку конструкции ЭМЗУ целесообразно осуществлять с учетом:

- возможности разнонаправленного воздействия на вагон, обеспечивающего необходимое качество сортировочного процесса;

- упрощения управления и сопряжения с микропроцессорными устройствами, позволяющими использовать их в качестве исполнительного органа автоматической системы регулирования скорости;

- использования традиционных источников питания с известными устройствами преобразования;

- простоты конструкции, установки и технического обслуживания, повышающими надёжность эксплуатации;

- уменьшения металлоемкости и трудозатрат на содержание.

Целью диссертационной работы является обеспечение высокого качества сортировочного процесса за счет усовершенствования исполнительных органов систем регулирования скорости отцепов на подгорочных путях сортировочных горок путем разработки электромагнитного замедлителя-ускорителя.

В соответствии с поставленной целью подлежат решению следующие задачи:

- обоснование исходных параметров для математического анализа ЭМЗУ;
- исследование магнитной системы тягового звена электромагнитного устройства;
- разработка методик расчета магнитной цепи тягового электромагнита;
- усовершенствование математической модели разрабатываемого устройства;
- синтез тягового звена ЭМЗУ, электрической схемы включения обмоток возбуждения;
- установление и исследование основных эксплуатационных характеристик замедлителя - ускорителя;
- анализ факторов, влияющих на погрешность реализации скорости;
- адаптация ЭМЗУ в выбранной схеме технического оснащения подгорочных путей и технико-экономическая оценка разрабатываемого устройства.

### Выводы по разделу 1

1. Анализ технических средств регулирования скорости отцепов на сортировочных горках показал, что основными исполнительными устройствами являются механические, балочные замедлители, которые имеют ряд существенных недостатков. Установлено, что для подгорочных путей сортировочных горок целесообразно применение специализированных устройств.

2. Особенности конструкций существующих и разрабатываемых устройств регулирования скорости можно оценивать по количественным и качественным показателям, имеющим три градации. Определяющими в классификации технических средств регулирования скорости являются эксплуатационные характеристики. Рассмотрение технико-эксплуатационных данных весовых и нажимных балочных замедлителей показало неполное их соответствие ЭТТ.

3 .Анализ конструкций специализированных устройств, их технико-эксплуатационных характеристик показал, что перспективным направлением развития средств регулирования скорости отцепов на подгорочных путях является разработка электромагнитных устройств. Известные специализированные устройства - это в основном замедлители, действие которых основано на использовании сил электромагнитного поля и сил трения.

4 .Установлено, что качество сортировочного процесса повышается при применении на подгорочных путях устройств, оказывающих на вагон как замедляющее так и ускоряющее действие. Определены основные эксплуатационные требования, которым должен соответствовать замедлитель-ускоритель:

- тормозная мощность тягового звена не ниже  $0,3 \text{ МВт}$ ;
- время реакции при включении не более  $0,3 \text{ с}$ ;
- погрешность реализации скорости не более  $0,2 \text{ м/с}$ ;
- допустимая скорость входа  $5 \text{ м/с}$ .

## РАЗДЕЛ 2

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ- УСКОРИТЕЛЯ

#### 2.1. Выбор и обоснование исходных параметров математической модели замедлителя-ускорителя

При разработке и исследовании электромагнитных устройств регулирования скорости наибольший интерес представляет определение величины и законов изменения электродинамической составляющей тяговой силы, так как её увеличение повышает стабильность тормозной характеристики. Теоретические исследования известных электромагнитных устройств основаны на том, что, если выделить в движущемся колесе вагона элементарный проводник длиной  $dx$  и сечением  $dy-dz$ , то электродвижущая сила, возникающая в проводнике, будет равна [38,39]:

$$\mathcal{E}_I = -B \cdot V \cdot dx \quad (2.1)$$

где  $B$  - индукция магнитного поля;

$V$  - скорость движения проводника.

Сопротивление такого элементарного проводника:

$$R = \rho \frac{dx}{dy \cdot dz}, \quad (2.2)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление проводника.

Вихревой ток определяется из (2.1) и (2.2):

$$(2.3)$$

Взаимодействуя с постоянным магнитным полем, вихревой ток вызывает силу, которая, согласно закону Ленца, противодействует движению. Для элементарного проводника сила определяется из уравнения:

$$F^* = -\frac{B^2 V}{\rho} dx dy dz \quad (2.4)$$

Результирующая формула для определения силы, отражающая математическую модель устройства:

$$\frac{2B^2 V z_i}{\rho R} \frac{r-R+h_1}{R-h_1} \sqrt{(3R-r+h_1)^2} \cdot dr \quad (2.5)$$

Аналитические расчеты [38] показали, что электродинамическая составляющая колеблется в пределах 20-30%, а экспериментальные данные показали 45%. Кроме того, рассматриваемое устройство работает только на торможение и имеет подвижные части. Теоретические исследования были также проведены для электромагнитного замедлителя-ускорителя соленоидного типа, роль ферромагнитного сер-

дечника в котором выполняет вагон [40,41]- Было получено выражение для определения силы взаимодействия вагона с магнитным полем соленоида:

$$F(g) = iNBia^2 \int_{-i}^i \frac{1}{T(x)} H(x, d) dx, \quad (2.6)$$

где  $i$  - ток через обмотку соленоида;

$N$  - удельные витки катушки соленоида;

$B_i$  - магнитная индукция в стержне при его насыщении;

$a$  - полудлина вагона;

$T(x)$  - функция распределения магнитного потока через поверхность стержня;

$H(x, ^\wedge)$  - напряжённость магнитного поля по оси соленоида;

$x$ , - текущие координаты.

По опытным данным такой замедлитель-ускоритель, содержащий  $10^6$  ампер-витков, развивал силу  $F_{ср}=3 \cdot 10^4$ Н для платформы весом 23т, что соответствует погашаемой энергетической высоте 1,8 м.э.в. Но основной проблемой является техническая реализация такого устройства.

Разрабатываемый электромагнитный замедлитель-ускоритель, защищённый авторским свидетельством [42], представляет ряд тяговых электромагнитов, расположенных между рельсами аналогично шпале, состоящих из V-образных сердечников и катушек возбуждения. Торцевые поверхности

магнитопроводов, закрепленные в контррельсах защёлками, параллельны боковой плоскости колеса и подняты на уровень обода. Тяговый электромагнит и движущаяся над ним колёсная пара представляют собой электромагнитный механизм сложной конфигурации, поэтому для упрощения математического анализа устройства необходимо принять некоторые допущения:

1) При движении колёсной пары вдоль полюсов тяговых электромагнитов имеет место перекося вследствие динамических взаимодействий колеса с контррельсом или с тяговым ЭМ (рис.2.1).

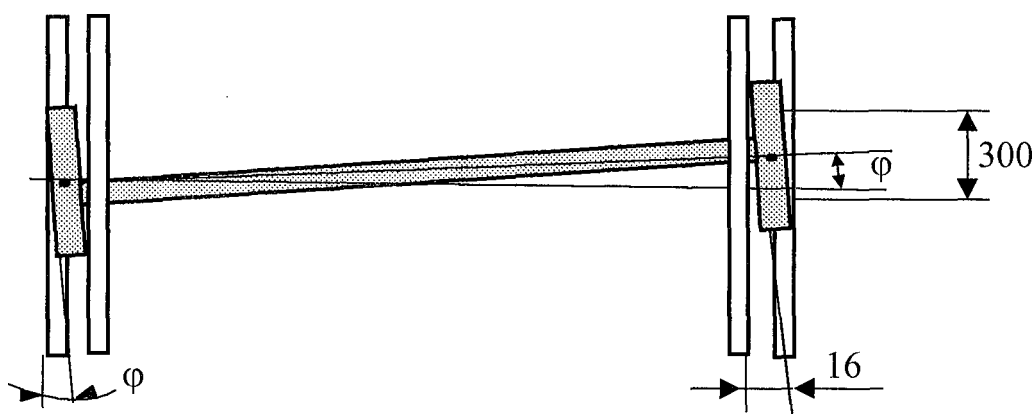


Рис.2.1. Определение перекося колесной пары

Длина участка соприкосновения обода колеса и контррельса составляет около 300мм в зависимости от радиуса колеса, а максимальный воздушный зазор - 16мм при минимальной толщине обода колеса. Угол перекося  $\phi$ ,

им можно пренебречь и воздушный зазор в этой плоскости считать параллельным (рис.2.2).

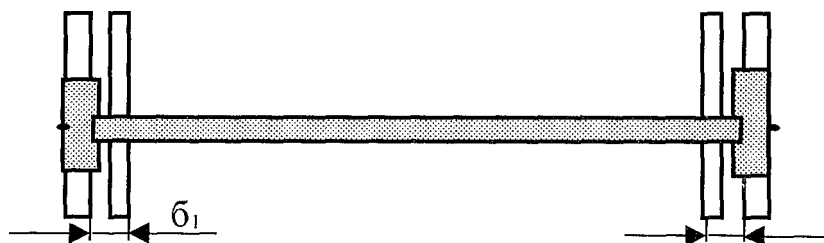


Рис.2.2. Переход к параллельному воздушному зазору

2) По условиям габарита приближения строений угол изгиба магнитопровода около  $140^\circ$  (рис.2.3).

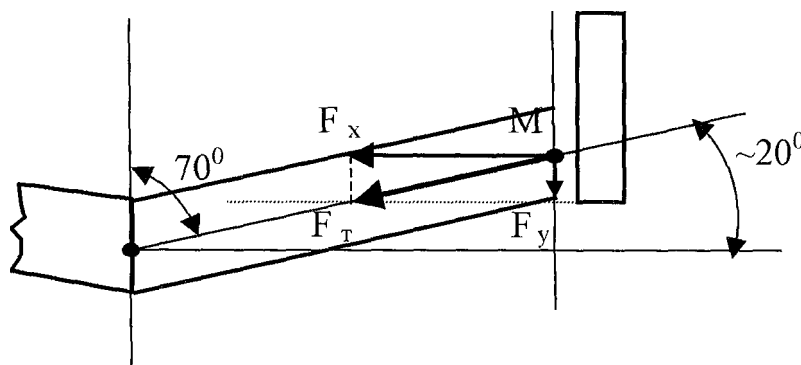


Рис.2.3. Разложение тяговой силы на составляющие

Магнитный поток  $\Phi$  создаёт тяговую силу  $F_T$ , направленную к колесу под углом  $70^\circ$ . Интерес представляет проекция этой силы на ось  $x$ , определяемая как  $F_x = F_T \cdot \cos 20^\circ$ . Так как  $\cos 20^\circ$  близок к единице, то можно считать воздушный зазор плоскопараллельным.

3) Рассматривая взаимное расположение колеса и полюса электромагнита сбоку (рис.2.4) при заданных их размерах, можно видеть, что длина дуги по окружности катания колеса  $2.71 \text{ ос}$

$AB' = \frac{2.71 \cdot R_{ос}}{360^\circ} \gg 0.01745 R_{ос}$  составит 207мм. Длина полюса задана

200 мм и с погрешностью 3% можем считать  $AB = A'B'$ . Толщина колеса в шесть раз меньше толщины обода, поэтому представим всю массу колеса эквивалентным прямоугольником  $AKNB$  с толщиной, равной высоте полюса ЭМ.

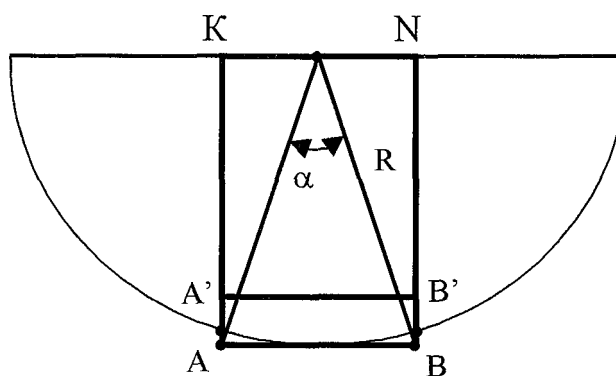


Рис.2.4. Определение эквивалентного сечения колеса

4) Площадь сечения колёсной пары с диаметром оси в среднем 160мм составляет примерно  $201 \text{ см}^2$ , тогда как площадь сечения полюса равна  $200 \text{ см}^2$ . Поэтому ось заменим прямоугольным сечением 100x200мм.

5) Колесо на оси и бандаж насажены по технологии плотно, поэтому воздушными зазорами в этих местах можно пренебречь.

6) Обмотка располагается в двух катушках почти по всей длине сердечника, поэтому принимаем её равномерно распределённой.

7) С учётом пунктов I4-6 тяговый электромагнит с расположенной над ним колёсной парой, представим эквивалентной схемой (рис.2.5), где все элементы имеют одинаковое сечение и имеется два рабочих воздушных зазора  $\delta_1$  и  $\delta_2$ .

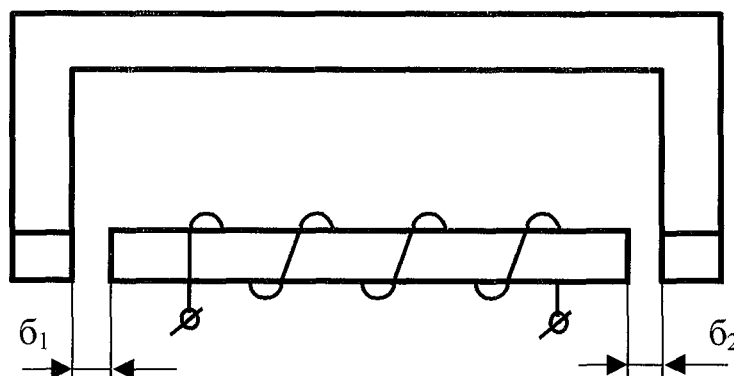


Рис.2.5. Эквивалентная магнитная система  
тягового звена

8) Силу магнитного притяжения примем сосредоточенной в центре магнитных масс  $M$  полюса, т.е. точке пересечения его диагоналей.

Сердечник ЭМ выполнен из того же материала что и колёсная пара [43]. Железнодорожные колёса изготавливаются из мартеновской стали I или II, а осевые заготовки из стали Ос.В. Они имеют одинаковые магнитные характеристики. Обычно расчёту электромагнитных устройств предшествует выяснение сил или моментов, которые должен преодолевать электромагнит в течение времени срабатывания [44,45]. С этой целью проанализируем воздействие ЭМ на колёсную пару.

## 2.2. Исследование динамики взаимодействия

### замедлителя-ускорителя С движущимся колесом

Так как тяговый электромагнит ЭМЗУ одинаково влияет на оба колеса колёсной пары, ограничимся рассмотрением сил и моментов относительно одного из них. Определим момент, действующий на колесо, движущееся по уклону с углом  $\beta$  (рис.2.6).

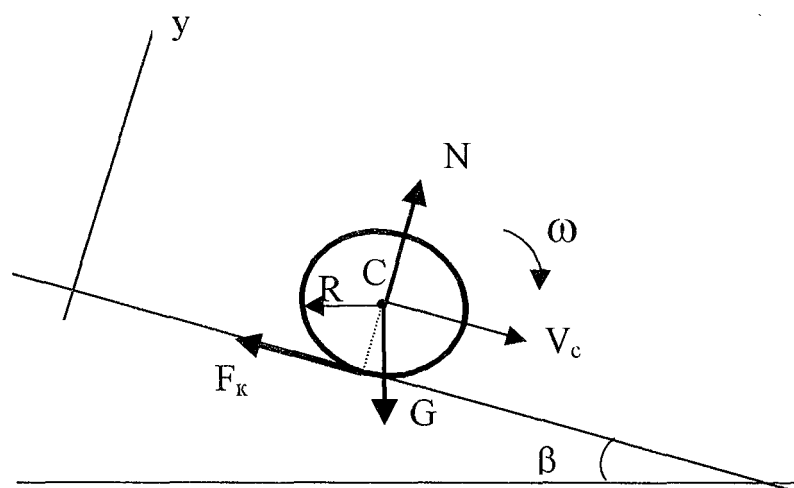


Рис.2.6. Распределение сил, действующих на колесо при движении по горке

На колесо действуют: сила тяжести  $G$ , реакции плоскости  $N$ , сила трения качения  $F_k$ . При этом известны вес колеса  $G$  и его радиус  $R$ . Колесо осуществляет плоское движение, которое можно описать системой дифференциальных уравнений [46]:

$$\begin{aligned}
 M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} &= E X - X^E \\
 M \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} &= \text{f} Y_c = Y_c^E, \\
 \blacksquare \frac{d^2 c p}{dt^2} &= M^{\wedge} = M^E
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

где  $M$  - масса колеса ( $M = G/g'$ );

$G$ -вес колеса, принимаемый как вес вагона разложенный на количество колёс;

$g' \sim$  ускорение с учётом инерции вращающихся частей;

$X^E$  и  $Y^E$  - проекции главного вектора внешних сил, приложенных к телу, на оси  $x$  и  $y$ ;

$-d^2 c p / dt^2$  - момент инерции вращающихся частей;

$M/$  - проекция главного вектора моментов сил.

Интерес представляет последнее выражение системы (2.7). По рисунку 2.6 оно имеет вид:

$$\frac{J \cdot d(P)}{dt^2} = F_R = M \tag{2.8}$$

Инерционный момент колеса является противодействующим тяговому звену. Он пропорционален радиусу колеса  $R$ , который не меняется во время движения, и силе  $F_K$ , которая, согласно [47] равна:

$$F_K = |G \cdot \sin \rho. \tag{2.9}$$

Выражения (2.8) и (2.9) показывают, что вращательный момент  $M_c$  не зависит от местоположения колеса на горке, остаётся постоянным в течение времени движения.

Для выяснения вращательного момента  $M_0$ , развиваемого тяговым электромагнитом (рис.2.9), проанализируем динамику его взаимодействия с колесом [48,49].

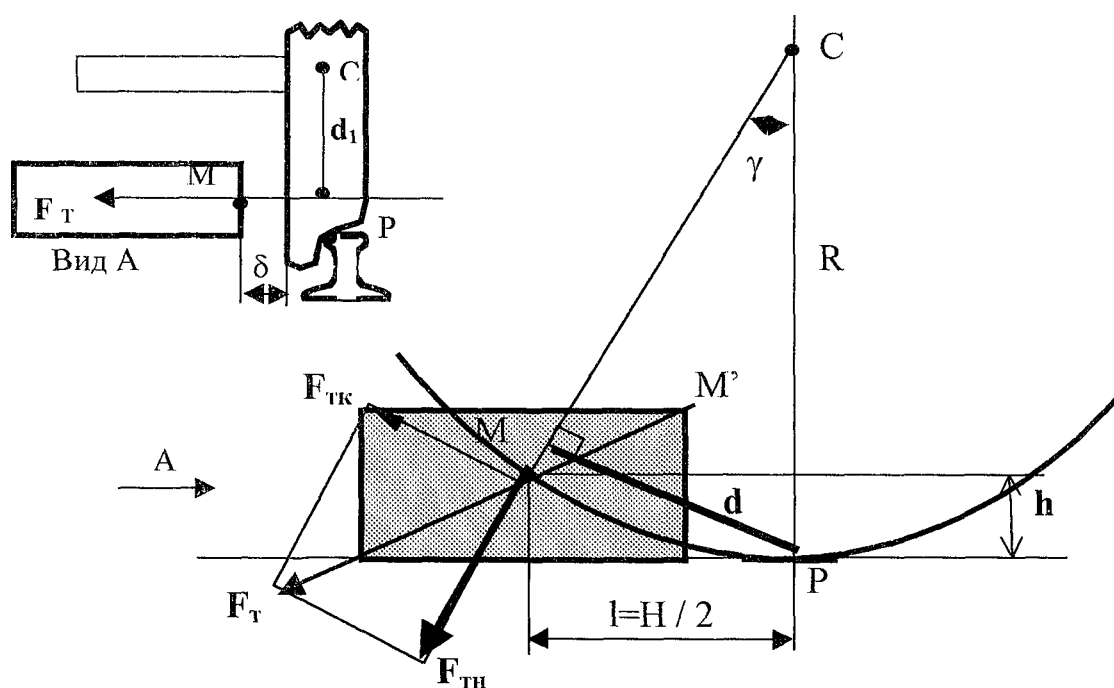


Рис.2.7. Взаимодействие колеса  
с тяговым электромагнитом

При включенном ЭМ, когда центр масс  $C$  колеса находится на вертикальной осевой линии полюса магнитопровода, основной магнитный поток замыкается по цепи (рис.2.8): полюс  $S$  - первое колесо - ось - второе колесо - полюс  $N$ .

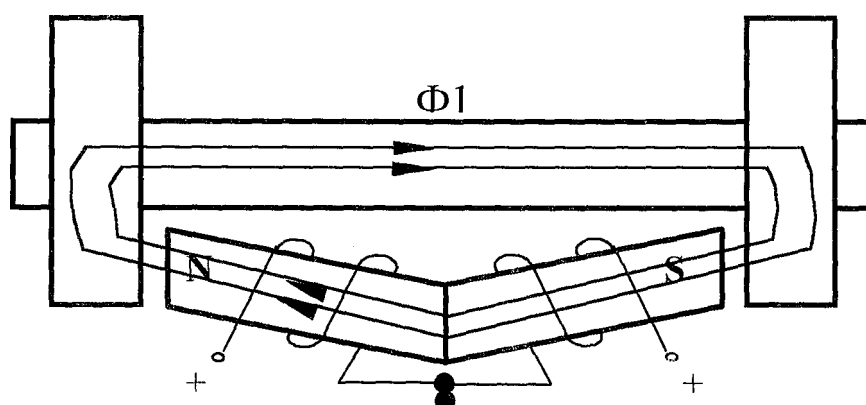


Рис.2.8. Распределение магнитного потока при взаимодействии колеса с одним ЭМ

Возникает тяговая сила  $F_T$  (вид А на рис.2.7), сосредоточенная в центре магнитных масс М. Сила  $F_T$  направлена перпендикулярно плоскости движения колеса и, имея плечо приложения примерно равное радиусу колеса  $R$  относительно точки С, создает вращательный момент. Но движение колёсной пары в этом направлении ограничено жёсткостью конструкции. При удалении от осевой линии площадь  $S$  перекрытия полюса ЭМ и боковой поверхности колеса уменьшается. Очевидно, что и сила электромагнитного притяжения  $F_T$  будет уменьшаться, т.е. она обратно пропорциональна углу поворота у колеса. Центр площадки взаимодействия  $S$  при плоском движении колеса передвигается по диагонали полюса сердечника от середины в правый верхний угол, т.е. из точки М в точку М' (см.рис.2.7). Тогда направление действия силы  $F_T$  противоположно. В плоскости вращения колеса тяговая сила имеет касательную  $F_{TK}$  и нормальную  $F_{TN}$  составляющие. Так как вращающий момент действует относительно

мгновенного центра скоростей Р колеса, то он будет создаваться только нормальной составляющей  $F_{ТН}$  с плечом приложения  $d$ . Как видно из рисунка 2.7, величина плеча приложения силы зависит от угла поворота колеса  $d = R \cdot \sin \gamma$  и принимает максимальное значение при  $\gamma = 90^\circ$ , когда электромагнит уже не оказывает на колесо воздействия. Таким образом, тяговый момент, определяемый как:

$$M = F_{Тн} \cdot R \cdot \sin \gamma \quad (2-Ю)$$

имеет максимум при некотором повороте колеса  $\gamma_{\text{тах}}$

Как известно [50,51], электромагнитная сила находится также в обратной зависимости от величины воздушного промежутка  $\delta$ , которая может принимать минимальное  $\delta_{\text{min}}$  и максимальное  $\delta_{\text{тах}}$  значения в зависимости от расположения колеса и толщины обода. С учётом этого, тяговый момент ЭМ может быть представлен трёхмерной фигурой, имеющей максимум при некотором повороте колеса относительно осевой линии полюса ЭМ.

При расположении колеса между включёнными соседними электромагнитами (рис.2.9), создаётся кроме первой и вторая аналогичная магнитная цепь (рис 2.10). Если электромагниты обладают одинаковыми тяговыми характеристиками, то при равенстве плеч  $d_1 = d_2$ , нормальные составляющие  $F_{Н1}$  и  $F_{Н2}$  создают вращательные моменты, равные по величине, но противоположно направленные. Если отсутствует внешняя движущая сила, колесная пара находится

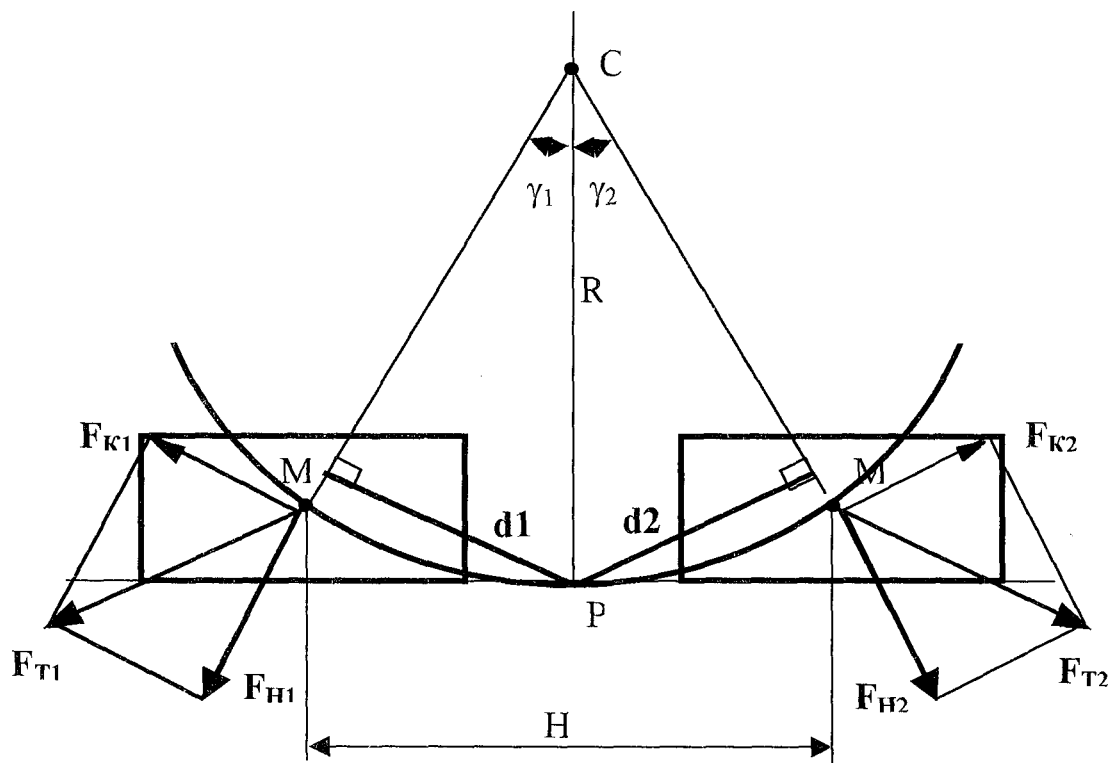


Рис.2.9. Взаимодействие колеса с двумя тяговыми звеньями ЭМЗУ

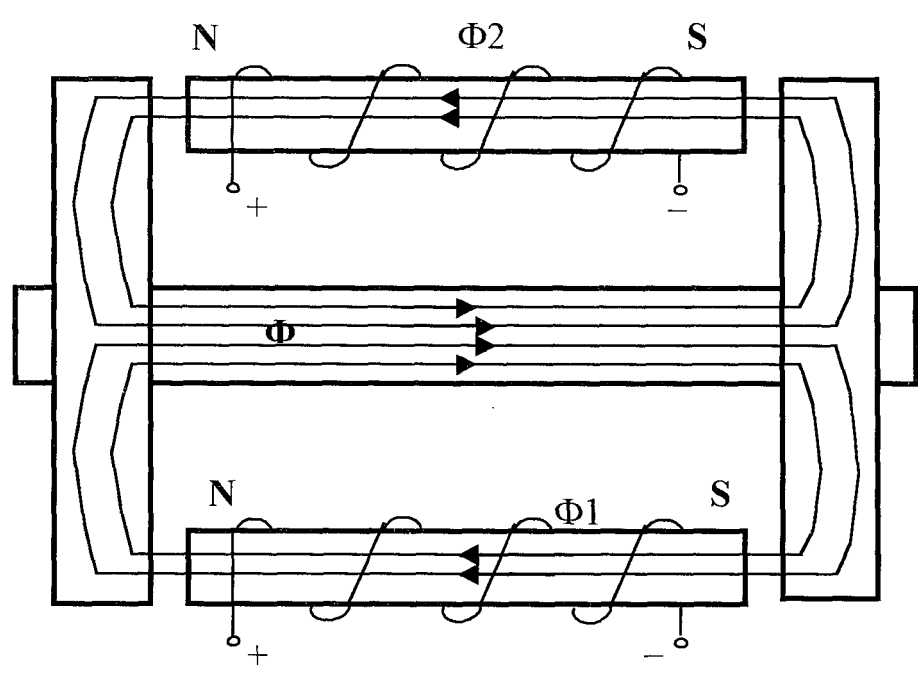


Рис.2.10. Распределение магнитного потока соседних тяговых звеньев

в равновесии. При отключении первого ЭМ, второй оказывает ускоряющее действие. Таким образом, ЭМЗУ замедляет движение вагона при удалении колеса от ЭМ и ускоряет - при приближении.

Как видим (2.10), для получения электромагнитного момента необходим расчёт тяговых усилий, которые будут зависеть от характеристик намагничивания материала сердечника и потокосцеплений магнитного потока. Для выяснения распределения магнитного потока рассмотрим особенности магнитной системы ЭМЗУ.

### 2.3. Исследование магнитной системы ЭМЗУ

ЭМЗУ может состоять из ряда одинаковых электромагнитов, работающих независимо друг от друга. Поэтому исследуем одно тяговое звено, состоящее из ЭМ и расположенной над ним колёсной пары.

#### 2.3.1. Анализ магнитной цепи тягового звена ЭМЗУ

Так как обмотка возбуждения ЭМ занимает всю длину магнитопровода, то магнитная система представляет собой цепь с распределёнными параметрами [52,53]. Эскиз магнитной системы показан на рисунке 2.11. Магнитный поток по длине магнитопровода изменяется из-за наличия потоков рассеяния между сердечником и колёсной парой. Это подтверждается исследованиями магнитных полей остаточной намагниченности колёсной пары при выполнении научно-

исследовательской работы на кафедре «Электротехника и электрические машины» ХарГАЖТ [54].

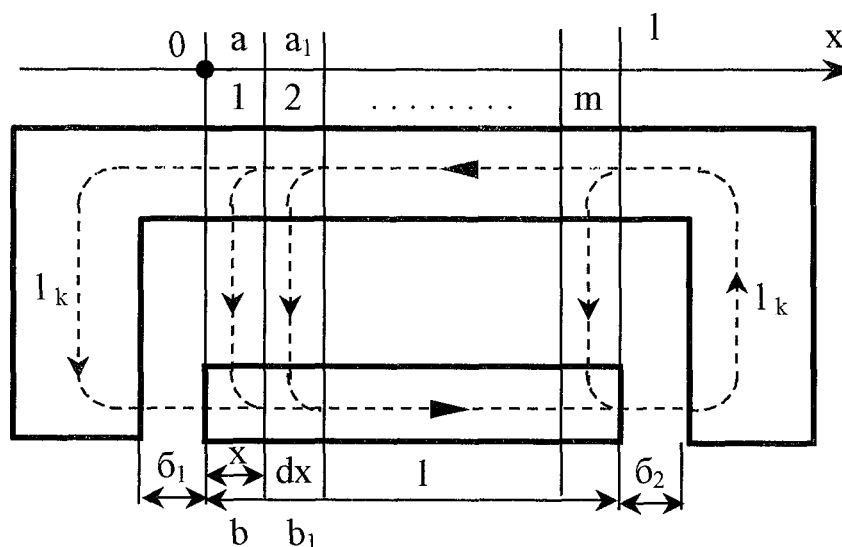


Рис.2.11. Эскиз магнитной системы тягового звена

Плоскостями  $aa_1$  и  $a_1b_1$  выделим бесконечно малый элемент магнитной цепи длиной  $dx$  на расстоянии  $x$  от начала.

Если через плоскость  $aa_1$  проходит поток  $\Phi_x$ , то через плоскость  $a_1b_1$  будет проходить поток [55,56]:

$$\Phi + \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx \quad (2.11)$$

Поток утечки при этом

$$\delta \Phi_x = \Phi_x \left( \Phi_x + \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx \right) \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx. \quad (2.12)$$

По закону Ома  $\Phi_x = U_{mx} g_y dx$

или 
$$\frac{\partial \Phi_x}{\partial x} = -U_{mx} g_y \quad (2.13)$$

где  $g_y$  - удельная магнитная проводимость потока рассеяния;

$U_{mx}$  - магнитное напряжение в сечении ав.

аи

Магнитное напряжение в сечении аiBi будет  $U_{mx} + \frac{dU_{mx}}{dx} dx$ .

Приращение магнитного напряжения на элементе  $dx$ :

$$dU_{mx} = U_{mx} - [U_{mx} + \frac{dU_{mx}}{dx} dx] = -\frac{dU_{mx}}{dx} dx \quad (2.14)$$

По второму закону Кирхгофа запишем:

$$\frac{dU_{mx}}{dx} dx - \sum_{\text{а с l}} R_{CT} dx + dU_{mx} = 0 \quad (2.15)$$

или

$$\frac{F}{dx} - \sum_{\text{а с l}} R dx - \frac{dU_{mx}}{dx} dx = 0, \quad (2.1)$$

где  $F = I \cdot w$  - магнитодвижущая сила (МДС) обмотки;

$I$  и  $w$  - ток и количество витков обмотки;

$R_{CT}$  - удельное сопротивление магнитопровода;

$l$  - длина сердечника.

Из последнего выражения:

$$\frac{d\Phi}{dx} = \frac{R}{1} \quad (2.17)$$

Дифференцируем уравнения (2.13) и (2.17) по  $x$  и переходим к общим производным:

$$\frac{d^2k}{dx^2} = -g \frac{d^2mx}{dx^2} \quad (2.18)$$

$$\frac{d^2x}{dx^2} = -R_{CT} \frac{d^2L}{dx^2} \quad (2.19)$$

и

Подставляя вместо  $\frac{dU_{mx}}{dx}$  и  $\frac{dO_x}{dx}$  их значения, получаем:

$$\frac{d^2O}{dx^2} = O_{xgy} R_{CT} + \frac{F}{1} \quad (2.20)$$

и

$$\frac{d^2U_{mx}}{dx^2} - U_{mx} g_y R_{cr} = 0. \quad (2.21)$$

Уравнению (2.20) соответствует электрическая схема замещения, приведенная на рисунке 2.12.

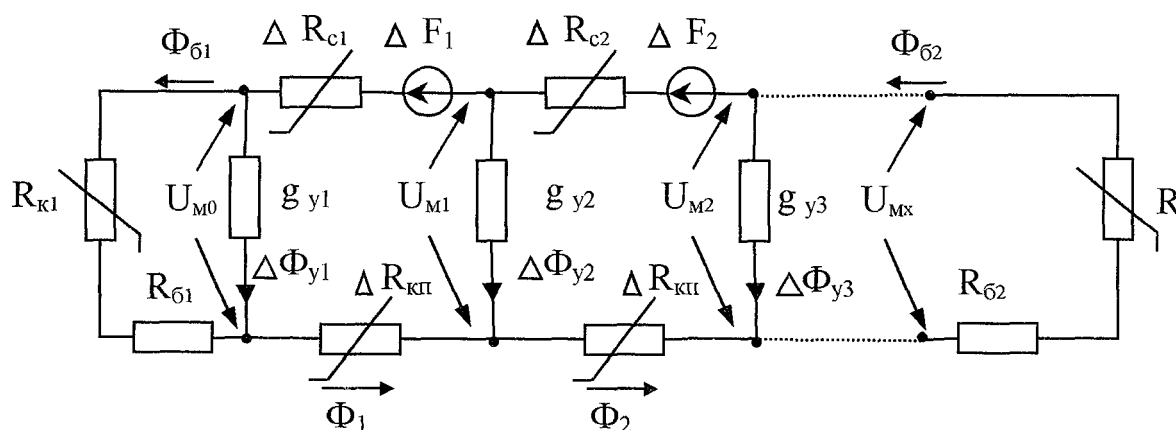


Рис.2.12. Электрическая схема замещения магнитной системы тягового звена ЭМЗУ

На этой схеме обозначены:

$R_{с1}$  и  $R_{с2}$  - линейные сопротивления воздушных зазоров 81 и 82 между полюсами ЭМ и колёсами;

$g_y$  - удельная магнитная проводимость потоков рассеяния (утечки);

$\Delta F$  - удельная магнитодвижущая сила обмотки;

$\Delta R_{с}$  и  $\Delta R_{кп}$  - соответственно нелинейные сопротивления участков сердечника ЭМ и колёсной пары;

$\Delta \Phi_y$  - магнитные потоки рассеяния на участках магнитной цепи.

Распределение магнитного потока по длине магнитопровода описывается дифференциальным уравнением второго порядка и зависит от параметров магнитной цепи и от граничных условий, т.е. от величин сопротивлений воздушных зазоров. Однозначность решения нелинейного уравнения (2.20) можно представить в виде [57]:

$$\Phi_j = - \frac{d\Phi_j}{dx} \quad (2.22)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  - магнитные проводимости воздушных зазоров §1 и §2-

Известны различные методы решения такого уравнения, которые можно разбить на три группы:

- 1) Аналитические методы расчёта магнитной цепи.
- 2) Графические способы интегрирования уравнения.
- 3) Методы численного интегрирования.

Точные формулы получены Коваленковым В.И. [58] на основе теории активного четырёхполюсника. Магнитный поток по краям сердечника определяется:

$$\frac{A[AR_{s1} + (CR_{51} + 1)X_{52}J - CR_{51}[B + R_{52}(A - 1)]}{B + A(R_{51} + R_{\S 2}) + CR_{81}R_{82}} \quad (2.23)$$

где коэффициенты равны:

$$A = \frac{chI_A}{g_y R_{CT}}; \quad B = J_{\text{с}} \frac{L_{\text{с}}}{g_y R_{CT}}; \quad C = \frac{L_{\text{с}}}{V_{\text{с}} R_{CT}}$$

В упрощённом виде магнитный поток определяется из выражения:

$$\Phi = \frac{J_{\text{с}} L_{\text{с}}}{21 \cdot [(R_{CT} + R_{81}R_{52}g_y) + g_y(R_{s1} + R_{\S 2})]} \quad (2.24)$$

Аналитический метод определения магнитного потока [59] позволяет проводить анализ соизмерностей электромагнита и влияния на качество конструкции его параметров. Исходя из того, что зависимость  $\Phi_x = \Phi(x)$  - непрерывная функция, её можно представить в виде ряда Маклорена:

$$\Phi_x = \Phi(0) + \Phi'(0) \frac{x}{1!} + \Phi''(0) \frac{x^2}{2!} + \dots + \Phi^{(n)}(0) \frac{x^n}{n!} \quad (2.25)$$

После ряда преобразований решение относительно магнитного потока имеет вид [60]:

$$\Phi = \Phi_x + g_0 \frac{1}{2} \frac{X^2}{l_{cp}} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{1}{J} \frac{1}{\Phi_5} \quad (2.26)$$

где  $\odot H$  - суммарная намагничивающая сила;

$l_{cp}$  - длина средней магнитной линии.

Второе слагаемое суммы представляет поток рассеяния. Для практических расчетов больше подходит упрощённая формула, полученная аналитическим путём [55]:

$$\Phi_x = \Phi_5 - 21 G_{S1} \sqrt{1-x^2} \quad (2.27)$$

где  $\Phi_5$  - магнитный поток в воздушном зазоре;

С учётом выражения (2.27), можно сказать, что максимум магнитного потока будет примерно посередине длины

магнитопровода. По мере приближения к воздушным зазорам поток уменьшается.

Расчёты упрощаются, если пренебречь падением магнитного потенциала по длине магнитопровода. Сопротивление участков сердечника составляет незначительную часть общего сопротивления. При распределённой магнитодвижущей силе возможно получить уравнения для вычисления магнитного потока в любом месте магнитной цепи через поток в воздушном зазоре. При этом связь между потоками выражается через коэффициент рассеяния [60,61]:

$$\sigma_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{\Phi_y}{\Phi_\delta} \quad (2.28)$$

где  $\Phi_x = \Phi_\delta + \Phi_y$  - полный магнитный поток через данное сечение;

$\Phi_y$  - поток утечки.

В итоге решения для рассматриваемой магнитной цепи получаем:

$$\frac{x}{2} \cdot \left( 2 - \frac{x}{l_p} \right) \quad (2.29)$$

где  $G_H = G_{51} + G_{52}$  - суммарная магнитная проводимость воздушных зазоров;

$l_p$  - расчетная длина сердечника.

Выражение в квадратных скобках представляет собой коэффициент рассеяния.

Расчётную длину сердечника можно определить по формуле [55]:

$$\frac{2 + \frac{1}{G_{s1}}}{2 - 1 + \frac{1}{G_{s1}}} \quad (2.30)$$

Если индукция не выходит за пределы колена кривой намагничивания, расчёт можно вести по среднему значению магнитного потока графическим методом.

Для повышения точности расчетов можно использовать численное интегрирование, основанное на методе Эйлера [62].

Если дано дифференциальное уравнение первого порядка, разрешенное относительно производной  $y'=f(x,y)$  и искомая функция удовлетворяет начальным условиям  $y=y_0$  при  $x=x_0$ , то считая, что в пределах малого промежутка  $\Delta x$ , производная сохраняет постоянное значение  $f(x_0 + \Delta x/2, y_0)$ ,

имеем:

$$y_i = y_0 + \Delta x f(x_0 + \Delta x/2, y_0) \quad (2.31)$$

где  $y_0$  - значение функции, соответствующее величине

$x_0 + \Delta x$ , а  $y_i$  - величине  $x_0 + \Delta x_i$

Повторяя операцию, получаем значения  $u_2, u_3$  и т.д. Ступени  $A_x$  могут иметь переменное значение. Рассмотренные методы анализа магнитной системы элементарного звена ЭМЗУ позволяют провести разработку методик ее расчета.

### 2.3.2. Разработка методик расчета магнитной цепи ЭМЗУ

Так как магнитная цепь тягового звена симметрична относительно середины, то рассмотрим ее половину. Электрическая схема замещения представляет последовательное соединение линейного сопротивления воздушного зазора и нелинейного - магнитопровода. Методика основана на том, что:

-обмотка возбуждения распределена равномерно по длине сердечника;

-по магнитопроводу проходит неизменный поток

$$\Phi_{\ll} = \Phi_{8\text{аср}}, \quad (2.32)$$

где  $\sigma_{\text{ср}} = \frac{g_1 l_c}{2G_8}$  — среднее значение коэффициента рас-

сеяния;

$l_c = \frac{1}{2}$  - половина длины сердечника.

Для магнитной цепи справедливо уравнение [63]:

$$f = f_c + f_s = H_c + f_s, \quad (2.33)$$

где  $f = \frac{I_w}{\dots}$  — удельная МДС;

$f_c = H_c$  - напряжённость поля в стали;

$f_\delta$  - удельная МДС в воздушном зазоре.

С учётом вышепринятого, предлагается следующая методика расчёта:

- 1) Задаёмся значением индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$ .
- 2) Находим расчётное значение индукции:

$$B_{рас} = B_\delta \cdot \lambda_{ср} \quad (2.34)$$

- 3) Определяем угол ( $\rho$  наклона прямой ВА:

$$\rho = \arctg \left( G_\delta + \frac{1}{2} g_y l_c \right) \cdot \frac{l_c}{S_c} \cdot \frac{P_H}{P_B} \quad (2.35)$$

где  $G_\delta + |g_y l_c$  - магнитная проводимость воздушного за-

зора с учетом проводимости рассеяния;

$P_H$  и  $P_B$  - масштаб соответственно по оси H и B.

- 4) Из точки  $B = B_{рас}$  на кривой намагничивания стали [64] проводим прямую ВА под углом  $\rho$ .
- 5) Точка А на оси абсцисс даёт значение удельной намагничивающей силы, откуда определяем полную МДС:

$$I_w = f \cdot l_c \quad (2.36)$$

Опустив перпендикуляр из точки  $B_{рас}$  на ось абсцисс, получаем также удельную МДС в воздушном зазоре  $f_\delta$ .

Основываясь на методе Эйлера, с учётом допущений в п.2.1 предлагается следующая методика расчёта:

- 1) Разбиваем магнитную цепь (рис.2.13) на участки  $i$ .

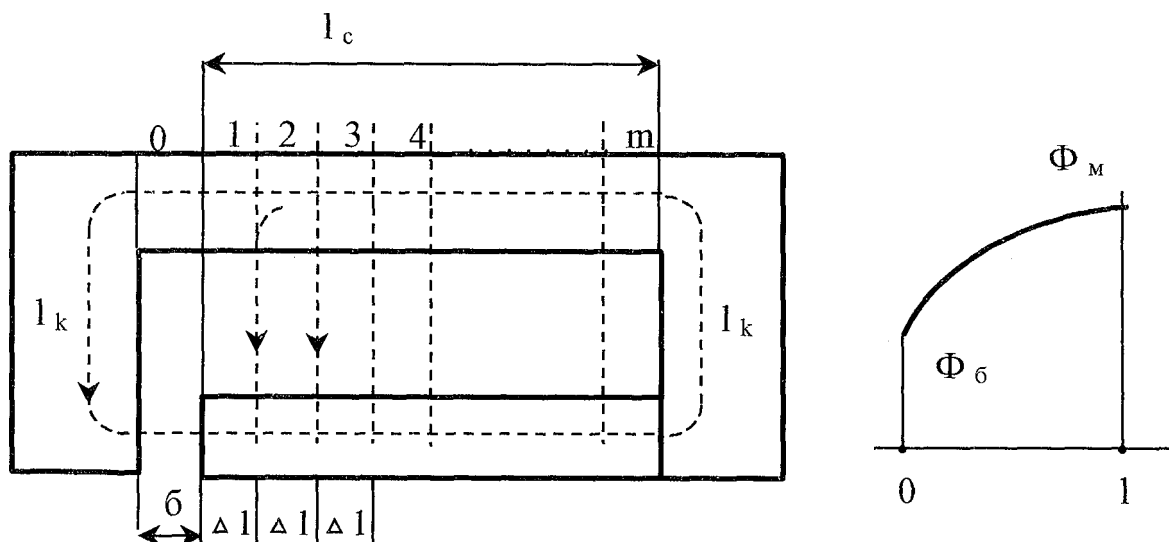


Рис.2.13. Эскиз расчетной магнитной цепи ЭМ

- 2) Задаёмся величиной магнитной индукции в воздушном зазоре  $B_0$  на уровне 0.7-1-0.8 от индукции насыщения.

- 3) Определяем магнитный поток в зазоре:

$$\Phi_{\delta} = \frac{B_0 S_c}{\mu_0}, \quad (2.37)$$

где  $S_c$  - сечение сердечника.

- 4) По кривой намагничивания [64] находим напряжённость магнитного поля в колесе  $H_k = f(B)$ .

- 5) Определяем падение магнитного напряжения  $U_{M0}$  «на входе» зоны рассеяния (рис.2.14):

$$U = H_k l_k + \Phi_{\delta} G_s, \quad (2.38)$$

где  $l_k$  - длина участка колеса равная примерно его радиусу;

$G_g$  - проводимость воздушного зазора.

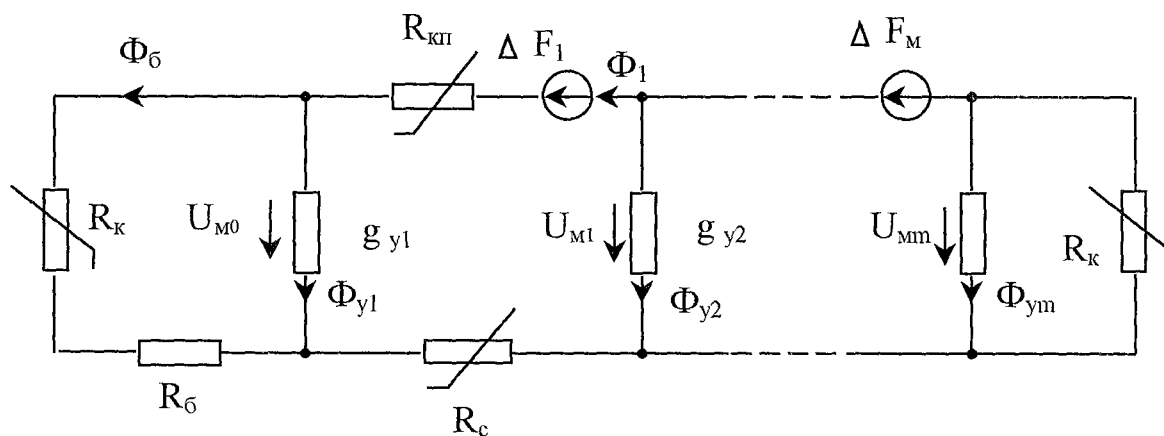


Рис.2.14. Электрическая схема замещения  
расчетной магнитной цепи

б) Определяем магнитный поток утечки на первом участке ( $i=1$ ):

$$y_i = \frac{I_{M0} G_y}{m} \quad (2.39)$$

где  $G_y = g_y \cdot l_c$  - полная проводимость рассеяния (утечки);

$m$  - число участков в зоне рассеяния.

7) Определяем магнитный поток через первый участок ( $i=1$ ):

$$|\Phi| = \Phi_5 + \Phi_{y1}. \quad (2.40)$$

8) Определяем магнитную индукцию и напряжённость магнитного поля в сердечнике и оси на первом участке ( $i=1$ ):

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_c} \quad \text{Мл).} \quad (2.41)$$

9) Находим магнитное напряжение на «выходе» первого участка:

$$U_{M1} = I_{M0} + H_x \cdot 2A1 - ДБ) \text{ или}$$

$$I_{M1} = I_{M0} + \Phi_1 \cdot (K_c + K_0) \cdot Др_1, \quad (2.42)$$

где  $Дл = l_c/\wedge$  - длина одного участка;

$AF = !\%$  - магнитодвижущая сила на один участок;

$R_c + K_0$  - сопротивление сердечника и эквивалентного сечения оси.

10) Пункты 6-9 повторяем для остальных участков  $i=2,3.., ш.$

11) Определяем суммарную потребную МДС для одного тягового ЭМ:

$$F = 2 \cdot (U_M + H_T - 1_K). \quad (2.43)$$

Для расчёта необходимо знать удельную проводимость утечки  $g_y$  и сопротивление стальных участков. Сердечник представляет собой плоскость, а ось колёсной пары - цилиндр. Воспользуемся известной формулой [62]:

$$\frac{\mu_0 \cdot 2I_n}{b + \sqrt{b^2 - r^2}} \quad (2.44)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  - магнитная постоянная;

$b$  - расстояние между осью колесной пары и поверхностью электромагнита;

$r$  - радиус оси колесной пары.

Определить сопротивление стальных участков прямоугольного сечения можно по эмпирической формуле [57]:

$$R_c = A \cdot 16 \cdot [K + 1] (0,7 + 0,23 \cdot \exp(-0,17(1 - K))), \quad (2.45)$$

\* $T <$

где  $K$  - соотношение размеров сторон прямоугольника,

$$1 < K < 20$$

$\rho$  - удельное сопротивление материала сердечника;

$l_T$  - длина участка.

После определения необходимой магнитодвижущей силы обмотки возбуждения можно перейти к анализу математической модели разрабатываемого устройства.

#### 2.4. Математическая модель электромагнитного замедлителя-ускорителя

Так как элементарными частями ЭМЗУ являются тяговые электромагниты, то ограничимся математическим анализом одного звена, которое с расположенной над ним колёс-

ной парой представляет собой электромагнитный механизм постоянного тока. Особенности работы такого механизма можно описать с помощью пяти основных уравнений [52,60,65,66]:

1) Уравнение электрической цепи тягового ЭМ:

$$U = iR + \frac{d\psi}{dt} \text{ или } U = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (2.46)$$

Если учесть, что  $\frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt}$ , то заменяя, получаем:

$$U = iR + w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.47)$$

где  $U$  - напряжение источника питания цепи обмотки;

$i$  - мгновенное значение тока;

$R$  - активное сопротивление обмотки;

$\psi$  - мгновенное значение потокосцепления;

$L$  - индуктивность;

$w$  - количество витков обмотки;

$\Phi$  - магнитный поток;

$t$  - время.

Уравнения (2.46), (2.47) дают возможность проанализировать процесс преобразования электрической энергии источника в энергию магнитного поля.

2) Уравнение характеристики намагничивания электромагнита:

$$v = f_2(M) \quad (2.48)$$

Характер кривой намагничивания определяет возможность преобразования магнитной энергии в механическую и величину электромагнитной силы.

3) Уравнение электромагнитной силы (вращательного момента):

$$M_3 = f_3(w, \dots), \quad (2.49)$$

где  $W_M$  - энергия, запасённая в магнитном поле.

4) Уравнение движения:

$$M_3(y) = M_c + J \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2.50)$$

где  $M_3$  - вращательный электромагнитный момент, развиваемый тяговым ЭМ;

$M_c$  - противодействующий момент;

$J \frac{d^2 y}{dt^2}$  - приведенный момент инерции подвижных частей;

$y$  - угол поворота колеса относительно вертикальной осевой линии полюса ЭМ.

5) Уравнение нагрева и охлаждения электромагнита:

$$v = f_5(P, L, \text{вкл, размеры}). \quad (2.51)$$

Связывает температуру нагрева  $v$  с мощностью  $P$ , выделяющейся в обмотке, размерами электромагнита и временем включения.

Отличительным уравнением, требующим дополнительного исследования является зависимость тяговой силы  $F_T$  или электромагнитного момента  $M_0$  от накопленной магнитной энергии.

Известно, что тяговые силы, действующие в воздушном промежутке, находят из следующих соображений [62,67]:

элементарная механическая работа, совершаемая тяговой силой  $F_T$  на пути  $d\ell$ , равна:

$$dA = F_T \cdot d\ell \quad (2.52)$$

где  $d\ell$  - элементарное перемещение колеса от вертикальной осевой линии полюса ЭМ.

С другой стороны, механическая работа, совершаемая тяговой силой, при постоянном токе равна изменению магнитной энергии в воздушном зазоре  $dA=dW_M$ . С учётом этого и выражения (2.52) получаем:

$$F_T = \frac{dW_M}{d\ell} \quad (2.53)$$

Проанализируем энергетические преобразования, происходящие в ходе работы тягового ЭМ [68]. Для этого используем уравнение (2.47), умножая его почленно на  $i \cdot dt$ :

$$U_{id} dt = i^2 R dt + w_{id} O. \quad (2.54)$$

Левая часть выражения - мощность, полученная от источника за время  $dt$ ,  $i^2 R dt$  - тепловые потери в активном сопротивлении обмотки,  $w_{id} O$  - мощность на создание магнитного поля. Интегрируя (2.54), получаем:

$$\int_0^{t t \Phi} U_{id} dt = \int_0^{t t \Phi} i^2 R dt + \int_0^{t t \Phi} w_{id} O. \quad (2.55)$$

Представляет интерес энергия магнитного поля:

Ф

Ф

$$W_M = \int_0^{t t \Phi} w_{id} O = \int_0^{t t \Phi} j F d O. \quad (2.56)$$

Графически этот определённый интеграл представляет площадь между кривой намагничивания и осью ординат. В рассматриваемом механизме достаточно большие воздушные зазоры, так что падением магнитного напряжения в сердечнике можно пренебречь. Кроме того, получена экспериментально кривая намагничивания [64], что позволяет устанавливать индукцию  $B_{рас}$  в пределах прямолинейного участка этой кривой. Поэтому можем перейти к линейной зависимости в воздушном зазоре.

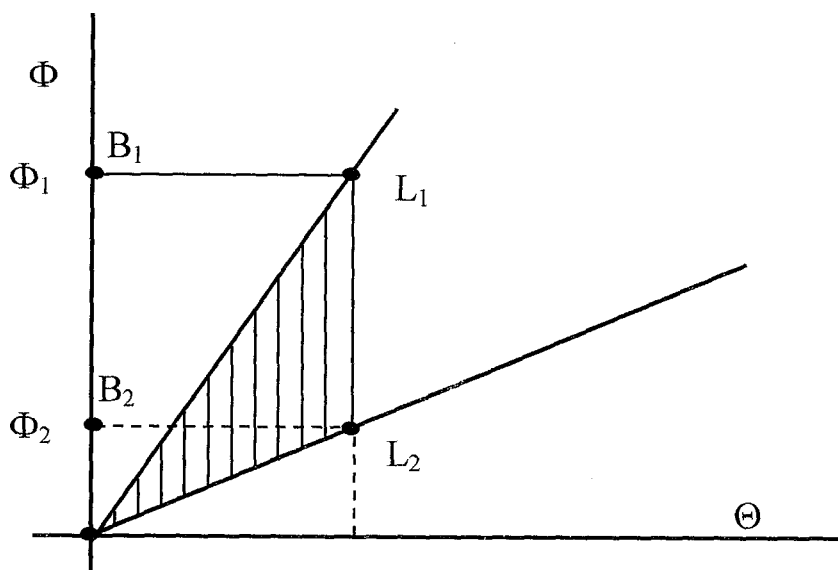


Рис.2.15. ВАХ воздушного промежутка между полюсом электромагнита и колесом

Пусть колесо удалено на расстояние  $\hat{2}$  от вертикальной осевой линии полюса ЭМ. Магнитная энергия, выражаемая

интегралом  $W_{M2} = \int_0^{\Phi_2} J \cdot d\Phi$ , графически представляет пло-

щадь  $O B_2 B_2 O$

или 
$$W_{M2} = \frac{J \cdot \Phi_2^2}{2} \quad (2.57)$$

Энергия, полученная системой за время движения колеса к полюсу ЭМ:

$$W_{M1} = \int_{\Phi_2}^{\Phi_1} J \cdot d\Phi = J \cdot \frac{\Phi_1^2 - \Phi_2^2}{2} = J \cdot \Phi\text{-площадь } B_2 L_2 L_1 B_1$$

или 
$$W_{M1} = J \cdot \frac{\Phi_1^2 - \Phi_2^2}{2} \quad (2.58)$$

Магнитная энергия, остающаяся после окончания движения:

$$W_{M3} = \frac{\Phi_1}{\sigma} \int_{\sigma} J \cdot dO - \text{площадь OLjBiO}$$

или 
$$W_{M3} = \frac{\sigma \Phi_1^2}{2} \quad (2.59)$$

Энергию на перемещение колёсной пары определим как разность между подведенной энергией и остающейся после окончания движения:

$$W_M = W_{M2} + W_{M1} - W_{M3} - \text{площадь OL2L1O или}$$

$$\frac{\sigma \Phi_9}{2} + \frac{1}{\sigma} \int_{\sigma} \Phi_1 \cdot \Phi_9 = \frac{1}{2} \int_{\sigma} (\Phi_1 - \Phi_9)^2 \quad (2.60)$$

По закону Ома для воздушного зазора между двумя параллельными плоскостями для положений 1 и 2 [69]:

$$\Phi_1 = \frac{I}{S_1} \text{ и } \Phi_2 = \frac{I}{S_2} \quad (2.61)$$

где  $C_{\sigma 1} = \frac{S_1}{\sigma}$  и  $C_{\sigma 2} = \frac{S_2}{\sigma}$  - магнитные проводимости

воздушного зазора соответственно в положении 1 и 2 колеса;

$S_1$  и  $S_2$  - площади воздушного промежутка при взаимодействии полюса и колеса. С учётом (2.60) получаем:

$$W_M = \frac{\Theta^2 \cdot (G_{\delta 1} - G_{\delta 2})}{2}. \quad (2.62)$$

Подставляем в (2.53) выражение (2.61), заменяя  $G_{\delta 1}$  и  $G_{\delta 2}$ :

$$W_M = \frac{F_1 \cdot 2 \cdot h \cdot d}{2} \quad (2.63)$$

Для определения электромагнитного момента необходимо знать величину плеча приложения силы. Из рисунка 2.7 находим зависимость плеча  $d$  от местоположения колеса относительно полюса ЭМ:

$$d = \frac{R}{R-h} \quad (2.64)$$

где  $R$  - радиус колеса;

$h$  - превышение центра магнитных масс над УГР.

С учётом (2.63) и (2.64) получаем выражение для определения тягового электромагнитного момента

$$M_3 = \frac{\Theta^2 \cdot F_1 \cdot 2 \cdot h \cdot R}{2 \cdot (R-h)} \quad (2.65)$$

которое уточняет математическую модель разрабатываемого устройства.

Получив основные математические выражения, можно перейти к установлению конструкционных параметров ЭМЗУ и исследованию его эксплуатационных характеристик.

## Выводы по разделу 2

1. Анализ теоретических исследований существующих электромагнитных средств регулирования скорости показал, что основные математические выражения представляют зависимость тяговой силы или тягового момента. Конструкционные различия ЭМЗУ и известных устройств не позволяют использовать полученные ранее математические соотношения.

2. Для упрощения математического анализа разрабатываемого устройства обоснованы и приняты ряд допущений, не оказывающих значительного влияния на эффективность работы устройства. К рассмотрению принята однородная магнитная система прямоугольного сечения с двумя воздушными рабочими промежутками.

3. Исследована динамика взаимодействия тягового ЭМ с колесом вагона. ЭМЗУ замедляет движение при удалении колесной пары от вертикальной осевой линии полюса и ускоряет при приближении. Вращающий момент создается нормальной составляющей электромагнитной силы. Выяснено, что, в зависимости от расположения колеса относительно полюса ЭМ, тяговый момент имеет колоколообразную форму с максимумом посередине шага расположения соседних электромагнитов.

4 .Проведен анализ методов расчета магнитной цепи тягового звена ЭМЗУ, представляющую систему с распределенными параметрами, в которой имеют место значительные потоки рассеяния. Зависимость изменения основного магнитного потока вдоль сердечника представляется дифференциальным уравнением второго порядка.

5 .Разработаны методики расчета магнитной цепи для определения необходимой намагничивающей силы обмотки возбуждения ЭМ, основанные на графическом и аналитическом методах. Аналитический метод численного интегрирования дает более точные результаты, но более трудоемкий. Графический метод по среднему значению магнитного потока проще и с достаточной точностью может применяться для инженерных расчетов.

6 .Получено новое выражение, отражающее зависимость тягового электромагнитного момента от конструктивных размеров тягового ЭМ, колеса и их взаимного положения. Таким образом усовершенствована математическая модель ЭМЗУ. Тяговый момент пропорционален скорости изменения площади воздушного зазора между полюсом ЭМ и колесом по мере продвижения последнего, квадрату намагничивающей силы и обратнопропорционален величине воздушного зазора.

### РАЗДЕЛ 3

## СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ТЯГОВОГО ЗВЕНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ-УСКОРИТЕЛЯ

### 3.1. Синтез тягового звена электромагнитного замедлителя-ускорителя

Исследования свидетельствуют, что замедлитель-ускоритель может состоять из нескольких тяговых электромагнитов, работающих независимо друг от друга. Величина электромагнитного момента (2.65) пропорциональна МДС в воздушном зазоре, площади взаимодействия полюса ЭМ с колесом, а также обратно пропорциональна величине воздушного промежутка. В свою очередь площадь перекрытия полюса и колеса зависит от радиуса колеса и его местоположения относительно вертикальной осевой линии торца магнитопровода. Таким образом, эксплуатационные показатели ЭМЗУ во многом зависят от его конструктивных характеристик.

### 3 . 1.1 .Конструкционные размеры тяговых звеньев замедлителя-ускорителя

С целью получения максимального тягового момента и возможности разнонаправленного действия разработан электромагнитный замедлитель-ускоритель [42], состоящий из ряда тяговых электромагнитов, расположенных аналогично

шпале железнодорожного пути на расстоянии  $H$  друг от друга  
(рис.3.1).

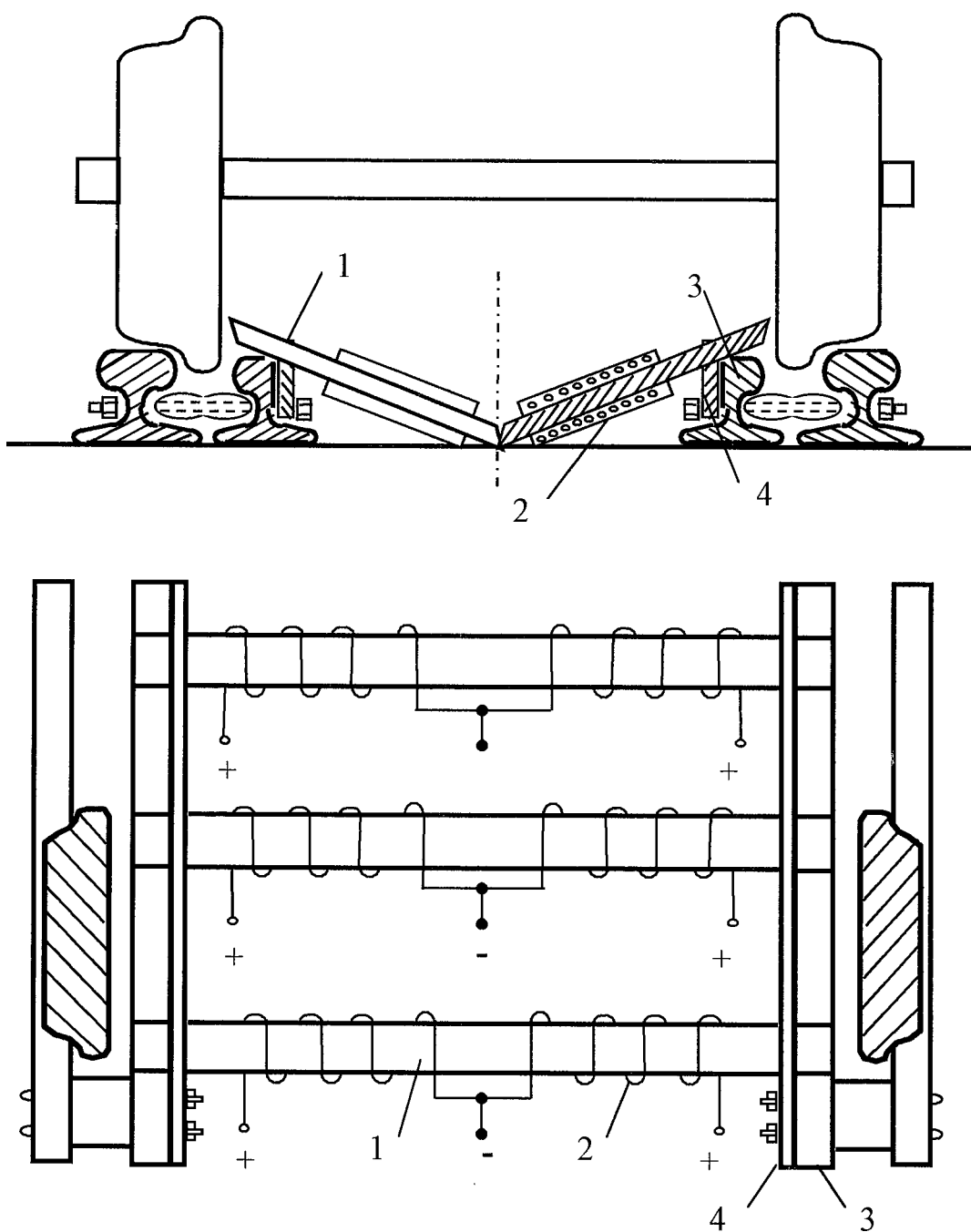


Рис.3.1. Расположение тяговых звеньев в пути:

1-магнитопровод тягового электромагнита;

2-катушка электромагнита;

3-контррельс;

4-защелка.

Сердечники V-образной формы закреплены с помощью защёлок в контррельсах так, что их торцевые поверхности совпадают с поверхностью трения контррельса.

Обмотки возбуждения электромагнитов выполнены в виде двух катушек, расположенных в герметизированных корпусах. V-образный профиль сердечников и установка в контррельсы так, что их торцевые поверхности совпадают, позволяет:

- поднять торцевую поверхность сердечника до уровня боковой поверхности бандажа колеса и тем самым обеспечить максимальное взаимодействие сердечника с колесом;

- сократить магнитное сопротивление магнитному потоку, т.к. можно обеспечить минимальный воздушный зазор между сердечником и колесом;

- обеспечить однородность магнитного поля;

- выполнить требования габарита и уменьшить глубину заложения;

- защитить торцевые поверхности от трения с колесом.

Располагая торцевые поверхности магнитопроводов над головкой рельса, параллельно плоскости обода колеса, и обеспечивая равенство поверхностей взаимодействия, исключаем появление участков магнитной цепи с насыщением магнитным полем. Шаг расположения электромагнитов должен обеспечивать замыкание магнитных потоков колесами у соседних электромагнитов. Для выполнения перечисленных требований установим конструктивные размеры ЭМЗУ и колёсной пары.

В настоящее время на железных дорогах эксплуатируются грузовые вагоны [70] с цельнокатаными колесами диаметром 950мм. Согласно [71] толщина обода нового колеса 70мм, а допустимая минимальная толщина - 22мм. Таким образом, максимальный радиус окружности катания колеса 475мм, а минимальный - 427мм. Так как торцы сердечников совпадают с поверхностью трения контррельсов, то общая длина магнитопровода равна расстоянию между этими поверхностями [72] и составляет не более 1435мм. Расстояние между внутренними гранями колес может находиться в пределах 1443ч- 1437мм [71]. С учетом толщины гребня, которая изменяется от 33 до 25мм, размеры воздушного зазора 5 между полюсом электромагнита и внутренней гранью колеса будут в пределах 2ч8мм (рис.3.2).

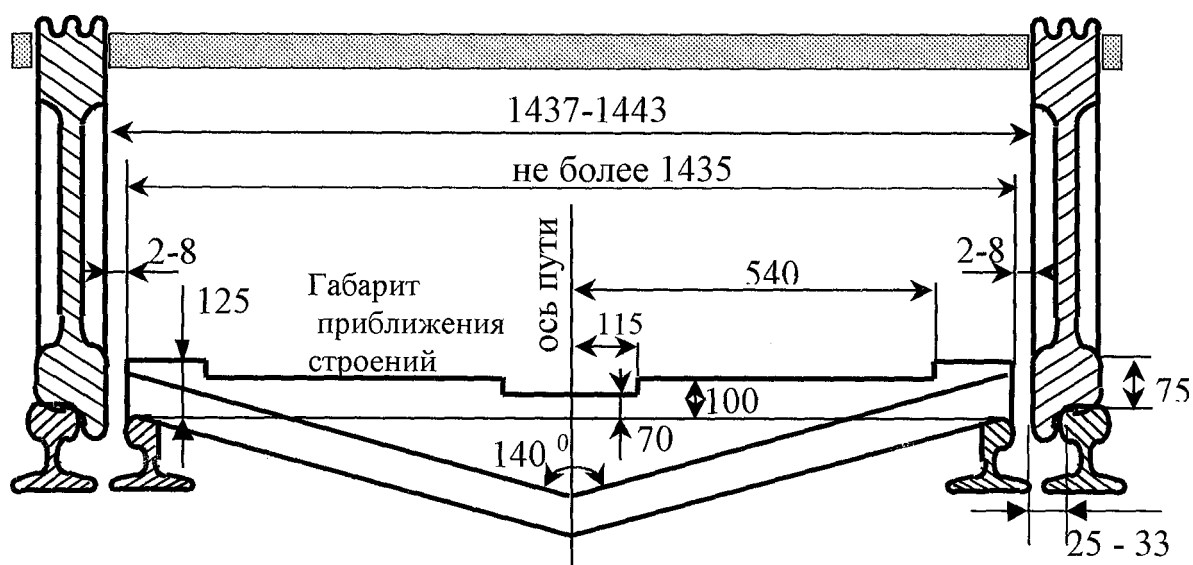


Рис.3.2. Конструкционные размеры сердечника  
тягового звена ЭМЗУ

Для получения большего плеча  $d$  действия силы  $F_T$  необходимо обеспечить максимально возможное превышение  $h$  центра магнитных масс  $M$  над уровнем головки рельса (УГР). Но сверху размер ограничивается габаритом приближения строений [18], составляющий 125мм над УГР, а снизу - условием прохождения магнитного потока по ферромагнитной массе колеса. Поэтому высота полюса ЭМ  $a=100$ мм, а его горизонтальная осевая линия возвышается над УГР на  $h_1=50$ мм. Как известно [73,74], индуктивность прямоугольного витка максимальна (что приводит к увеличению намагничивающей силы) при соотношении длин сторон  $1 < b/a < 3$ . Тогда ширина полюса  $b=200$ мм. Для обеспечения минимальной глубины заложения угол изгиба V-образного сердечника составляет около  $140^\circ$ , при этом глубина заложения от УГР -250мм.

Чтобы определить шаг установки  $H$  соседних ЭМ, обратимся к рисунку 3.3, где показан вид сбоку на взаимное расположение колеса и двух соседних ЭМ в масштабе 1:5.

Эффективное воздействие оказывается пока точка  $M$  не выходит за пределы окружности катания колеса. Для обеспечения условия перехода ЭМ из режима торможения в режим ускорения и наоборот, окружность катания колеса с минимальным радиусом  $R=427$ мм должна проходить через точки  $M$  соседних ЭМ, если колесо расположено между ними. Таким образом получаем интервал установки тяговых звеньев равный  $H=400$ мм.

Зная конструкционные характеристики ЭМЗУ, для получения расчетной величины МДС необходимо определить параметры обмотки возбуждения.

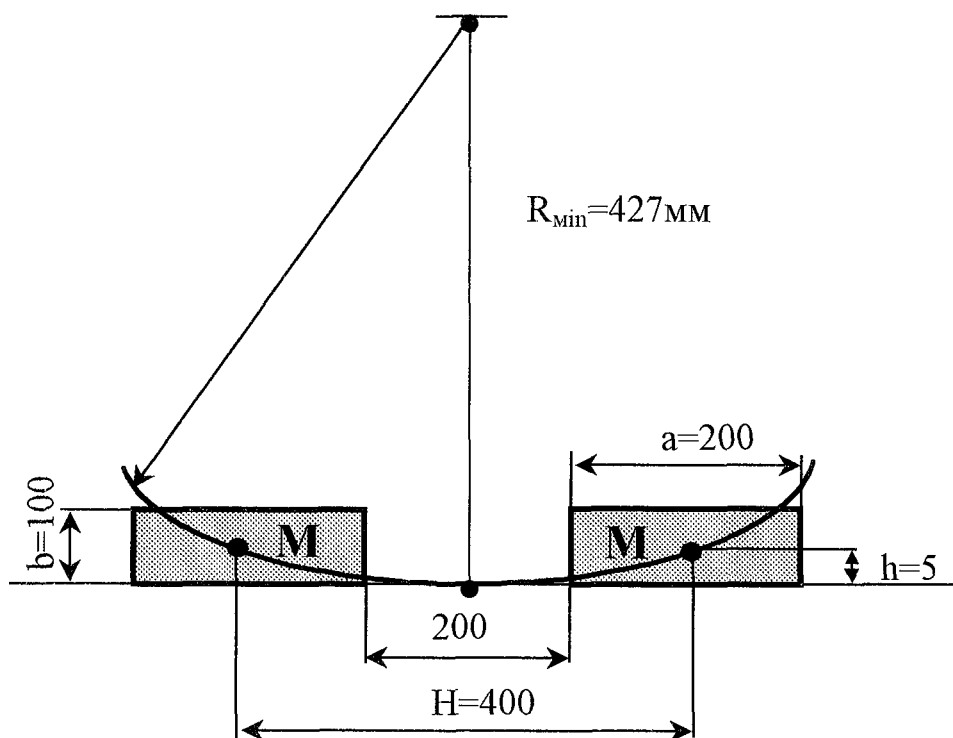


Рис.3.3. Интервал расположения соседних ЭМ

### 3.1.2. Параметры обмотки возбуждения тягового ЭМ

Задача расчёта обмотки заключается в подборе диаметра провода  $d$ , числа витков  $w$  и определении сопротивления обмотки  $R$ , которые при заданном напряжении  $U$  питания обеспечивают необходимую МДС [60,62]. При этом температура нагрева  $v$  обмотки не должна превышать допустимой.

Из рисунка 3.3, по размерам сечения полюса ЭМ, определяем внутренние размеры прямоугольного каркаса катушки:

$a=200$ мм - ширина окна каркаса;

$b=100$ мм - высота окна каркаса.

Для укладки необходимого количества витков требуется знать площадь сечения окна намотки:

$$Q_K', \quad (3.1)$$

где  $h_K$  - высота намотки;

$l_K$  - длина катушки.

Значение  $Q_K$  может быть достигнуто при разных отношениях  $l_K/h_K$ . Исследования [69] показали, что увеличение  $l_K/h_K$  приводит к уменьшению расхода меди, т.к. уменьшается объём меди и увеличивается поверхность охлаждения. Поэтому, с целью экономии цветного металла и улучшения теплового режима, принимаем  $l_K=500\text{мм}$ , что максимально возможно по условиям габарита.

Как известно [56,62], сопротивление обмотки с плоским сердечником определяется:

$$R = \rho \cdot w, \quad (3.2)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала обмотки;

$l_{cp}$  - средняя длина витка;

$S$  - сечение провода.

Для прямоугольной катушки длину витка можно определить по формуле:

$$l_{cp} = M \cdot \cos \alpha + B_K \quad (3.3)$$

где  $D = 2 \cdot (a+b) / \pi t$  - эквивалентный внутренний диаметр.

С учётом этого выражение (3.3) запишем:

$$l_K = \pi \cdot d_i \cdot h_K + 2 \cdot (a + \dots) \quad (3.4)$$

Количество витков  $w$  для шаговой намотки определяется формулой [55]:

$$w = w_0 \cdot l_K \cdot h_K \quad (3.5)$$

где  $w_0 = \frac{1}{\pi \cdot d_i \cdot k_n}$  — число витков на единицу площади окна намотки;

$d_i$  — диаметр провода с изоляцией;

$k_n$  — коэффициент неплотности намотки.

Введём постоянную  $C_{\ll F \cdot W \gg}^{-10^4}$  для данной обмотки

и подставим в формулу (3.2). С учётом (3.3)-(3.5) определим сопротивление обмотки:

$$R = C_0 \cdot l_K \cdot B_K \cdot (O_{03} + B_K). \quad (3.6)$$

Выражение позволяет удобно вычислять  $R$ , т.к. постоянная  $C_0$  обычно приводится в справочниках.

Необходимая МДС  $F_{рас} = Iw$  была определена в предыдущем разделе. Если задано напряжение питания  $U$ , то:

$$F_{рас} = \frac{U}{R} \cdot W. \quad (3.7)$$

Подставив значение  $R$  из (3.2) в это уравнение, получим

$$F = \frac{U - 7r - d^2}{4 \cdot P - l_{cp}}, \quad (3.8)$$

откуда диаметр провода:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot P - l_{cp} \cdot F}{J}} \quad (3.9)$$

При шаговой намотке определим число витков катушки по приближённой формуле [60]:

$$w = 0.93 \cdot \quad (3.10)$$

По известным сопротивлению обмотки и диаметру провода можем найти высоту намотки [55]:

$$h = \frac{C_0 \cdot l_k \cdot D_{03} + J(C_0 - l_k - D_{03})^2 + 4 \cdot C_0 \cdot l_k \cdot R}{2 \cdot C_0 - 1} \cdot \frac{U}{J} \cdot \frac{1}{V} \quad (3.11)$$

Ориентировочная проверка расчёта проводится по допустимой плотности тока:

$$J = \frac{I}{S} = J \quad (3.12)$$

Для прерывистого режима, в котором работает ЭМЗУ,  $I_d = 5 \text{--} 12 \text{ А/мм}^2$ .

Для оценки экономических затрат необходимо определить массу меди обмотки:

$$M = V \cdot \gamma \cdot 10^{-3} = l \cdot l_k \cdot h_k \cdot (D+h) \cdot \gamma \cdot 10^{-3}, \quad (3.13)$$

где  $V$  - объём меди;

$\gamma = 8,9 \text{ г/см}^3$  - плотность меди;

Так как в процессе работы температура катушки при выбранных обмоточных данных не должна превышать допустимой, необходимо произвести проверку на нагрев. Вопросы теплового расчёта достаточно полно освещены в литературе [55,60,62,69]. Нагрев катушки определяется потерей мощности при протекании тока:

$$P = I^2 R. \quad (3.14)$$

Предельная допустимая температура нагрева  $v$  ограничивается теплостойкостью изоляции. В разрабатываемом устройстве предусматривается изоляция класса А с компаундировкой, которая представляет собой пропитку катушек специальным составом из нефтяных битумов, растительных масел с добавлением кварца. Она проводится при температуре около  $150^\circ\text{C}$ . При компаундировке жидкая масса битума

проникает в поры и капилляры изоляции. У таких катушек выше электрическая прочность и теплопроводность, больше механическая прочность и влагостойкость. В напольных условиях сортировочной горки эти факторы являются очень важными. При таком типе изоляции температура нагрева принимается равной  $120^{\circ}\text{C}$ , а превышение температуры  $v$  достигает  $85^{\circ}\text{C}$ . Характер процесса нагрева катушек зависит также от теплоотдачи, которая представляется тремя видами: теплопроводностью, лучеиспусканием и конвекцией. Обычно, для упрощения рассматривается суммарный эффект. Тогда теплоотдачу можно определить по формуле:

$$T = \rho \cdot S \cdot v, \quad (3.15)$$

где  $\rho$  - коэффициент теплоотдачи, представляющий собой количество тепла, отдаваемое с  $1\text{cm}^2$  поверхности в  $1\text{c}$  при разности температур между поверхностью и окружающей средой в  $1^{\circ}\text{C}$ ;

$S$  - площадь поверхности охлаждения;

$v = t - t_0$  - превышение температуры, как разность между температурой обмотки и температурой окружающей среды. Учитывая наихудшие условия  $t_0$  принимают равной  $35^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент  $\rho$  определяется по опытным данным в зависимости от  $v$ , степени изоляции внутренней поверхности от стали и от отделки катушки. Так при компаундировке  $\rho$  повышается на 7-8%. В нашем случае можем принять  $\rho = 14 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

Поверхность охлаждения определим из выражения:

$$S=2-l_{cp}-l_k 10^{-2}. \quad (3.16)$$

Множитель  $10^2$  употреблён, так как средняя длина витка  $l_{cp}$  и длина намотки  $l_k$  находятся в мм.

Для ориентировочного расчёта воспользуемся экспериментальными данными, считая, что на 1Вт потребляемой мощности необходима удельная площадь охлаждения  $st=(8-14) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{Вт}$ . Отсюда максимально допустимая мощность:

$$P_d = S/Q. \quad (3.17)$$

Разработанная конструкция и параметры обмотки возбуждения позволяют перейти к установлению основных эксплуатационных характеристик ЭМЗУ.

### 3.2. Исследование эксплуатационных характеристик замедлителя-ускорителя

ЭМЗУ, как и любое другое электромагнитное устройство постоянного тока, уместно оценивать по следующим основным эксплуатационным характеристикам [60,66]:

1) Электромеханическая или тяговая характеристика:

$$M=fi(/) \text{ при } I=\text{const}. \quad (3.18)$$

Представляет собой зависимость тягового момента электромагнита от положения колес при неизменном токе обмотки.

2) Нагрузочная:

$$M=f_2(I) \text{ для } \omega=\text{const.} \quad (3.19)$$

Это зависимость тягового момента от величины тока запитки электромагнита при различных положениях колеса.

3) Время срабатывания:

$$t=f_3(L, R). \quad (3.20)$$

Время срабатывания определяет инерционность электромагнитов и учитывается при выборе параметров катушек.

4) Энергетическая мощность:

$$h = \frac{V^2 - V_0^2}{2g'} - HL \quad (3.21)$$

где  $V_H$  и  $V_K$  - скорость движения вагона соответственно до и после взаимодействия с ЭМЗУ.

### 3.2.1 Тяговая и нагрузочная характеристики звена ЭМЗУ

Важнейшей характеристикой замедлителя-ускорителя является тяговая. Как видно из формулы (2.65), при определении тягового момента ЭМ наибольший интерес представляет закон изменения площади воздушного промежутка меж-

ду торцом ЭМ и ободом колеса в зависимости от расположения последнего относительно осевой линии полюса.

Поскольку колесо осуществляет поступательно-вращательное движение, то площади  $S$  взаимодействия полюса и колеса имеют сложную конфигурацию. Дифференцирование площади по расстоянию возможно провести графически [75], что снижает точность и довольно трудоемко. Так как получить аналитическое выражение зависимости  $S$  от местоположения колеса затруднительно, то исходные данные получаем графически:

-для колёс с максимальным и минимальным радиусами при различных положениях колеса относительно вертикальной осевой линии ЭМ определяем площади фигур перекрытия полюса и колеса, разбивая их на прямоугольники и треугольники (рис.3.4).

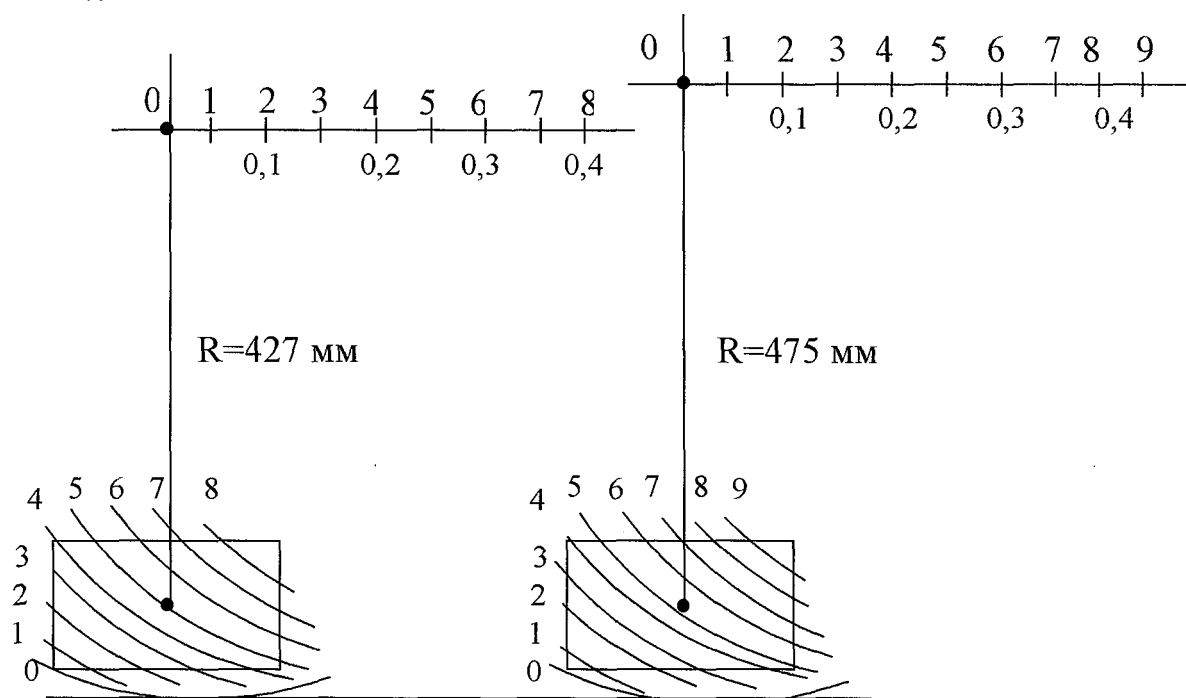


Рис.3.4. Графическое определение площадей воздушного промежутка между колесом и полюсом ЭМ

Результаты расчетов представлены на рисунке 3.5.

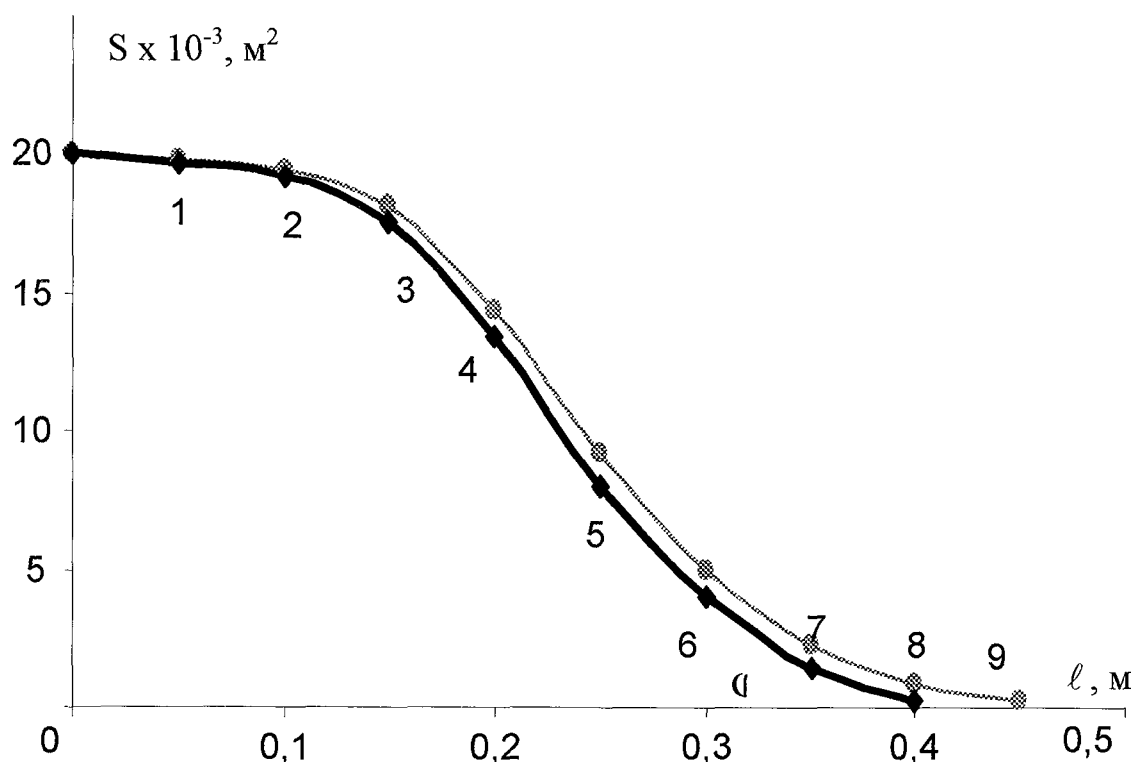


Рис.3.5. Зависимость площадей воздушного промежутка от положения колеса относительно полюса ЭМ

Используя прикладную программу MathCAD, находим тяговый момент  $M_t$  (2.65) при максимальном и минимальном воздушном зазоре. Результаты вычислений по приведенной методике отражены на рисунке 3.6.

Электромагнитный момент в зависимости от расположения колеса относительно полюса ЭМ имеет колоколообразную форму с максимумом на расстоянии  $l = 0,25 \text{ м}$ .

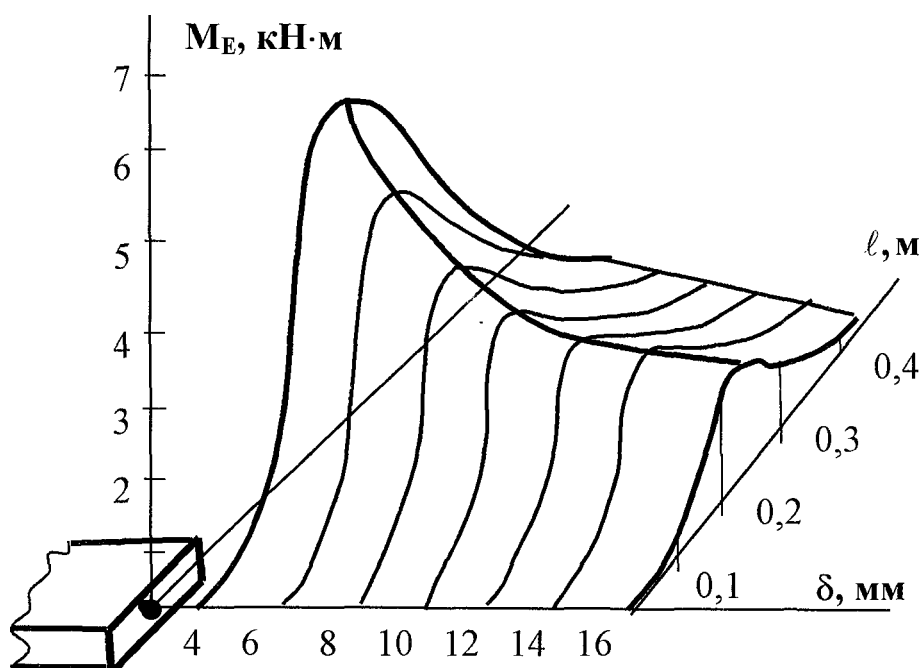


Рис.3.6. Тяговая характеристика  
одного звена ЭМЗУ

В зависимости от величины воздушного промежутка максимальное значение момента находится в пределах 2,0-6,0кН·м.

Нагрузочная характеристика определяет максимальные тяговые возможности ЭМЗУ. Очевидно, что нагрузочная характеристика будет иметь вид кривой намагничивания материала сердечника, по которой и можно определить номинальное значение тока запитки (рис 3.7). Увеличение тока выше установленного значения приводит к насыщению магнитной системы и увеличению потерь энергии.

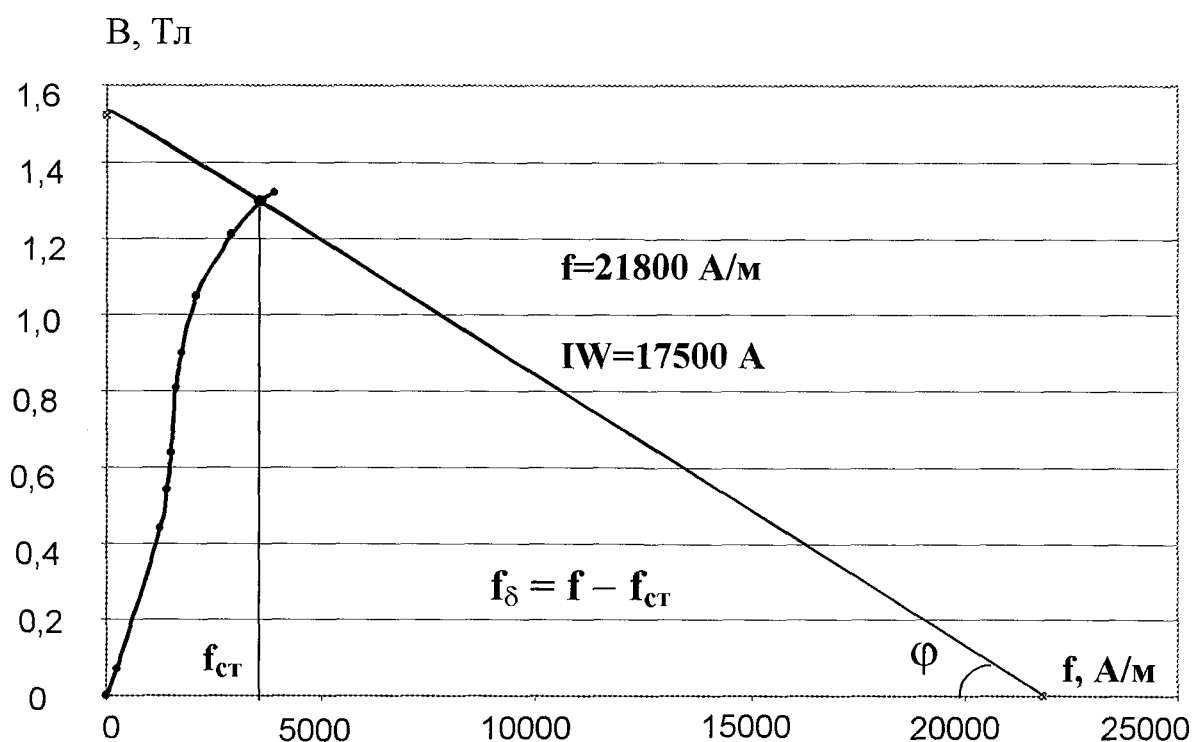


Рис.3.7. Определение МДС и токов запитки обмотки возбуждения тягового звена ЭМЗУ

Значения токов для лучших (максимальные радиус и толщина обода колеса) и худших условий (минимальные радиус и толщина обода) получаем из расчёта магнитной цепи по методике, рассмотренной во второй главе настоящей работы.

Важное значение для обеспечения точности регулирования скорости отцепов с помощью ЭМЗУ имеет время включения, которое влияет на инерционность устройства.

### 3.2.2. Время включения тяговых звеньев ЭМЗУ

Включение и отключение электромагнитных механизмов сопровождается переходными процессами, которые опреде-

ляют временные параметры и быстродействие устройств. Тяговый электромагнит можно представить электрической схемой с последовательным соединением индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R$ . При включении переходный процесс описывается уравнением [76]:

$$U = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (3.22)$$

Решение этого уравнения относительно тока имеет вид:

$$i = I_{\infty} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.23)$$

где  $I_{\infty}$  - установившееся значение тока;

$\tau = L/R$  - постоянная времени.

Величина МДС рассчитывалась с учётом установившегося тока. Необходимо знать время  $t$ , за которое ток достигает этого значения. Известно, что  $t = 3\tau$ , поэтому задача состоит в определении постоянной времени. Активное сопротивление катушки  $R$  рассчитано выше. Для определения индуктивности  $L$  рассмотрим половину тягового ЭМ и воспользуемся известным соотношением [77]:

$$L_i = \frac{\Phi}{i} = wO, \quad (3.24)$$

где  $\Phi$  - поток, сцепляющийся с витками обмотки.

При распределённой МДС, что имеет место в данном устройстве, потоки рассеяния сцеплены только с частью вит-

ков обмотки, а рабочий поток в воздушном зазоре сцепляется со всеми витками  $\Psi = \Phi \xi w$ .

Суммарное потокоцепление будет  $\Psi = \Psi'z + \Psi'y$ .

Согласно исследований [55,56], с учётом того, что

$\Phi_{\delta}$   
 $0 = \frac{\Phi_{\delta}}{G_{\delta}}$  потокоцепление рассеяния будет:

$$k/\nu = \Phi \xi \cdot \frac{g_y \cdot l_p}{y^6 \cdot 3 \cdot G_{\delta}} \quad (3.25)$$

Тогда суммарное потокоцепление:

$$\Psi = \Phi_{\delta} w \cdot \left( 1 + \frac{g_y \cdot l_p}{3 \cdot G_{\delta}} \right) \quad (3.26)$$

Так как средний магнитный поток с учетом рассеяния равен

$$\Phi_{cp} = \Phi_{\delta} \cdot \left( 1 + \frac{g_y}{3 \cdot G_{\delta}} \right) \text{ то } \Psi = \Phi_{cp} \cdot w, \text{ откуда:}$$

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\Phi_{cp} \cdot w}{I} = w \cdot G_{\delta} \cdot \left( 1 + \frac{g_y \cdot l_p}{3 \cdot G_{\delta}} \right) \quad (3.27)$$

Зная L и R определяем время срабатывания тягового ЭМ.

При разработке устройства приходится решать две противоположные задачи. Во-первых, добиваться большей индуктивности для увеличения рабочего магнитного потока, а

значит и тяговой силы. Во-вторых, при установленном значении активного сопротивления обмотки и индуктивности необходимо уменьшить время срабатывания. В связи с этим требуется специальная схема подключения катушек тягового звена, когда:

1) Катушки одного электромагнита включаются между собой параллельно согласно. Это позволяет уменьшить постоянную времени  $\tau$ , так как ток в катушке получаем при повышенном напряжении.

2) Последовательно с катушками подключаются добавочные сопротивления  $K_{доб}$ . В этом случае постоянная времени определяется

$$\tau = \frac{L}{R + K_{доб}} \quad (3.28)$$

И подбором  $K_{доб}$  можно добиваться необходимых временных параметров.

Так как индуктивности обмоток достигают достаточно больших значений, то необходимо учитывать также переходные процессы при отключении ЭМ от источника [78]. Резкое снижение тока в катушке приводит к возникновению ЭДС самоиндукции. Величина этой ЭДС достигает значений, в десятки раз превышающих напряжение питающей сети. Это приводит к повреждению изоляции обмотки, выходу из строя коммутирующей аппаратуры. Реально, при размыкании, возникает дуговой разряд и уравнение переходного процесса выглядит так:

где  $R_d$  - сопротивление дуги.

Решение относительно тока имеет вид:

$$\left( \frac{U}{R} \quad U \quad e^{-t/\tau} \quad \frac{U}{R + R_A} \right) \quad (3.30)$$

Таким образом, отключение катушек должно осуществляться через шунтирующее сопротивление  $R_{ш}$ . С учётом проведенного анализа предложена электрическая схема включения обмотки тягового ЭМ (рис. 3.8).

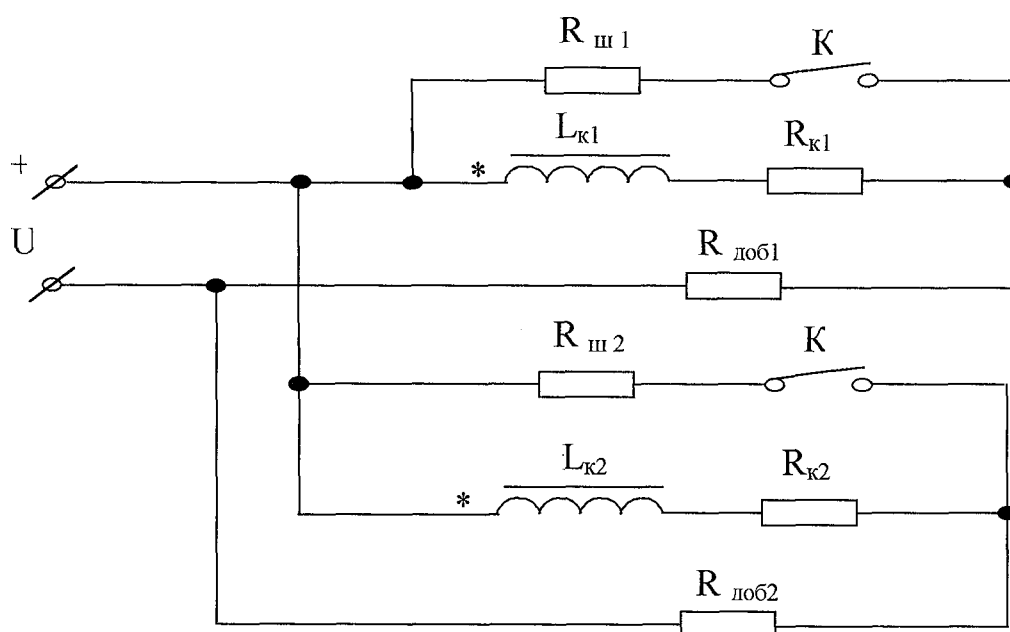


Рис.3.8. Электрическая схема включения обмоток возбуждения ЭМ

### 3.3. Экспериментальные исследования тяговой и нагрузочной характеристик лабораторного образца замедлителя-ускорителя

Для проверки вышеизложенных теоретических исследований и установления формы тяговой и нагрузочной характеристик были проведены испытания лабораторного образца электромагнитного замедлителя-ускорителя, состоящего из двух тяговых звеньев. Сечения полюсов магнитопроводов 20x40мм. Обмотки возбуждения выполнены медным проводом диаметром 1,5мм и содержат по 500 витков. Макет колесной пары имеет следующие размеры: радиус колес  $R=100\text{мм}$ , высота обода -15мм, высота гребня-5мм. Длина сердечников ЭМ выбрана так, что суммарный воздушный зазор между полюсами ЭМ и внутренней поверхностью колес составлял 2мм.

Для передвижения колесной пары усилие прикладывалось по краям оси колесной пары через динамометр. Пройденное расстояние замерялось линейкой. Показание динамометра представляет значение тягового момента  $M_{\text{ЭМ}}$ .

Были проведены следующие опыты, результаты которых представлены на рисунках приложения Б.

#### 1. Исследование нагрузочной характеристики.

Обмотка тягового ЭМ запитывалась токами 4, 6 и 8А. Было установлено расстояние  $l_{\text{max}}=6\text{см}$  колеса от осевой линии полюса ЭМ, когда момент максимальный. В этом положении в обмотку подавался ток запитки от 1 до 10А. Установлено, что зависимость  $M_{\text{ЭМ}}=\Gamma I(1_{0\text{ЭМ}})$  (рис.Б.1) имеет вид

кривой намагничивания материала сердечника. Сначала момент возрастает почти линейно, а после достижения максимального значения увеличение тока не приводит к изменению момента. Значит имеет место номинальный ток питания ЭМ. Для макета  $I_n = 8\text{А}$ . Для реального устройства он устанавливается опытным путем при стендовом испытании ЭМЗУ.

## 2. Исследование тяговой характеристики одного звена.

При запитке одного тягового ЭМ током  $I = 8\text{А}$  получена зависимость  $M_{\text{ЗМ}} = f(I)$  (рис.Б.2а). Анализ кривой позволяет сделать следующие выводы:

- при  $I = 0$  показание динамометра равно  $5\text{Н}$ , и это есть сила сцепления веса колесной пары с рельсами;

- расстояние, на котором происходит воздействие ЭМ на колесную пару, равно  $12\text{см}$ , что в  $1,5$  раза превышает шаг расположения соседних ЭМ. При запитке обмоток токами  $6$  и  $4\text{А}$  расстояние воздействия уменьшается соответственно до  $10$  и  $9\text{см}$  (рис.Б.2 б,в);

- снижение тягового усилия начинается, когда окружность гребня колеса выходит за центр магнитных масс полюса ЭМ, поэтому в расчетах необходимо учитывать высоту реборды;

- уменьшение радиуса до минимального  $R = 427\text{мм}$  приводит к уменьшению расстояния воздействия до  $10\text{см}$  (рис.Б.2б).

## 3. Исследование тяговой характеристики двухзвенного ЭМЗУ.

Обмотки соседних звеньев включались параллельно встречно и запитывались током 4А каждая. Сначала включался в работу первый ЭМ, а по достижении колесом осевой линии полюса и второй ЭМ. В результате получена экспериментальная кривая, приведенная на рисунке Б.3. Анализ показал, что эту зависимость можно получить графическим сложением тяговых характеристик отдельных звеньев. Таким образом, ряд включенных тяговых звеньев ЭМЗУ могут обеспечивать стабильную тяговую характеристику.

Элементарным звеном электромагнитного замедлителя-ускорителя является тяговый электромагнит. Для оценки работоспособности ЭМЗУ необходимо определить энергетическую мощность его элементарного звена.

### 3.4. Энергетическая эффективность тягового электромагнита замедлителя-ускорителя

Как известно [79,80,81], эффективность работы устройств регулирования скорости на сортировочных горках принято оценивать тормозной мощностью  $h_m$ , т.е. некоторой энергетической высотой:

Определим изменение скорости расчётного вагона (вес вагона  $G=85T$ ,  $g'=9,6 \text{ м/с}^2$ ) от воздействия на него одного тягового ЭМ. При движении по уклону горки колесо осуществ-

ляет плоское движение, которое описывается системой дифференциальных уравнений (2.7).

Движение колеса происходит по оси  $x$  (рис.3.9) и на него действуют силы: сила тяжести  $G$ , реакции рельса  $N$ , сила трения качения  $F_k$ , тяговая сила электромагнита  $F_T$ .

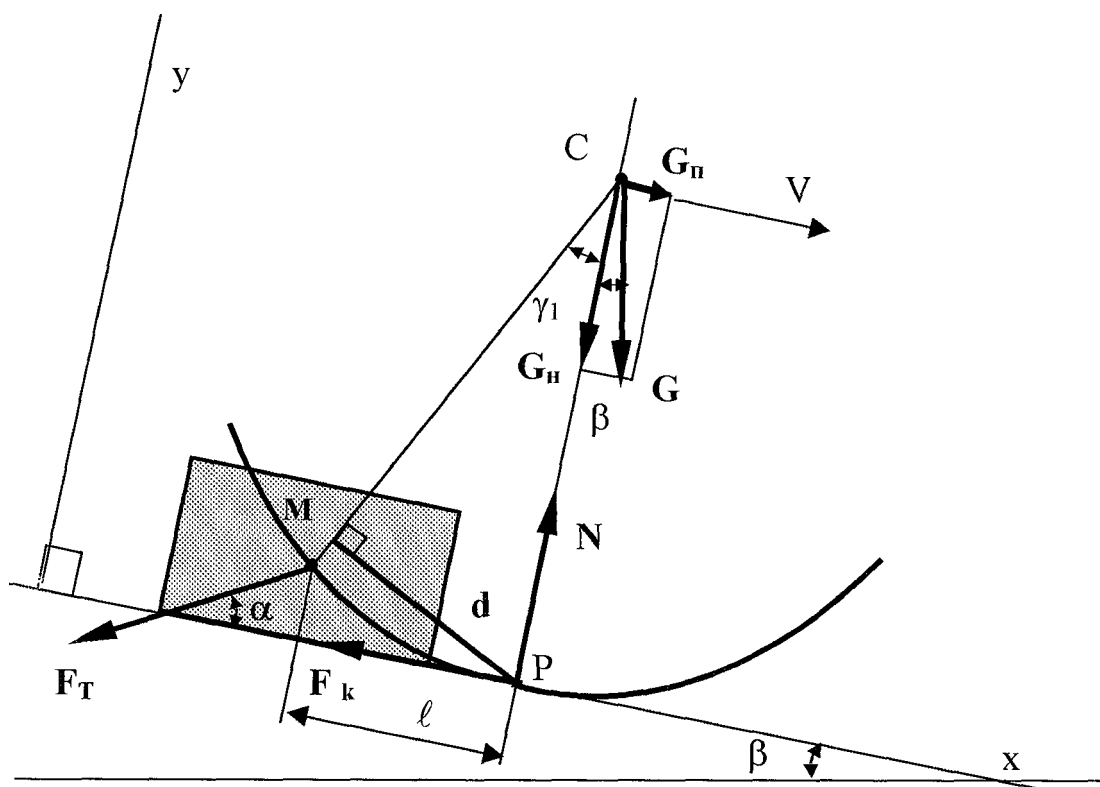


Рис.3.9. Распределение сил при движении колеса по уклону горки

Так как за время движения по горке координата  $y_c$  не изменяется (радиус колеса постоянный и  $y_c=R=\text{const}$ ), то  $d^2y/dt^2=0$ . Тогда второе уравнение системы (2.7) имеет вид:

$$0 = N - G \cdot \cos P - F_T \blacksquare \quad (3.32)$$

где  $G \cdot \cos \alpha$  и  $F_T \cdot \sin \alpha$  — проекции соответственно силы тяжести колеса и тяговой силы ЭМ на ось  $y$ .

Силу трения качения можем определить из выражения [46]:

$$F = \frac{M_k}{R_{cp}} \cdot k \quad (3.33)$$

где  $M_k$  - момент качения колеса;

$R_{cp}$  - средний радиус окружности катания колеса;

$k$  - коэффициент трения качения;

$k$

— - коэффициент сопротивления трения.

$R_{cp}$

С учетом (3.32), получаем:

$$(G \cdot \cos \alpha + F_T \cdot \sin \alpha) \cdot k \cdot R_{cp} \quad (3.34)$$

Чтобы воздействие электромагнита оказывало минимальное влияние на время пробега вагона, то его выгодно осуществлять большой силой на коротком протяжении [5], другими словами короткими импульсами.

Воспользуемся теоремой об изменении количества движения [46,47], согласно которой изменение количества движения системы за промежуток времени равно геометрической сумме импульсов внешних сил, приложенных к системе за тот же промежуток:

$$K_K - K_H = ES_{i5} \quad (3.35)$$

где  $K_H$  и  $K_K$ —векторы количества движения колеса вагона соответственно до и после взаимодействия с электромагнитом.

В этом случае мерой механического движения является вектор количества движения:

$$K = M \cdot V_C, \quad (3.36)$$

где  $V_C$ —линейная скорость центра масс колеса.

Мерой действия силы выступает вектор импульса силы:

$$S = P \cdot t \quad (3.37)$$

где  $P$  - сила, действующая на колесо,  
 $t$  - время действия силы.

Составим уравнение (3.35) в проекции на ось  $x$  :

$$M \cdot V_K - M V_H = (G \cdot \sin p - F_K - F_T - \cos a) \cdot t, \quad (3.38)$$

где  $G \cdot \sin p$  - движущая сила.

Принимая  $\sin p = i \cdot 10^{-3}$  ‰, где  $i$  - уклон профиля горки и, учитывая удельные силы сопротивления движению  $W$ , представим движущую силу в виде:

$$G \cdot \sin p = G \cdot (i - w) \cdot 10^3, \quad (3.39)$$

Время действия импульса силы определяется из выражения:

$$t = A/V_T, \quad (3.40)$$

где  $\Delta l = l_2 - l_1 \sim$  зона эффективного воздействия тягового электромагнита на колесо;

$V_T$  - текущая скорость движения колеса в момент взаимодействия с электромагнитом.

Зона эффективного воздействия  $\Delta l$  определяется как разность  $l_2$  (расстояние по окружности катания колеса от вертикальной осевой линии торца сердечника до момента, когда окружность реборды колеса выходит за центр магнитных масс  $M$  полюса ЭМ) и ( $l_1$  (когда центр магнитных масс  $M$  находится на окружности обода колеса) (рис.3.10).

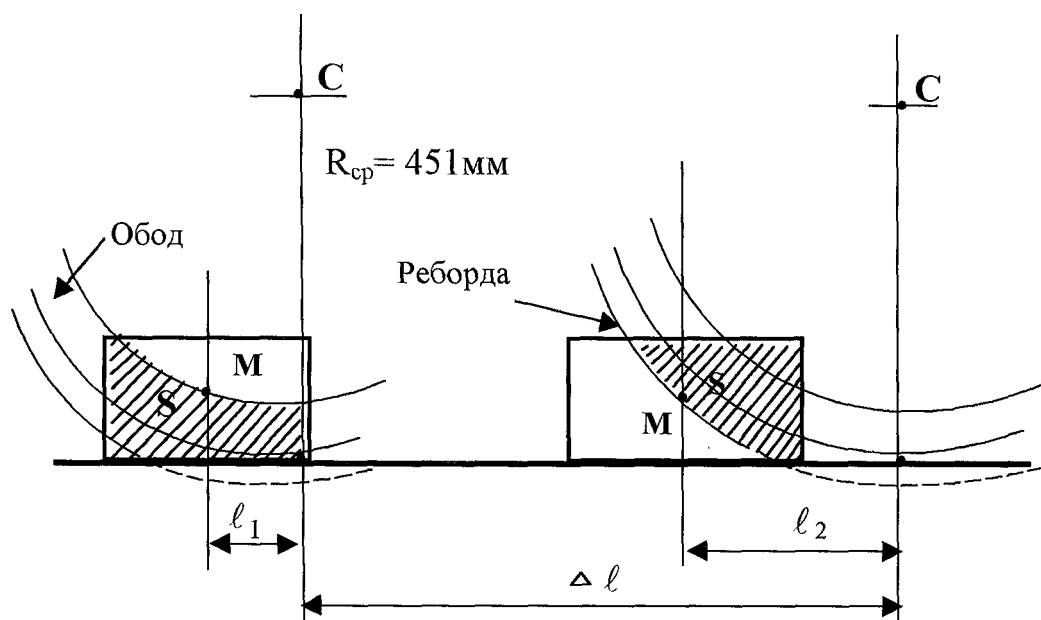


Рис.3.9. Определение зоны эффективного воздействия тягового электромагнита на колесо

Для колеса среднего радиуса  $R_{cp} = 451\text{мм}$   $D$  составляет 100мм. С учётом выражений (3.34), (3.39), (3.40), запишем формулу для определения изменения скорости  $\Delta V$  вагона после взаимодействия с одним тяговым ЭМ, работающего на замедление:

$$\Delta U = 8 \frac{D_1}{U_T M} G \cdot (i-w) \cdot 10^3 \left( \frac{(G \cdot \cos B + F_T \cdot \sin a) \cdot k}{R_{cp}} F_T \cdot \cos a \right) \quad (3.41)$$

Выражение умножается на коэффициент пропорциональности 8, так как все действующие силы взяты по отношению к одному колесу. Например, если тяговая сила  $F_T$  ЭМ для  $R_{cp}$  и воздушного зазора  $\delta = 10\text{мм}$  составляет 1,2т, то после торможения одним ЭМ четырёхосного вагона весом 85т (основное удельное сопротивление  $w = 1,5\%$ ) при скорости входа 2 м/с на парковом пути с уклоном 2,5‰ скорость на выходе составляет 1,4м/с. Согласно формулы (3.31) мощность одного тягового ЭМ достигает 0,12 м.э.в. При ускорении в формуле (3.41) перед последней составляющей ставится знак "+" и энергетическая мощность звена достигает 0,15м.э.в. за счет движущей силы вагона.

Выражение (3.41) также показывает, что при однократном несрабатывании тягового ЭМ погрешность скорости выхода не превысит 0,2м/с, что удовлетворяет ЭТТ. Но на реализацию скорости влияют и другие факторы, которые будут проанализированы в четвертом разделе.

### Выводы по разделу 3

1 .Синтезировано тяговое звено ЭМЗУ и определены его конструкционные размеры. С учетом допустимых параметров колесных пар и габарита приближения строений, общая длина сердечника, согнутого под углом около  $140^\circ$ , составляет 1435мм, сечение полюса - 100x200мм, высота превышения центра магнитных масс полюса над УГР - 50мм. Воздушный зазор между торцевой поверхностью магнитопровода и колесом может находиться в пределах 4-16мм. Для обеспечения замедления-ускорения тяговые звенья ЭМЗУ устанавливаются с интервалом 400мм в расчете на минимальный радиус колеса.

2 .Установлена максимально возможная длина катушек ЭМ - 500мм. Методика расчета обмоточных данных направлена на экономию цветного металла и обеспечение теплового режима. С учетом тяжелых условий работы напольных устройств на путях сортировочной горки принята специальная изоляция обмоток.

3 .Исследована тяговая характеристика замедлителя-ускорителя. Для упрощения расчетов исходные данные получены графически, а расчет проведен на ЭВМ с использованием прикладной программы МаhtCAD. Тяговый момент имеет колоколообразный вид и достигает максимума, когда колесо находится на расстоянии 0,25м от осевой линии полюса ЭМ. В зависимости от величины воздушного зазора между полю-

сом сердечника и колесом, момент  $M_3$  находится в пределах 2,0-6,5кН-м.

4 .Нагрузочная характеристика позволяет определить необходимые величины токов запитки обмотки ЭМ для получения максимального тягового момента. Определено, что при средних значениях воздушного зазора и радиуса колеса расчетный тяговый момент обеспечивается намагничивающей силой около 35кА.

5 .Результаты испытаний лабораторного образца ЭМЗУ показали совпадение форм расчетной и экспериментальной тяговой характеристики, что подтверждает справедливость полученной математической модели. Последовательным включением звеньев ЭМЗУ можно обеспечить стабильную тяговую характеристику. Нагрузочная характеристика совпадает по форме с кривой намагничивания материала сердечника.

6 .Определены временные параметры включения тяговых электромагнитов с учетом переходных процессов. Учитывая значительные величины индуктивностей  $L$  (порядка 1Гн каждой катушки) и небольшие (порядка 20м) активные сопротивления, предложена электрическая схема включения обмоток ЭМ, позволяющая регулировать время включения катушек и защитить коммутирующие устройства от электрической дуги.

7 .Определена энергетическая эффективность замедлителя-ускорителя, основываясь на теореме об изменении количества движения. Получено выражение для расчета изменения скорости вагона при взаимодействии с тяговым звеном. При средней тяговой силе полюса ЭМ в 1,2т для расчетного

4<sup>x</sup>-осного вагона при скорости входа 2м/с энергетическая мощность тягового электромагнита достигает 0,12м.э.в. при замедлении и 0,15м.э.в. - при ускорении, что соответствует установленным эксплуатационным требованиям

## РАЗДЕЛ 4

### СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ-УСКОРИТЕЛЯ И ЕГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

#### 4.1. Синтез электромагнитного замедлителя-ускорителя на подгорочных путях сортировочных горок

Получение необходимых показателей качества сортировочного процесса возможно только при автоматизации регулирования скорости (АРС). Наиболее сложной проблемой на сортировочных горках является автоматизация сортировочных парков. Основное назначение таких систем - обеспечить выход отцепов из тормозной позиции со скоростью, отличающейся от заданной не более чем на  $DV$ .

Техническая структура системы АРС оказывает значительное влияние на показатели качества [83]. Результаты исследований прицельного регулирования скорости для различных вариантов технического оснащения приведены в таблице В.1. Широко распространен в настоящее время способ прицельного регулирования (ПР) с помощью замедлителей, при котором скорость выхода с ПТП определяется в зависимости от требуемой дальности пробега, ходовых свойств и весовой категории отцепа, характеристики подгорочного пути. При использовании одной ПТП (по результатам измерения ходовых свойств (ИХС) на спускной части) обеспечить требуемое качество ПР практически невозможно [84,85,86]. Вероятность  $P_c$  превышения допустимой скорости соударений

и средняя длина “окон” в зоне оказывается вдвое выше нормативных значений ( $P_c < 0,1$ ;  $l_{ок} < 6\text{м/отцеп}$ ), так как оценка ходовых свойств производится косвенно, через приведенное ускорение. Добиться большей плотности заполнения путей позволяет ИХС непосредственно перед ПТП. Такой вариант успешно применяется на западноевропейских горках [87]. Главным недостатком его является значительное недоиспользование полезной длины сортировочных путей. Во многом эти показатели определены эксплуатационными характеристиками исполнительного органа системы АРС, в качестве которого на отечественных горках используются замедлители типа РНЗ.

В значительной степени решить проблему сохранности подвижного состава и грузов в сортировочных парках позволяет вариант с применением дополнительной парковой тормозной позиции (ДПТП) [88]. Но на мощных автоматизированных горках исключить промежуточные осаживания на сортировочных путях увеличением количества ДПТП невозможно. Эффективным средством является дополнение тормозных позиций точечными вагонными замедлителями [89] или цепочки замедлителей-ускорителей (УЗ) [90,91]. В настоящее время при использовании ускорителей-замедлителей применяется способ, предусматривающий вытормаживание отцепов на ПТП до скорости  $v_{доп} = 1,5\text{м/с}$ , а затем последующее подталкивание. Это позволяет упростить управление, однако, имеет ряд недостатков. Так, кинетическая энергия отцепов гасится даже тогда, когда она необходима для достижения удаленной точки на сортировочном пути; не исполь-

зуются возможности УЗ по ускорению легких вагонов. Эти недостатки устраняются при использовании УЗ в режиме замедление-ускорение, когда они выполняют функцию корректировки расчетной траектории движения, заданной в ходе прицельного торможения.

Наиболее эффективной на сегодняшний день является модель технологического процесса для систем автоматического управления движением отцепов на путях подгорочных парков предложенная д.т.н. Нагорным Е.В. [37,92]. В отличие от имеющихся моделей, квазинепрерывное регулирование скорости базируется на оснащении ЗУ зоны регулирования-участка сортировочных путей равного половине всей длины, но не менее половины максимальной длины формируемого состава. При этом скорость выхода с ПТП принимается равной 1,5м/с. Замедлители-ускорители работают в автоматическом режиме и настроены на поддержание скорости от 0,25м/с (по условию сцепления) до 1,25м/с (допустимая скорость соударения). Такой вариант позволяет:

- 1) Уменьшить вдвое число средств регулирования.
- 2) Высвободить штат по обслуживанию и содержанию.
- 3) Упростить управление системой.

После накопления состава в зоне регулирования требуется одно подтягивание, что можно отнести к недостаткам рассматриваемой модели.

Проведенное в ХарГАЗТ имитационное моделирование позволило определить технико-эксплуатационные параметры системы квазинепрерывного регулирования скорости с помощью замедлителей-ускорителей [93]:

- 2°/  
\* '00/5
- единичная мощность - 0,1м.э.в. (при уклоне пути У
  - расстояние между ПТП и первой УЗ на пути-20м;
  - расстояние между УЗ - 86м;
  - число ЗУ в зоне автоматизации 500м - 6шт.;
  - максимально-допустимая скорость движения на путях
  - 1,5м/с, (по условиям соударения);
  - минимальная скорость движения - 0,25м/с, (по условиям автосцепки).

С учетом вышеприведенного анализа рассмотрим возможность реализации ЭМЗУ в выбранной системе регулирования скорости: парковая тормозная позиция с ИХС передней и цепочка ЗУ на путях подгорочного парка. В соответствии с Правилами и нормами проектирования сортировочных устройств на Укрзализныци, мощность парковой тормозной позиции составляет 0,8-М,2м.э.в. В качестве парковых используются нажимные замедлители РНЗ с расчетной погашаемой мощностью 0,41м.э.в. На каждой ПТП необходимо устанавливать три замедлителя, при этом их строительная длина составляет около 18м. В качестве замедлителя вместо РНЗ можно использовать ЭМЗУ. Для погашения энергетической высоты в 1,2м.э.в. замедлитель-ускоритель должен состоять из 12 тяговых ЭМ. При этом ЭМ устанавливаются двумя группами по 6 тяговых звеньев. Расстояние между группами равно длине базы расчетного 4-х вагона и составляет 11м. Такое расположение ЭМЗУ связано с тем, что строительная длина 12 ЭМ составляет 5м. После прохождения ЭМЗУ первой тележкой, расстояние между осями кото-

рой 1850мм, до момента вступления второй тележки вагон будет получать ускорение, скомпенсировать которое невозможно. Таким образом, ЭМЗУ занимает участок около 18м, т.е. укладывается в те же размеры, что и РНЗ и может его заменить без особых переустройств пути. Для установки в зоне автоматизации требуется еще 6 одиночных электромагнитов, так как по энергетической мощности они соответствуют требованиям квазинепрерывного регулирования скорости.

Поскольку ЭМЗУ состоит из отдельных тяговых звеньев, которые должны включаться в точно определенное время, его управление представляет сложный технологический процесс, высокое качество которого может быть достигнуто при использовании микропроцессорной техники [94,95]. Техническая структура участка ЭМЗУ представлена на рисунке 4.1. Она включает управляющую ЭВМ, которая через устройства сопряжения с объектом (УСО) связана с напольным оборудованием, а также с другими объектами, принимает от них информацию и передаёт другим подсистемам. Измерение скорости отцепки производится радиолокационными скоростемерами РИС [96]. Подсчет количества осей, включение и отключение ЭМ производится точечными путевыми датчиками  $D_{i+1}$ , а также рельсовой цепью РЦ. Информация с пульта оператора поступает на устройство управления замедлителем-ускорителем (УУ ЗУ), обеспечивающее подачу необходимого уровня тока в обмотки ЭМ от источника питания (ИП). Поскольку уровни токов в обмотках тяговых ЭМ

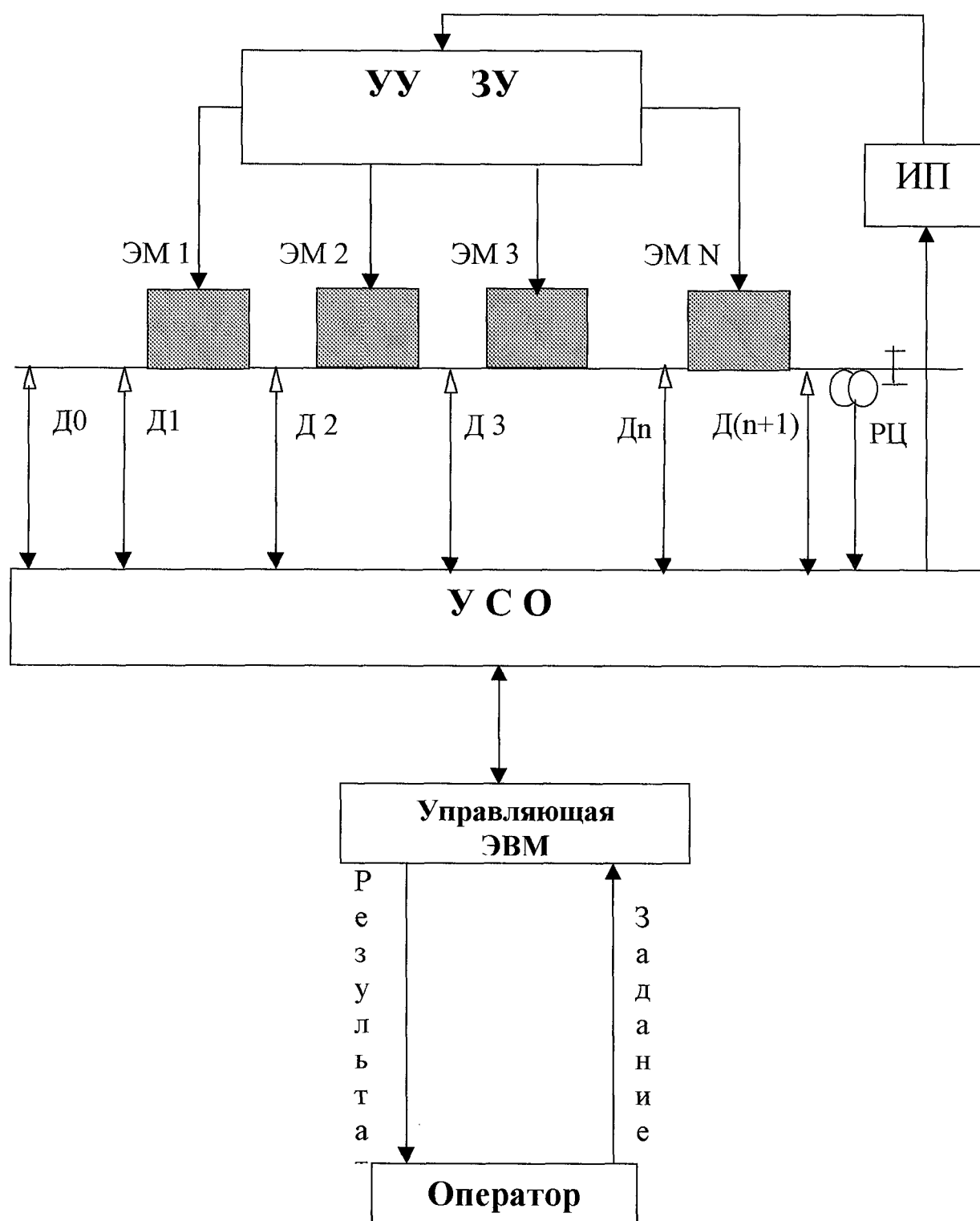


Рис.4.1. Техническая структура участка ЭМЗУ

большие, а управляющая аппаратура слаботочная, то в схеме управления необходимы силовые элементы в виде контакторов. Так как электромагниты должны срабатывать в определённые моменты времени, поэтому требуется специальная схема включения тяговых звеньев (рис.4.2). Питание от ИП на обмотки ЭМ подаётся через фронтные контакты контакторов Кп-1-Кп. Контактors включаются или датчиками Д<sub>1ч</sub>-Д<sub>м</sub> если поступила команда на торможение, или датчиками Д<sub>о-нДн</sub> -при ускорении. Чтобы питание в обмотки ЭМ подавалось на протяжении времени взаимодействия колеса и ЭМ, необходима цепь самоблокировки через собственные контакты контакторов. Выключаются ЭМ датчиками Д<sub>3н</sub>-Д<sub>(н+1)</sub> при торможении и датчиками Д<sub>2-г</sub>Д<sub>(м+1)</sub> - при ускорении. Как видно, и схема включения тяговых звеньев может вносить погрешность при регулировании скорости. Поэтому возникает необходимость проанализировать факторы, влияющие на точность реализации скорости.

#### 4.2. Реализация скорости движения отцепов на подгорочных путях с помощью замедлителя-ускорителя

Качество сортировочного процесса в значительной степени зависит от точности регулирования скорости скатывания отцепов на тормозных позициях. Особенно высокие требования к реализации скорости предъявляются на подгорочных путях. Актуальной проблемой является обеспечение сохранности вагонного парка, грузов в вагонах и выполнение подгорочных путей без “окон”. В настоящее время,

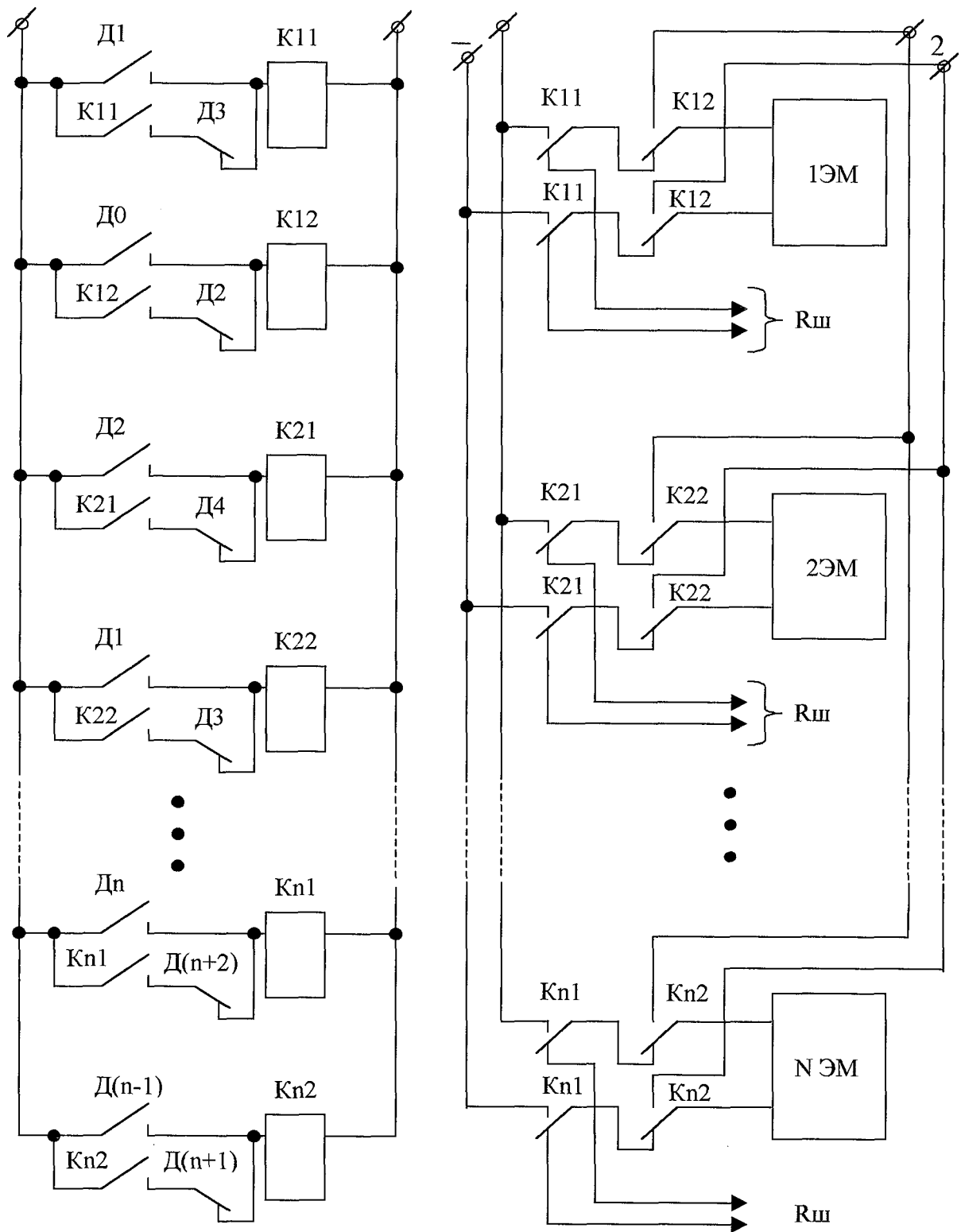


Рис.4.2. Электрическая схема включения тяговых  
электромагнитов ЭМЗУ

полнение подгорочных путей без “окон”. В настоящее время, когда основным исполнительным органом систем регулирования скорости являются инерционные механические замедлители, задача обеспечения необходимой точности реализации скорости остаётся нерешенной. Основным источником ошибок регулирования являются автоколебания, связанные с динамическими свойствами регулятора [84]. Существующие методы повышения точности регулирования скорости отцепов сводятся к введению упреждения на оттормаживание замедлителей, что является сложной задачей. Для исследования параметров, влияющих на погрешность реализации скорости разрабатываемого ЭМЗУ, рассмотрим структурную схему (рис. 4.3), отражающую взаимодействие составляющих системы регулирования скорости.

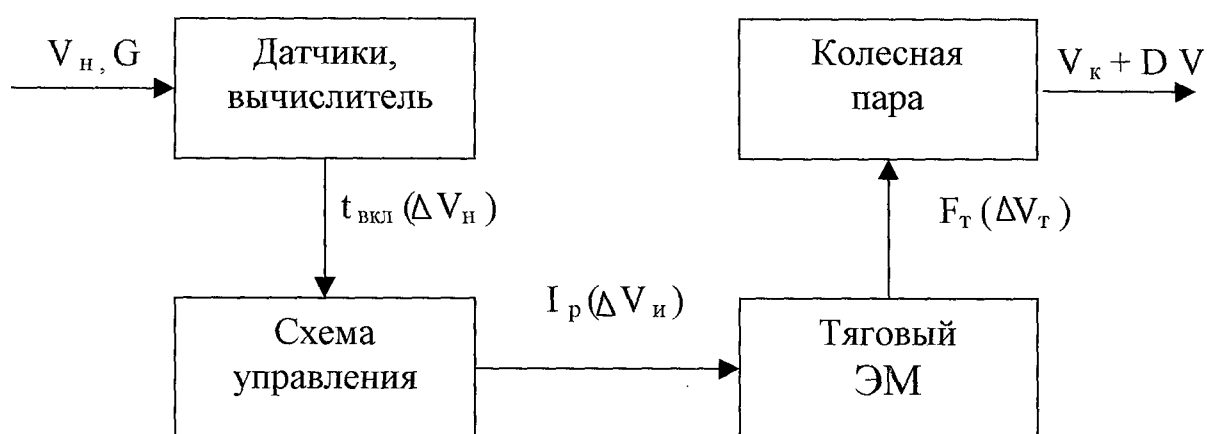


Рис.4.3. Структурная схема системы регулирования скорости

Как видно из рисунка, погрешность скорости можно представить суммой:

$$DV = AV_H + AU_{И} + AU_T, \quad (4.1)$$

где  $AV_H$  - погрешность определения начальной скорости;

$AU_{И}$  - погрешность инерционности ЭМЗУ;

$AU_T$  - погрешность при реализации тяговой силы.

В известных системах АРС предусматривается измерительный участок, на котором определяется весовая категория вагона и его скорость. Скорость отцепа должна контролироваться также перед каждой тормозной позицией. В качестве датчиков применяются, как правило, педали ПБМ-56 [97], имеющие ряд недостатков, в том числе и ограничение по скорости. Так как расстояния между тяговыми электромагнитами ЭМЗУ небольшие, то для уменьшения погрешности предлагается использовать оптические датчики с игольчатой характеристикой. Исходя из того, что шаг установки датчиков не меняется, а ЭМ должны включаться на замедление или ускорение, оптимальным расположением может быть середина шага расположения ЭМ. Во-первых, это связано с зависимостью тягового момента от местоположения колеса. Зона максимальных значений для соседних ЭМ находится между ними (рис. 4.4). При этом первый ЭМ замедляет движение, второй - ускоряет. Во-вторых, электромагниты обладают инерционностью при включении и их необходимо вклю-

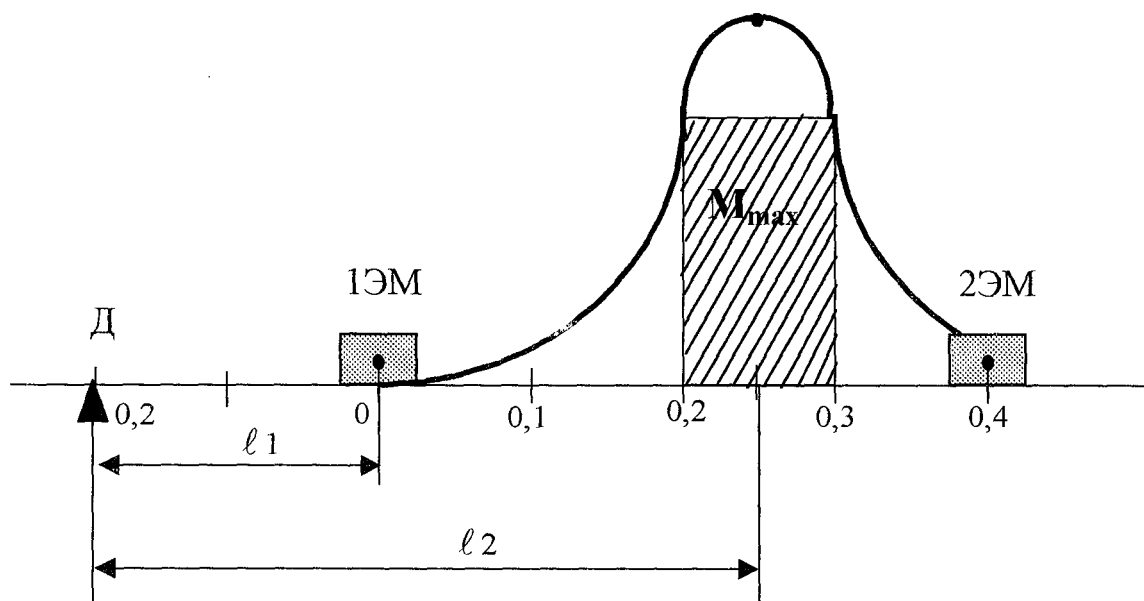


Рис.4.4. Влияние текущей скорости вагона на точность регулирования

чать с упреждением.. В-третьих, тяговые ЭМ, являясь мощными источниками магнитного поля, могут оказывать значительное влияние на работу датчиков. После включения питания ток в обмотке достигает расчетного значения по истечении времени  $t=3z$ , величина которого определена выше и может регулироваться. За это время колесо может пройти различные расстояния в зависимости от текущей скорости. Так, если время включения составит 0,2с, то колесо со скоростью 2м/с проходит расстояние  $l_1=0,4\text{м}$  от оси датчика (рис.4.4). Это позволит воздействовать на колесо импульсом необходимой длительности и изменить скорость на расчетную величину. Если скорость достигнет 2,5м/с, пройденное расстояние  $l_2$  составит 0,45м, длительность действия тяговой

силы уменьшается в два раза, соответственно погрешность изменения скорости составит 50%. Поэтому возникает необходимость настраивать время включения схемы управления в зависимости от текущей скорости. Диапазон возможных скоростей разбивается на ступени, каждой из которых соответствует добавочное сопротивление  $K_{доб}$  в схеме включения обмоток ЭМ. Чем выше скорость движения, тем больше должно быть  $Y_{доб}$ .

Как было установлено, тяговый момент пропорционален радиусу колеса  $R$  и обратно пропорционален воздушному зазору  $\delta$ . Возможные значения этих величин определены во втором разделе. Очевидно, что в существующих пределах они изменяются случайным образом. Так как воздушный зазор может принимать значения от минимального до максимального у разных полюсов ЭМ, то и тяговая сила с одной стороны будет больше, чем с другой. Это приводит к перекоосу колёсной пары и появлению дополнительных динамических сил сопротивлению движения. Таким образом, погрешность от реализации тяговой силы может быть представлена в виде:

$$\Delta V_T = \Delta V_R + \Delta V_\delta + \Delta U_D, \quad (4.2)$$

где  $\Delta V_R$  - погрешность от различного радиуса колёс;

$\Delta V_\delta$  - погрешность от различного воздушного зазора между колесом и полюсом ЭМ;

$\Delta U_D$  - погрешность дополнительных динамических сил.

Радиус колеса изменяется от 427 до 475мм, что приводит к погрешности около 15%. От радиуса колеса зависит также и площадь сечения воздушного зазора, но, как показали расчеты, отличие незначительное. Для уменьшения погрешностей  $AVR$  и  $AV\delta$  в два раза расчетные значения необходимо принимать для средних величин радиуса и воздушного зазора.

Для оценки  $AУд$  обратимся к рисунку 4.5, где показан вид сверху на колёсную пару и распределение действующих сил. За счет различного воздействия ЭМ на колёса пары возникают дополнительные силы трения  $F_{Тр1}$  и  $F_{Тр2}$  (рис. 4.6). Как было установлено в п.2.1, угол перекоса  $\phi$  составляет примерно  $4^\circ$ . Сила трения пропорциональна горизонтальной составляющей движущей силы [46, 47]:

$$F_{Тр} = f \cdot C_{Тда} \quad (4-3)$$

где  $f = 0.15$  - коэффициент трения “сталь по стали”;

$C_{Тдв} = G_{Кп} \cdot \sin\alpha$  - движущая сила колесной пары;

$G_{Кп}$  - вес колёсной пары.

С учетом тяговых сил ЭМ определим результирующую силу трения, отнесенную к середине колёсной пары:

$$F = f \cdot \left[ \frac{G_{Кп} \sin\alpha}{2} + F_{Т1} \cos\alpha \cos\gamma + \frac{G_{Кп} \sin\alpha}{2} + F_{Т2} \cos\alpha \cos\gamma \right] \quad (4.4)$$

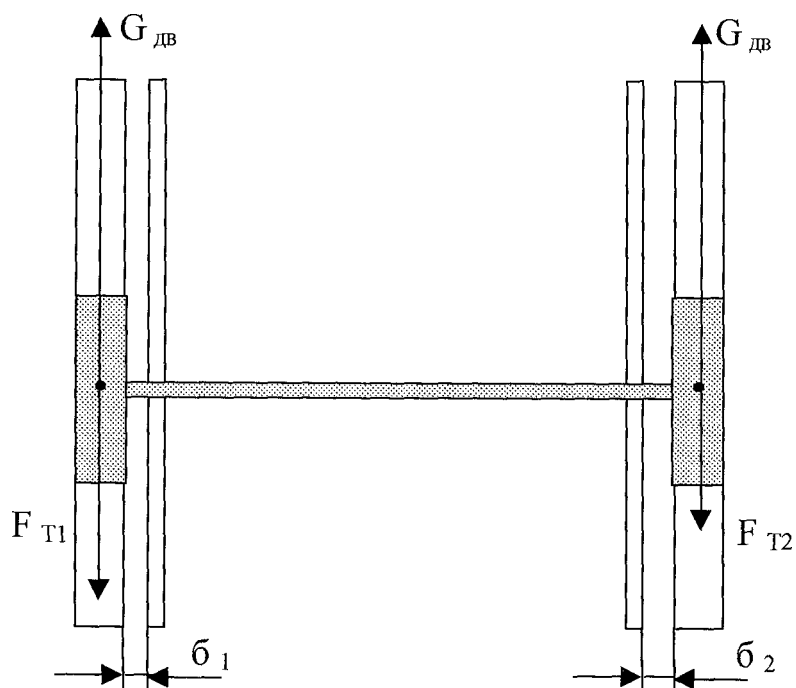


Рис.4.5. Распределение сил,  
действующих на колесную пару

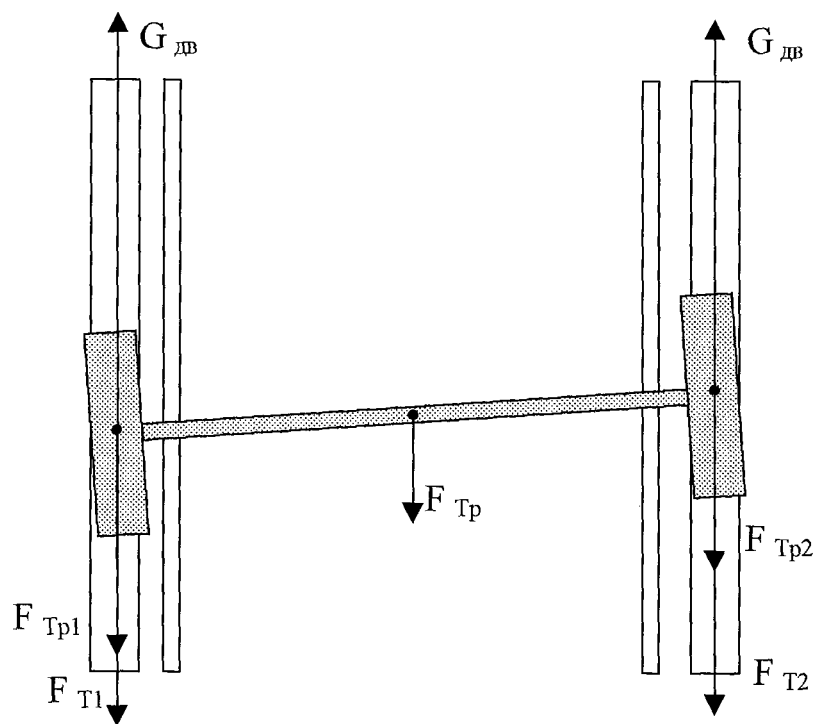


Рис.4.6. Дополнительные силы трения колесной пары

Тогда погрешность реализации скорости будет составлять разность между изменением скорости, определённым по формуле (3.41) и вычисленным с учётом перекоса колёсной пары:

$$\Delta U_{\text{д}} = \Delta U_{\text{д}} - \frac{G \cdot (i \cdot w) \cdot 10^{-3} \cdot F_{\text{T}} \cdot \cos \alpha}{M_{\text{УГ}} \cdot L_{\text{в}} \cdot r} - (G \cdot \cos \rho + F_{\text{T}} \cdot \sin \alpha) \cdot k$$

При средней тяговой силе звена 1,2т и силе трения 0,1т на каждом колесе, погрешность реализации скорости не превышает 0,2м/с, что соответствует ЭТТ. Кроме этого, для уменьшения  $\Delta U_{\text{д}}$  необходимо смазывать трущиеся поверхности, что стабилизирует тяговую характеристику ЭМЗУ. Проведенные исследования показали, что разработанное устройство соответствует установленным эксплуатационным требованиям и выгодно отличается от существующих средств регулирования скорости, что может быть выражено экономическим эффектом.

#### 4.3. Технико-экономическая эффективность электромагнитного замедлителя-ускорителя

В настоящее время, когда остро ощущается нехватка энергоресурсов, важным моментом при оценке технико-экономической эффективности нового устройства является потребление электрической энергии.

При использовании механических замедлителей основным потребителем энергии является компрессорная станция, вырабатывающая сжатый воздух для функционирования вагонных замедлителей. На сортировочных горках находят применение компрессоры: ВПЗ-20/9УХЛ4, ВП2-10/9УХЛ4, 302ВП-10/8, 305ВП-30/8, 2ВМ4-24/8, характеристики которых приведены в [98]. Приводами компрессоров используются асинхронные двигатели мощностью от 7,5 до 159 кВт. Потребление энергии на торможение превышает 80 млн. кВт·ч. Показателем использования воздуха на сортировочных горках является удельный расход электрической энергии  $\mathcal{E}_{уд}$  на погашение 1 м.э.в. тормозимых отцепов (кВт·ч/м.э.в.). Для установления основных показателей необходимо знать общий расход в кВт·ч на торможение одного вагона:

$$\mathcal{E}_{\text{ваг}} = N \quad (4.6)$$

где  $5LQ_T$  - общий расход электроэнергии на горке в течение суток, кВт·ч;

$N$  - суточная переработка вагонов;

Удельный расход энергии

$$\alpha = \quad (4.7)$$

где  $H$  - средняя энергетическая высота отцепов, погашаемая на горке, м.э.в.

Статистические данные для горок с механическими замедлителями показали, что средний расход энергии на один тормозимый вагон составляет 0,43кВт-ч летом и 0,56кВт-ч зимой. Этому показателю соответствует удельный расход энергии: 0,16кВт-ч/м.э.в. летом и 0,22кВт-ч/м.э.в. зимой. ЭМЗУ, состоящий из 12 тяговых звеньев, потребляет около 120кВт мощности при полном токе подмагничивания 100А и напряжении ИОВ. Расход электроэнергии достигает 0,4кВт-ч на полное торможение одного вагона. При средней погашаемой устройством энергетической высоте 1,2м.э.в удельная величина энергии составит: 0,33кВт-ч/м.э.в, что сравнимо с механическими устройствами. При этом не учитывалась возможность повторного использования энергии при отключении тяговых электромагнитов, когда на выводах обмоток возбуждения наводятся значительные напряжения.

Важным фактором, выгодно отличающим электромагнитный замедлитель-ускоритель от применяемых механических замедлителей, является система технического обслуживания, которая предназначена для обеспечения надежности функционирования техники в процессе эксплуатации. Надежность определяется четырьмя составляющими: безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью.

Среднее время восстановления существующих замедлителей находится в пределах 42з-75мин. Соответственно этого необходимо выделять технологические “окна”, а значит уменьшать перерабатывающую способность горки.

В настоящее время на горках наиболее перспективным является агрегатный способ технического обслуживания и ремонта, сущность которого сводится к замене неисправных узлов новыми, заранее подготовленными [99]. Работы по текущему ремонту, технической подготовке замедлителей выполняют на механизированных площадках. Для сравнения трудоемкости обслуживания и ремонта рассмотрим операции, проводимые в зависимости от типа замедлителя.

При подготовке к установке в путь:

КНП-5-73 .-разборка, промывка, смазка сборка тормозных цилиндров, установка тормозных секций по шаблону; раскладка и проверка промежуточных брусьев смазка всех трущихся деталей; раскладка тормозных балок; установка и крепление тормозных шин; установка и крепление тормозных и подъемных цилиндров; монтаж воздухопроводной сети на замедлителе и подключение воздухопровода к цилиндрам; опробование замедлителя и предварительная регулировка раствора и высоты тормозных шин;

ЭМЗУ-осмотр, установка катушек на магнитопровод; закрепление электромагнитов защелками в контррельсе.

Для балочных замедлителей полный назначенный ресурс установлен 8 лет с двумя капитальными ремонтами. Стоимость капитального ремонта составляет 40-60% их первоначальной стоимости.

При наличии производственной базы может выполняться текущий ремонт со снятием замедлителя. При этом для РНЗ-2 производится [100]: очистка, обдувка и осмотр; разборка цилиндров; шлифовка задиров; замена манжет; замена шин и

прокладок; закрепление опор; замена изношенных втулок и осей рычагов; регулировка поперечных тяг; проверка клапана-ускорителя и ЭПК; замена повреждённых шлангов воздухопроводных сетей; смазка и окраска замедлителя; опробование и регулировка раствора шин.

Основной частью ЭМЗУ являются катушки, расположенные в закрытых корпусах и залитых герметично компаундом. Обслуживание и капитальный ремонт заключаются в следующем:

замена катушек или полностью электромагнита;

замена контррельса и крепежных болтов;

замена защелок.

После таких замен ЭМЗУ полностью восстанавливается. Замену могут производить два человека с помощью крана в течение одного рабочего дня. Поэтому таблицу из литературы [99] о расчетных трудозатратах, можно дополнить данными по ЭМЗУ (табл.4.1).

Таблица 4.1

Трудовые затраты на обслуживание и текущий ремонт средств регулирования скорости

Трудозатраты, чел. дни,	КНП-5-73	РНЗ-2	ЭМЗУ
Сборка и регулировка	25	6	2
Разборка и погрузка	12	3	1
Текущий ремонт	24	10	3

Немаловажным фактором при сравнении механических замедлителей и ЭМЗУ может быть также уровень шума, ко-

торый заметно влияет на обслуживающий персонал. Уровень шумов гидравлических и пневматических замедлителей превышает санитарные нормы в диапазоне высоких частот на 20-30дБ. Для снижения шума монтируются глушители. Разработка, оборудование и содержание глушителей шума требует дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат. У предлагаемого устройства этот недостаток сведен к минимуму.

Выгодно отличается ЭМЗУ от действующих устройств и по металлоемкости. Масса одного тягового электромагнита составляет 300кг, из них 50кг-масса меди катушек. Для сравнения удельных масс, т.е. массы металла на один метр погашаемой энергетической высоты, сведем эти данные в таблицу 4.2 [99].

Таблица 4.2

Показатели металлоёмкости средств  
регулирования скорости

Показатель	Численное значение показателей				
	КНП-5	ВЗПГ		РНЗ-2	ЭМЗУ
		5-зв	3-зв		12 ЭМ
Масса без рельсов и шпал, брусьев, т	34,8	23	13	6,5	3,6
Удельная масса, т/м.э.в.	29	17,7	14,4	18,6	3,0

Как видно из таблицы, ЭМЗУ из 12ЭМ для парковой позиции, в 1,5 раза легче, чем применяемые РНЗ-2, а по удельной массе отличается в 5 раз. Самой затратной частью в реализации ЭМЗУ является применение медных обмоточных проводов и кабельных сетей, так как для питания одного

электромагнита необходимо два провода сечением не менее  $10\text{мм}^2$ . Но расходы на кабельные сети соизмеримы с затратами на сооружение и содержание воздухопроводных сетей.

Результаты исследований, полученные в диссертационной работе, использованы при изготовлении экспериментального образца ЭМЗУ на ст. Харьков-Сортировочный Южной железной дороги. Для разработки технической документации по оснащению сортировочной горки предложенным ЭМЗУ материалы работы переданы в проектную организацию «Институт Харьковский Протранспроект» (Приложение Д).

Экономический эффект нового устройства за срок его службы можно рассчитать по формуле [101,102]:

$$B_{г..} \frac{P_1 + E_H + I; - I'_2 - E_H(K'_2 - K;)}{1 + B_1 P_2 + E_H P_2 + E_H}$$

где  $31,3г$  - приведенные затраты на производство единицы базовой и новой техники;

$81, B_2$  - годовые объемы продукции, производимой при использовании единицы базовых и новых средств труда;

$P_1, p_2$  - нормы ежегодных отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление базовых и новых средств, определенных как величины, обратные срокам службы;

$$P_1 + E$$

----- - коэффициент изменения срока службы нового

$$P_2 + E_H$$

средства по сравнению с базовым:

$I'_1$  ,  $I'_2$  - годовые эксплуатационные расходы в расчете на объем продукции, производимой с помощью базовой и новой техники;

$E_n$  - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$K_1, K_2$  - сопутствующие капитальные вложения, необходимые для нормальной эксплуатации базовой и новой техники;

$A_2$  - объем производства новых средств труда.

При расчете сравниваются два варианта: вариант I (базовый) - замедлитель РНЗ-2; вариант II - новый ЭМЗУ. При этом учитываются: годовой объем горки (производительность горки); капитальные вложения; эксплуатационные расходы; расходы на зарплату обслуживающего персонала; затраты на ремонт поврежденных вагонов, на энергоресурсы. Исходные данные и расчет приведены в приложении Е.

#### Выводы по разделу 4

1 .Проанализированы варианты технического оснащения подгорочных путей и показатели качества регулирования скорости. Высокое качество обеспечивается при использовании парковой тормозной позиции (прицельное регулирование) с дополнением зоной автоматизации, где устанавливаются маломощные замедлители-ускорители (квaziнепрерывное регулирование).

2 .Синтезирован электромагнитный замедлитель-ускоритель, состоящий из 12 тяговых звеньев на ПТП и 6

электромагнитов на сортировочных путях, что позволяет поддерживать скорость от 0,25м/с (по условию автосцепления) до 1,5м/с (по условию безопасного соударения)

3. Предложена структурная схема управления ЭМЗУ на базе ЭВМ, разработана электрическая схема включения тяговых электромагнитов, обеспечивающие автоматическую работу предложенного устройства.

4. Определены параметры, влияющие на реализацию скорости скатывания отцепов. Погрешность меньше, если в расчетах принимать средние значения радиуса колёс, а также воздушного зазора между полюсом ЭМ и колесом. Получено выражение для определения динамической составляющей погрешности скорости. При тяговой силе полюса ЭМ в 1,2т сила трения составит около 0,1т и погрешность скорости не превысит установленного значения 0,2м/с.

5. Проведен технико-эксплуатационный сравнительный анализ ЭМЗУ, который показал, что предлагаемое устройство не уступает по энергоёмкости ( $\mathcal{E}_{уд}=0,33\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}\cdot\text{э}\cdot\text{в}$ ) существующим механизмам, но превосходит их в 6-8 раз по металлоёмкости и 3-8 раз по трудозатратах на обслуживание.

6. Экономический эффект применения ЭМЗУ достигается за счет уменьшения капитальных затрат, эксплуатационных расходов и повышения качества сортировки. Годовой экономический эффект на горке с 32 парковыми путями и суточной переработкой 1000 вагонов составляет около 191 тыс.грн. На один замедлитель-ускоритель при этом приходится около 6 тыс.грн. годового эффекта.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

На сортировочных горках железных дорог Украины для обеспечения необходимой дальности пробега отцепов и безопасной скорости соударения с вагонами, стоящими на подгорочных путях, используются парковые тормозные позиции. Они оснащаются балочными весовыми или нажимными замедлителями с пневматическими или гидравлическими приводами. Практика эксплуатации показывает, что тяжелые, многодетальные, инерционные механические замедлители, имея ряд недостатков, не обеспечивают требуемого качества сортировочного процесса. Поэтому актуальным вопросом для сортировочных горок есть усовершенствование исполнительных органов систем автоматического регулирования скорости, что требует дальнейших теоретических и экспериментальных разработок.

Главными научными и практическими результатами в диссертационной работе являются следующие:

1 . Анализ путей дальнейшего развития технических средств регулирования скорости отцепов для подгорочных путей сортировочных горок показал целесообразность разработки электромагнитного устройства, оказывающего на отцеп замедляющее и ускоряющее действие. Учитывая специфические условия работы технических средств на сортировочных путях, определены основные технико-эксплуатационные требования к разрабатываемому устройству.

2 .Обоснованы исходные параметры для математического анализа ЭМЗУ. Исследование динамики взаимодействия тя-

гового звена с колесом позволило установить, что вращающий электромагнитный момент создается нормальной составляющей тяговой силы ЭМ и в зависимости от расположения колеса относительно полюса имеет колоколообразный вид с максимумом посередине интервала установки соседних электромагнитов.

3. Разработаны методики расчета магнитной цепи тягового звена: на основании графического метода - по среднему значению магнитного потока и аналитического - числового интегрирования. Последняя дает более точные результаты, но более трудоемкая. Расчеты показали, что для достижения максимальной индукции магнитного потока в магнитопроводе необходимо обеспечить магнитодвижущую силу обмотки возбуждения тягового звена около 35кА.

4. Получено новое аналитическое выражение для электромагнитного момента, который зависит от конструктивных размеров тягового звена и расположения колеса относительно полюса электромагнита. Таким образом, усовершенствована математическая модель электромагнитного механизма, на основании которой синтезировано тяговое звено ЭМЗУ с учетом допустимых размеров колесных пар и габарита приближения строений.

5. При определении тяговой характеристики графически получены исходные данные, а расчет проведен на ЭВМ с использованием прикладной программы МаhtCAD. Установлено, что тяговая характеристика достигает максимума, когда колесо находится на расстоянии 0,25м от осевой линии сердечника. В зависимости от размера воздушного промежутка

тяговый момент может составлять 2,0-6,5кН-м. Теоретические исследования подтверждаются результатами экспериментальных испытаний лабораторного образца ЭМЗУ.

6 .Определены временные параметры замедлителя-ускорителя учетом переходных процессов, которые имеют место при значительных индуктивностях (около 1Гн) и малых активных сопротивлениях катушек (около 20м). Представлена электрическая схема включения обмоток питания, которая обеспечивает возможность регулирования времени срабатывания устройства и защитить коммутирующие устройства от электрической дуги.

7 .Получено аналитическое выражение для расчета изменения скорости вагона при взаимодействии с тяговым звеном ЭМЗУ, определяющим его энергетическую мощность. При среднем тяговом усилии полюса электромагнита 1,2т, скорости входа 2м/с расчетного 4-х осного вагона ( $w=1,5\%$ ) на парковых путях с уклоном 2,5‰ энергетическая мощность устройства достигает 0,12м.э.в при замедлении и 0,15м.э.в.-при ускорении, что соответствует установленным эксплуатационным требованиям.

8 .Синтезирован ЭМЗУ для сортировочных путей с установкой 12 звеньев на парковой тормозной позиции и 6 оди-нарных звеньев в зоне автоматизации, чем обеспечивается поддержание скорости движения вагона от 0,25 до 1,5м/с. Представлена структурная схема управления ЭМЗУ на базе управляющей вычислительной машины.

9 .Установлены факторы, влияющие на точность регули-рования скорости отцепов с помощью ЭМЗУ. Получено вы-

ражен и е для определения динамической составляющей погрешности, возникающей за счет сил трения. Погрешность реализации скорости при силе трения 0,1т не превышает 0,2м\с, что соответствует ЭТТ.

10 .Выполнен сравнительный анализ по техническим показателям предложенного устройства с существующими, который показал, что по энергоемкости ЭМЗУ похож на механические замедлители, но превосходит их в 3-8 раз по трудоемкости обслуживания, в 6-8 раз по металлоемкости. Годовой экономический эффект при использовании разработанного устройства на горке с 32 подгорочными путями и суточной переработкой 1000 вагонов составляет около 191 ты с. грн.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 .Автоматизация и механизация переработки вагонов на станциях / Муха Ю.А, Харланович И.В., Шейкин В.П. и др,- М.: Транспорт, 1985. - 248 с.

2 .Модин Н.К. Механизация и автоматизация станционных процессов. - М.: Транспорт, 1985. - 224 с

3 .Сортировочные станции / Н.В.Правдин, Т.С.Банек, В.Я.Негрей и др. - Гомель.:БелИИЖТ, 1982.-76 с.

4 .Сагайтис В.С. Соколов В.Н. Устройства механизированных и автоматизированных сортировочных горок: Справочник. - М.: Транспорт, 1979. - 175 с.

5 .Рогинский Н.О., Родимов Б.А., Зубрилин Г.И. Механизация сортировочных горок. - М.: Трансжелдориздат, 1948. - 244 с.

6 .Вологдин Л.А. Вагонные замедлители // Автоматика, телемеханика и связь. - 1981. - № 12. - С. 9 - 12.

7 .Эксплуатационные испытания замедлителей ЦНИИ-ЗВ и разработка предложений по их дальнейшему использованию: Отчет о НИР / ЦНИИ МПС; Шейкин В. П. и др. Шифр темы 506 - Д-77; р.З; Инв. № Б 618332. - М., 1977. - 114 с.

8 .Правила и нормативы установки в путь замедлителей ВЗПГ на новых и действующих сортировочных горках / Шейкин В.П., Кобзев В.А., Бычков В.В., Утенков В.А. // Автоматика, телемеханика и связь. -1990,- № 11,- С.14-18.

9 ,Дудниченко А.Н. Об основных направлениях развития и совершенствования железнодорожной автоматики

//Автоматика, телемеханика и связь. - 1991. - № 7. - С. 2-7.

10 .Кобзев В.А. Развитие оснащённости парковых тормозных позиций сортировочных горок // Автоматика, телемеханика и связь. - 1997. - №11. - С.3-5.

11 .Кобзев В. А. Перспективы развития средств механизации станционных процессов// Автоматика, телемеханика и связь. - 1998. - №3. - С.33-34.

12 .Технология обслуживания устройств. Замедлители типов КВ-3, Т-50, КНП-5 //Автоматика, телемеханика и связь. - 1993. - № 1. - С 11-18.

13 .Технология обслуживания устройств. Замедлители типов ВЗПГ, РНЗ-2 // Автоматика, телемеханика и связь. - 1993. - № 2. - С 15- 18.

14 .Технология обслуживания устройств. Управляющая аппаратура вагонных замедлителей //Автоматика, телемеханика и связь. - 1993. - № 3. - С.13-16.

15 .Сотников Е.А. Интенсификация работы сортировочной станции. - М.: Транспорт, 1979. - 239 с.

16 .Шейкин В.П. Повышение работоспособности вагонных замедлителей // Труды ВНИИЖТ. - 1980. - вып. 627. - с.4-40.

17 .Комплекс технических средств для обслуживания и ремонта вагонных замедлителей на сортировочных горках / Кобзев В. А., Метельский В.И., Иконников Е.А., Дьяченко В.В. // Автоматика, телемеханика и связь,- 1991,- №3.-С.34-37.

18 .ГОСТ 9238-83. Габариты приближения строений и подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм. - Взамен ГОСТ 9238-73; Введ. 01.07.84,- М.: Изд-во стандартов, 1983. - 28 с.

19 .Гринев А.А., Сотников Е.А., Буянов В.А. Высокопроизводительная работа сортировочной станции. - М.: Транспорт, 1982,- 87 с.

20 .Куммер П.И. Автоматика и телемеханика на зарубежных железных дорогах. - М.: Транспорт, 1978.-127 с.

21 .Шейкин В.П. Перспективы использования домкрато-видных замедлителей. //Автоматика, телемеханика и связь. - 1995. - №9. - С.10-11

22 .Ющенко Н.Р., Муха Ю.А., Яневич В.З. Тормозная мощность фрикционных замедлителей типа ФЗ./Труды ДИИТа. - 1971.-вып.129.- С.6-8.

23 .Пат. 115333 ГДР, МКИ В 61К 7/10. Электро-динамический вагонный замедлитель / Dieter, Werner, заявл. 2.10.74

24 .А.с. 1227536 СССР, МКИ В 61 К 7/08. Электромагнитный замедлитель вагонов / В.М.Ильченко, А.П.Гарбузов, Н.В.Песенко, В.П.Молодцов, В.М.Фельдман. Опубл. 30.04.86, Бюл. №16.

25 .А.с. 1202944 СССР, МКИ В 61 К 7/12. Электромагнитный замедлитель/ Ф. А.Искандер-заде, Ю.М.Сеидов, Л.Х.Агамянц. Опубл. 07.01.86, Бюл. №1.

26 .А.С. 1331711 СССР, МКИ В 61 К 7/12, Электромагнитный замедлитель железнодорожного

транспортного средства / В.М.Ильченко, А.П.Гарбузов, Н.В.Песенко, Б.И.Разбоев, Е.В.Щербаков. Опубл.23.08.87, Бюл. №31

27 .Моргачев В.Д., Майшмаз К.Г., Грушко В.М. Создание эффективного электромагнитного вагонозамедлителя // Автоматика, телемеханика и связь. - 1991. - №9. - С.23-27.

28 .Пат. 50-30322 Японии, МКИ В 61 К 7/10. Ускоритель-замедлитель грузовых вагонов на сортировочных станциях. / Ксимото Кэн, Кокура Синдзо. Заявл. 16.06.70

29 .Пат. 49-28924 Японии, МКИ В 61К 7/10. Электромагнитный ускоритель-замедлитель железнодорожного подвижного состава. / Хиромито, Хироси, Синдзо. Заявл. 1967.

30 .Пат. 552496 Швейцарии, В 61 В 13/12. Ускоритель-замедлитель с расположенными вдоль рельса полюсами. /Egloff Adolf. Заявл. 2.05.72.

31 .А.с. 499163 СССР, МКИ В 61 К 7/10. Электродинамический замедлитель-ускоритель вагонов,/ В.В.Приклонский, А.П.Кузьменко, М.М.Жуков, В.С.Могила, А.Г.Подлузский, Н.М.Целуевский. 1974.

32 .Фонарев Н.М. Автоматизация процесса расформирования составов на сортировочных горках. - М.: Транспорт, 1971. - 271 с.

33 .Рудановский В.М., Шейкин В.П. Оценка точности работы замедлителей на парковой тормозной позиции // Вестник ВНИИЖТ,- 1978,- №5,- С. 60-62.

34 .Пат. 2418531 ФРГ, МКИ В 61 J 03/08. Станционное устройство для подталкивания и перемещения

вагонов./Опубл.23.04.81; Auszüge aus den Auslegungsziften, №17.

35 .Ганжело Л.И., Муратов А.А. Технике- эксплуатационная эффективность ускорителей вагонов на путях сортировочного парка// Труды ДИИТа.-1990,- вып.277/17,- С. 20-29.

36 .А.с. 1253865 СССР, МКИ В 61 К 7/02. Ускоритель железнодорожных вагонов/ Л.И.Ганжело, А.П.Гарбузов, Н.В.Песенко, С.П.Иванюк. Опубл. 30.08,86, Бюл. №32.

37 .Нагорный Е.В. Научные основы и разработка комплексной технологии поточной и непрерывной переработки вагонов на сортировочных станциях: Дис..докт. техн, наук: 05.22.08. - Харьков, 1994. - 449 с.

38 .Николайчук Н.С. Методика расчета электро- динамической составляющей тормозного усилия электромагнитного замедлителя // Автоматическое управление и вычислительная техника на железнодорожном транспорте.-Днепропетровск: Труды ДИИТа,- 1975,- вып.172/7,- С.48-57.

39 .Технике - эксплуатационные характеристики электро- магнитного замедлителя типа ЭМЗ-4 / Муха Ю.А., Яневич В.З., Егоров А.А. и др.// Автоматическое управление и вычислительная техника на железнодорожном транспорте.- Днепропетровск: Труды ДИИТа.- 1975,- вып.162/6,- С.53-60

40 .Кузьменко А.П., Могила В.С., Черноус Н.И. Электромагнитный замедлитель-ускоритель для сортировочных

станций // Автоматика, телемеханика и связь. - 1974. - №7. - С.22-23.

41 .Могила В.С. Исследование электромагнитного замедлителя - ускорителя соленоидного типа для железнодорожных станций: Автореф. дис....канд. техн, наук: 05.13.14 / ХИИТ. - Харьков, 1974. - 17 с.

42 .А.С. 1798232 СССР, МКИ В 61 К 7/10. Электродинамический замедлитель вагонов / Е.В.Нагорный, И.В.Берестов, А.Ф.Майборода, А.И.Прогонный, В.М.Соколов. Опубл. 28.02.93. Бюл. №8.

43 .Соболев Ю.В., Бабаев М.М., Придубков И.Я. Концепция новой технологии передачи данных подвижными составами железных дорог // Информационно - управляющие системы на железнодорожном транспорте,- 1997,- №1,- С. 74-79.

44 .Пеккер И.И. Физическое моделирование электромагнитных механизмов,- М.: "Энергия", 1969,- 145 с.

45 .Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. -М.: Энергия. 1974. - 243 с.

46 .Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Ч.И. Динамика: Учебник для технических вузов. - 6-е изд., испр. - М.: Высш, шк., 1984. - 423с.

47 .Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики [в 2-х ч. Для гос. ун-тов]. Ч.2.- М.: Наука, 1969,- 332 с.

48 .Динамика взаимодействия электромагнитного замедлителя-ускорителя с колесом вагона / Соболев Ю.В., Соколов В.М., Прогонный А.Н.; Харьк. гос. академия ж-д. тр-

та.-Харьков,1994. - 15 с. - Рус. - Деп. в ГНТБ Украины 15.08.94, № 1668 - Ук94.

49 .Соболев Ю.В., Соколов В.М., Прогонный А.Н. Электромагнитный замедлитель-ускоритель для систем автоматического регулирования скорости на сортировочных горках // Информационно - управляющие системы на железнодорожном транспорте.-1998. -№ 1,- С.39-42.

50 .Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов.-М.: “Энергия”, 1974.-159 с.

51 .Любчик М.А., Клименко Б.В. Определение потокосцепления силовых электромагнитов // Электричество. 1970.-№9,- С. 15-18.

52 .Лысов Н.Е. Расчет электромагнитных механизмов. - М.: Оборонгиз, 1949.-120 с.

53 .Пеккер И.И., Никитенко А.Г. Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах. -М.: Энергия, 1985.-156с.

54 .Соболев Ю.В. Принципы построения систем считывания с использованием ферромагнитных свойств бандажей колесных пар // Информационно - управляющие системы для сортировочных станций. - Харьков. -1989. - С. 4-14.

55 .Аранович Б.И., Шамрай Б.В. Электромагнитные устройства автоматики. - М.: Энергия, 1965. -484 с.

56 .Витенберг М.В. Расчет электромагнитных реле,- М.: Энергия, 1975. -416 с.

57 .Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. - М.: Энергия, 1989. -214 с.

58 .Коваленков В.И. Основы теории магнитных цепей.-М.: АН СССР, 1940. -158 с.

59 .Буль Б.К. Методы расчета магнитных цепей с воздушным зазором и распределенной намагничивающей силой // Электричество.-1969. -№10. -С. 64-68.

60 .Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. -М-Л.: Госэнергоиздат, 1960. -447 с.

61 .Миловзоров В.П. Электромагнитная техника. -М.: Энергия. 1964. -315 с.

62 .Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы / Под общей редакцией И.Г.Арамановича. -4-е изд.-М.: Наука, 1978.-831 с.

63 .Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств. -М.: Энергия, 1965. -576 с.

64 .Соколов В.М., Бабаев М.М., Золочевский Л.Н., Пилипенко В.В. Исследование магнитных характеристик колесной стали для хранения информации в системе записи инвентарных номеров вагонов // Микропроцессорные системы управления и устройства контроля на железнодорожном транспорте. -Харьков, 1986. -С. 91-93.

65 .Тозони О.В. Математические модели для расчета электрических и магнитных полей. -Киев.: Наукова думка, 1964. -157 с.

66 .Любчик М.А. Расчет и проектирование электромагнитов постоянного и переменного тока. -М-Л.: Госэнергоиздат, 1959. -224 с.

67 .Сотсков Б.С. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры,- М-Л.: Госэнергоиздат, 1950. -217 с.

68 .Прогонный А.Н. Анализ математической модели электромагнитного замедлителя-ускорителя //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.-1999.-№1.- С.85-89.

69 .Ступель Ф.А. Электромеханические реле. Основы теории, проектирования и расчета. -Харьков.: Из-во Харьковского университета, 1950. -350 с.

70 .Грузовые вагоны колеи 1520 мм железных дорог СССР. Альбом. - М.: Транспорт, 1982. - 111 с.

71 .Инструкция по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию вагонных колёсных пар. - М.: Транспорт, 1977. - 87 с.

72 .Фришман М.А., Пономаренко Н.А., Финицкий С.И. Конструкция железнодорожного пути и его содержание. - 2-е изд., перераб. и доп. - М: Транспорт, 1987. - 351с.

73 .Немцов М.В., Шамаев Ю.М. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. - М.: Энергоиздат, 1981. - 136 с.

74 .Русин Ю.С. Расчет электромагнитных систем. - Лен. отд.: Энергия, 1968. - 132 с.

75 .Бронштейн И. Н., Семендяев К.А. Справочник по математике: Для инженеров и учащихся втузов.-13-е изд., испр.-М.: Наука, 1986.-544 с.

76 .Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник для вузов. -8-е изд., перераб. и доп. -М.: Высш, шк., 1984. - 559 с.

77 .Основы теории цепей. Учебник для вузов / Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов / Под ред. Г.В.Зевеке. -М.: Энергия, 1975. -752 с.

78 .Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. -3-е изд., перераб. и доп. -М.: Энергия, 1968. -488 с.

79 .Железнодорожные станции и узлы / В.М.Акулиничев, Н.В.Правдин, В.Я.Болотный, И.Е.Савченко / Под ред. В.М.Акулиничева. Учеб. Для вузов ж.-д. трансп. - М.: Транспорт, 1992. - 480 с.

80 .Фонарев Н.М. Автоматизация процесса расформирования составов на сортировочных горках. -М.: Транспорт, 1971. - 271 с.

81 .Правдин Н.В.,Негрей В.Я., Луговцев М.Н. Расчет сортировочных горок. -Гомель.:БелИИЖТ, 1988. - 150 с.

82 .Соколов В.М., Прогонный А.Н. Расчет мощности электромагнитного замедлителя-ускорителя // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте.-1998.-№ 2.-С. 34-36.

83 ,Устенко А.Б. О влиянии технической структуры системы АРС на показатели качества прицельного регулирования скорости отцепов //Автоматизированные

информационные системы на сортировочных станциях железнодорожного транспорта. -Днепропетровск: ДИИТ. -1988. - С.47-51.

84 .Павлов В.Е. Особенности целевого торможения отцепов в системе АРС *И Сб. науч. тр. / ЛИИЖТ, 1967. -вып.259. - С. 84-94.*

85 .Рудановский В.М. Влияние погрешности АРС на образование “окон<sup>0</sup> и скорость соударения отцепов на подгорочном парке // Вестник ВНИИЖТ. -1977. - №3. - С.47-50.

86 .Муха Ю.А., Бобровский В.И. Исследование точности прицельного регулирования на сортировочных горках, оборудованных системами АРС: Тр. ДИИТа. -Днепропетровск. ДИИТ, 1975. -вып. 168/9. -с.55-64.

87 .Мейер Г.Ю. Организация сортировочного процесса при автоматизации сортировочных станций // Железные дороги мира. -1981. -№3. -С.3-11.

88 .Рудановский В.М., Шейкин В.П. Двухпозиционное регулирование скорости отцепов в сортировочном парке // Вестник ВНИИЖТ. -1980. -№3. -С.14-17.

89 .Шейкин В.П., Кобзев В.А., Метельский В.И. Эффективность систем квазинепрерывного регулирования скорости отцепов на сортировочных горках с использованием точечных вагонных замедлителей *И Вестник ВНИИЖТ. -1992. -№5. -С. 17-21.*

90 .Грунтов П.С., Хромов В.Г. Комплексный подход к расчету и автоматизации сортировочных горок // Автоматика, телемеханика и связь. -1987. -№1. -С.10-13.

91 .Муха Ю.А., Бобровский В.И. О способах повышения качества процесса заполнения сортировочных путей при расформировании составов // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях.-Днепропетровск, ДИИТД978. -вып. 197/12. -С. 38-50.

92 .Нагорный Е.В., Берестов И.В. Техничко-эксплуатационное сравнение принципов прицельного и квазинепрерывного регулирования движения на путях сортировочных парков с системами АРС // Межв. сб. науч. тр. - Гомель, БелИИЖТ. -1987. - С. 44-51

93 .Нагорный Е.В., Берестов И.В. Техничко-эксплуатационные требования к системам автоматического квазинепрерывного регулирования скорости движения отцепов на путях подгорочных парков сортировочных станций // Микропроцессорные системы управления и устройства контроля на железнодорожном транспорте. -Харьков, ХИИТ. -1986. -С. 67-75.

94 .Жуковицкий И.В. Использование управляющей ЭВМ в цифровой системе управления замедлителями тормозных позиций // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте.-1997. -№1. -С.54-59.

95 .Иванченко В.Н. Микропроцессорные информационно-управляющие системы автоматизации сортировочного процесса. Уч. пособ. -Ростов н/Дону, РИИЖТ. -1984. -246с.

96 .Казаков А.А., Давыдовский В.М., Казаков Е.А. Устройства автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. -М.: Транспорт, 1983. - 374с.

97 .Бухгольц В.П. Путевые датчики контроля подвижного состава на рельсовом транспорте.-М.Транспорт.-1976.-96 с.

98 .Шейкин В.П. Улучшение воздухообеспечения сортировочных станций // Труды ВНИИЖТ. -1980, вып. 627. -С.40-60.

99 .Модин Н.К., Щербаков Е.В. Техническое обслуживание горючих устройств. -М.: Транспорт, 1989. -167с.

100 .Степанова Л.Л. Организация механизированных площадок на сортировочных станциях. -В кн.: повышение надежности технических средств на станциях. Сб. науч. тр. -М.: Транспорт, 1984. -С.46-53.

101 .Определение экономической эффективности новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. -Минск.: Полымя, 1979. - 143с.

102 .Сотников И.Б., Выгнанов А.А., Гоманков Ф.С. Техничко-экономические расчеты в эксплуатации железнодорожного транспорта (в примерах и задачах). -М.: Транспорт, 1983. -254с.

103 .Луговой П.А., Цыпин Л.Г., Аукционек Р.А. Основы технико-экономических расчетов на железнодорожном транспорте. -М.: Транспорт, 1973. -270с.

## Приложение А

## Технико-эксплуатационные характеристики технических средств регулирования скорости

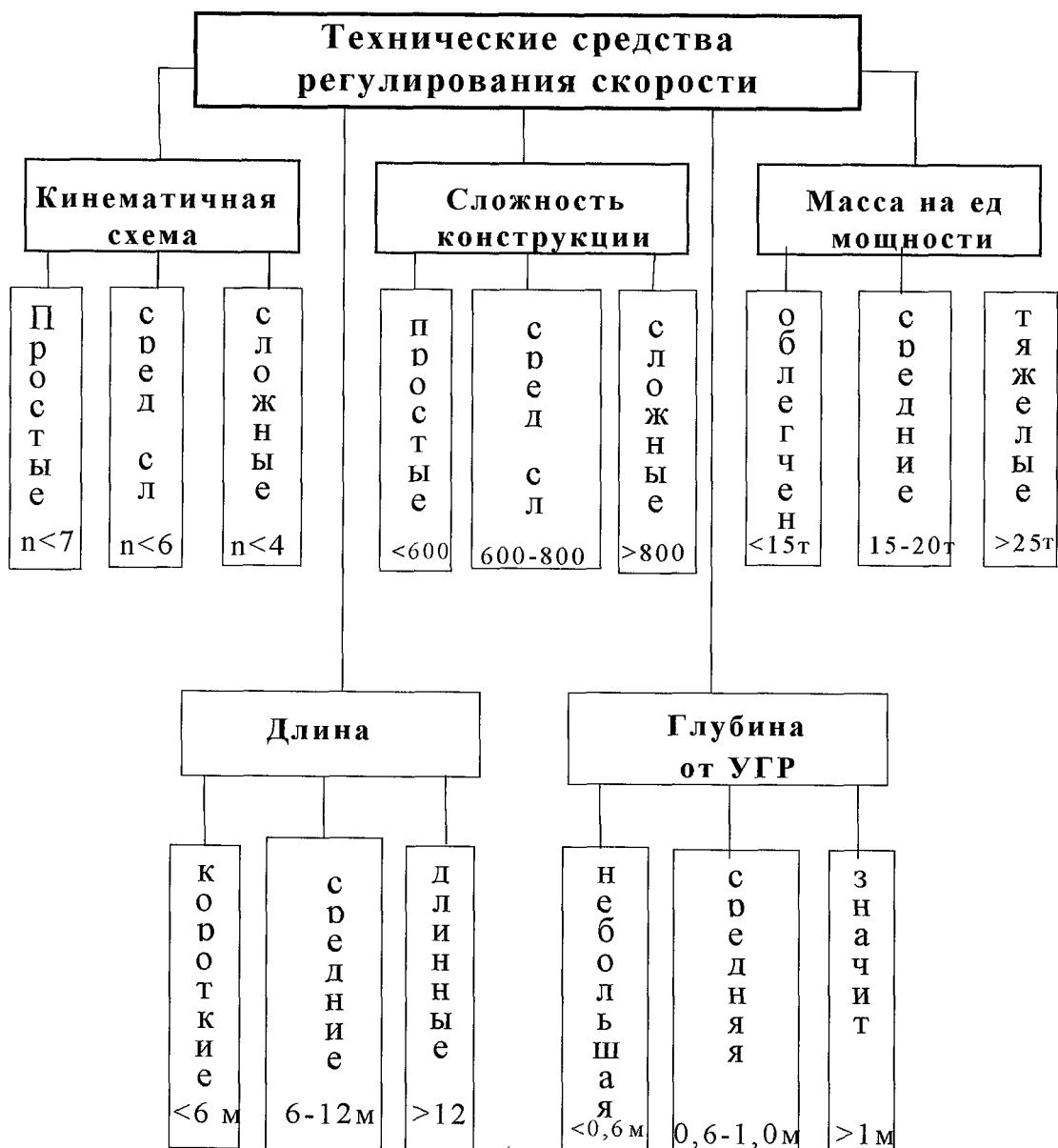


Рис. А. 1. Количественные данные технических средств регулирования скорости

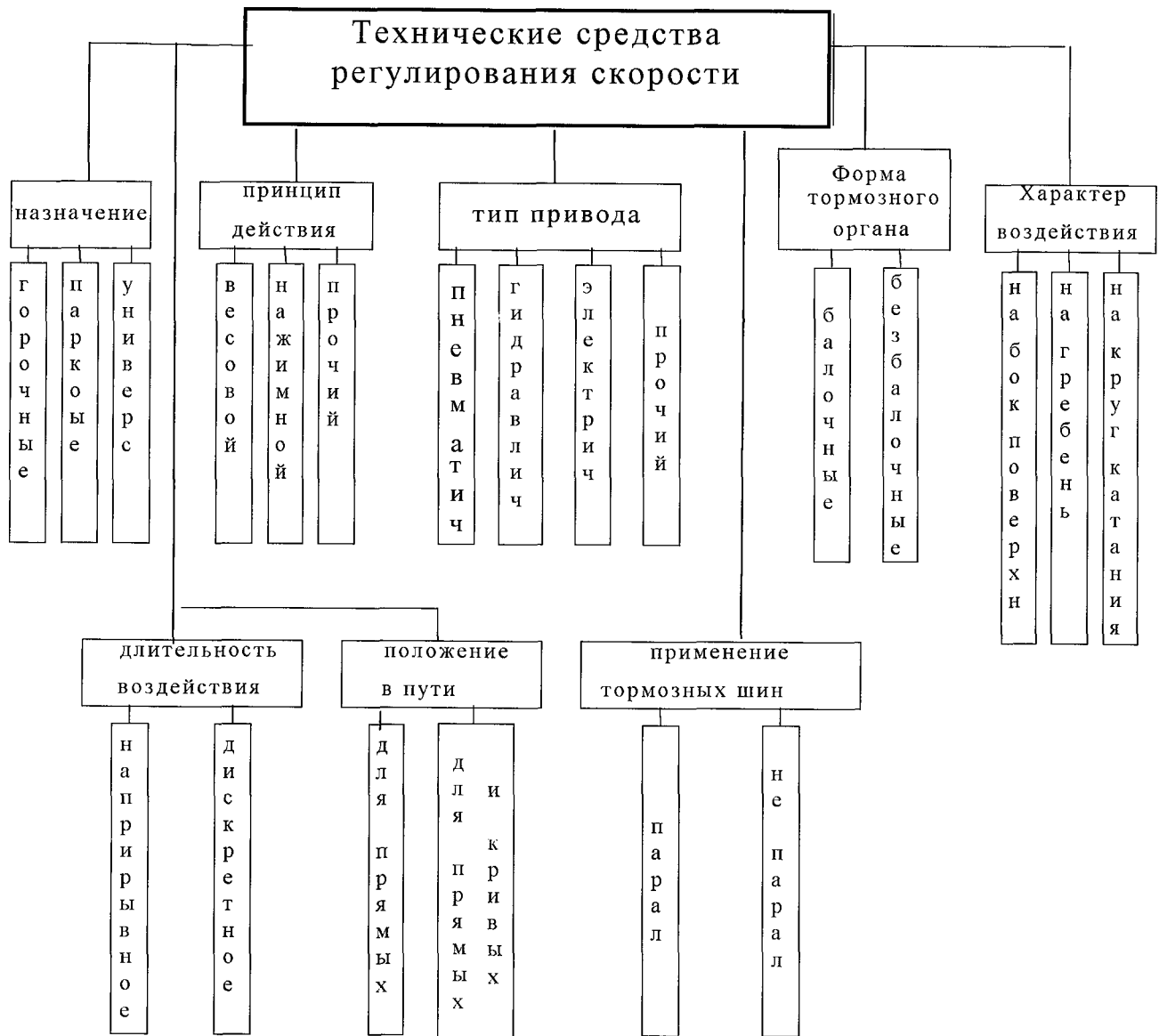


Рис.А.2. Качественные данные технических средств регулирования скорости

Таблица А.1

Технико-эксплуатационные характеристики  
весовых балочных замедлителей

Показатели	КВ-3	КВ-1	ЦНИИ	Saxby R68	Saxby R73	Thyssen	Racor R11	Гидр
Страна	СНГ	СНГ	Россия	Франц.	Франц	Герман	США	Япон
Назнач	Г	П	П	Г	П	Г	Г.П	П
Тип прив.	ПН	ПН	Гидр	Гидр	Гидр	Гидр	Гидр	Гидр
Число раб. рельсов	2	2	1	1	1	2	1	1
Рабочая длина по балкам в метрах	7.6	3.6	3.2	8 10 12 14 16 20	15	12 16	12	10
Тормозная мощность м.э.в.	1.1	0.5	0.26	1.1 1.3 1.6 1.9 2.1 2.7	1.2	1.08 1.44	1.0	0.7
Масса, т	31.9	16.5	4.5	16 19 22 25 28 34	16	35 47	15	23
Время затормаж. в сек	0.6	0.6	1.6	0.6	—	1	—	0.6
Время расторм. в сек	0.7	0.7	0.2	0.25	—	1.6	—	0.2
Погреши, скор. вых. м/с	0.7	0.7	0.1	0.2	—	1	—	0.1
Допустим, скор. вых. м/с	7	7	7	—	—	7	—	5.6
Глубина от УГР	1.1	1.1	0.8	0.8	0.7	1.6	0.7	—
Уровень шума, дБ	ПО	ПО	89	85	85	90	85	90

Таблица А. 2

Технико-эксплуатационные характеристики  
нажимных балочных замедлителей

Показатели	ВЗП	ВЗПГ -5	КИП-	РНЗ	Вест, гауз	Е- 160	Пнев	TW	FEM
Страна	Росс	Росс	СНГ	СНГ	Англ	США	Япон	Гер	Гер.
Назначение	Г	Г	Г.П	П	Г.П	Г	Г	Г	П
Тип привода	пн	пн,гд	пн	пн	пн	пн	пн	гид.	гид.
Число раб. рельсов	2	2	2	2	2	2	2	2	1
Раб. длина по балкам в метрах	12.5	12.5	12.5	2.75	20	25.6	10 20	9.6 13 16.4	7.25 17
Тормозная мощность м.э.в.	1.3	1.5	1.25	0.41	0.8	1.45	0.7 1.3	1.09 1.79 2.63	0.93 1.7
Масса, т	30	25	34.8	5.75	34	40	20 40	25 33 41	12 25
Время затормаж. в сек	0.8	0.7	0.6	0.4	2	—	0.8	0.6	0.8
Время оттормаж. в сек	0.6	0.6	1.0	0.6	1.0	1.2	0.3	0.3	0.3
Погреши, скор. вых. м/с	0.6	0.6	0.7	0.6	0.3	0.5	0.2	0.3	0.2
Допустим, скор. вх. м/с	8.5	8.5	7	7	7	7	7	7	5
Глубина заложения от УГР	0.85	0.85	0.9	0.4	0.5	0.6	0.6	1.2	1.2
Уровень шума, дБ	ПО	ПО	ПО	100	ПО	ПО	ПО	85	90

Таблица А.3

Технико-эксплуатационные характеристики  
специализированных замедлителей

Показатели	ЭВЗ	ЭМЗ	ФЗ	Электродинамические				Dowty	TG	ST Грас
				эл. дин	эл. дин	тип В	ASEA			
Страна	Росс.	Росс.	СНГ	Гер.	Гер.	Япон	Швей	Англ.	Гер	Гер
Назнач.	П	П	П	П	П	П	П	П	П	П
Тип прив.	эл.	эл.	эл.	эл.	эл.	Эл.	ПН	Гид.	Гид.	ПН
Принцип действия	эл. М.Н.	эл. М.Н.	фри.	эл. М.Н.	эл. Н.	эл.Н.	Винт.	точ.	рез.	Н.
Число раб рельсов	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2
Раб.длина в метрах	4.5	12	0.65	7.5 15	16	9	1.6	0.3	14	2
Тормозн. мощность м.э.в.	0.3	0.6	0.05	0.57 1.14	1.2	0.3	0.05	0.005	1.0	0.08
Масса, т	7.6	26.2	0.25	12 24	22	10	0.08	0.04	14	2.5
Время затормаж. в сек	0.5	0.3	0.1	0.8	0.4	2	—	—	0.3	—
Время расторм. в сек	0.5	0.3	0.1	0.5	0.5	0.4	—	—	0.3	—
Погрешн, скор.вых. м/с	0.2	0.1	0.05	0.3	0.3	0.1	—	—	0.2	—
Допустим скор.вх. м/с	7	7	5	7	7	7	5	—	5	—
Глубина заложен, от УГР	0.5	0.6	0.28	0.4	0.35	0.4	—	—	0.6	0.35
Уровень шума, дБ	85	85	106	85	85	85	90	85	85	100

## Приложение Б

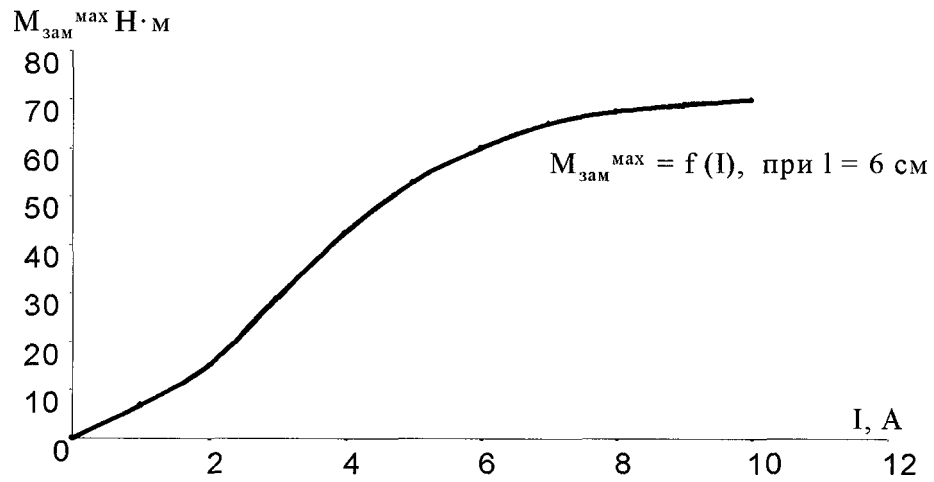
Результаты экспериментальных исследований  
лабораторного макета замедлителя-ускорителя

Рис. Б.1. Нагрузочная характеристика тягового звена макетного образца

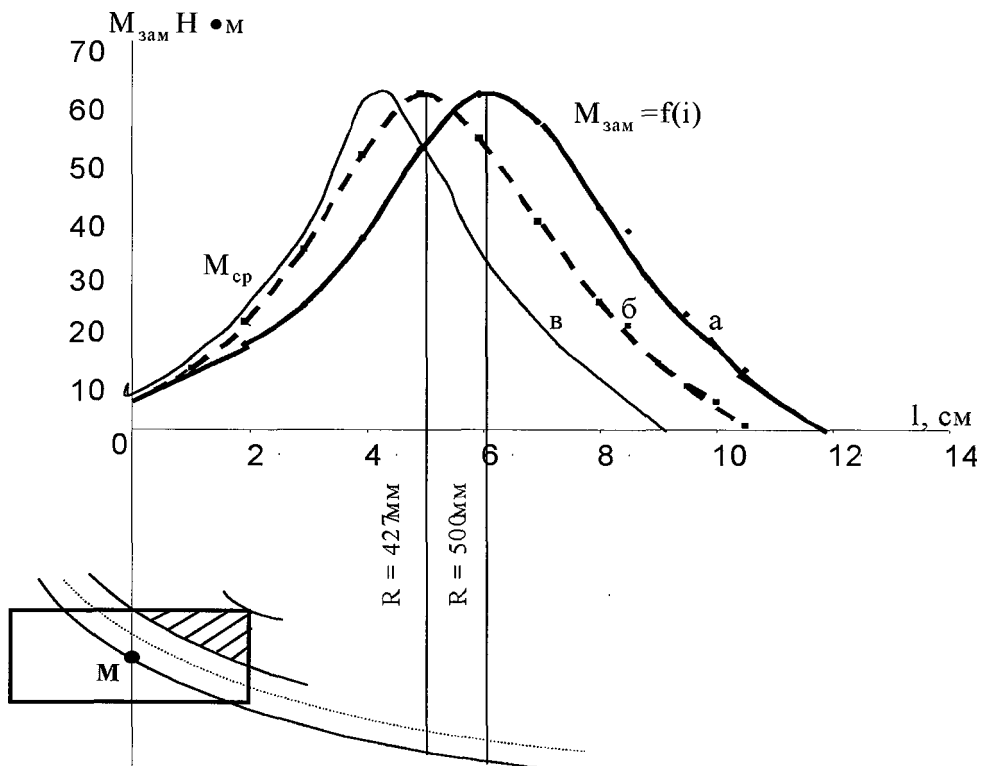


Рис. Б.2. Тяговая характеристика электромагнита макетного образца

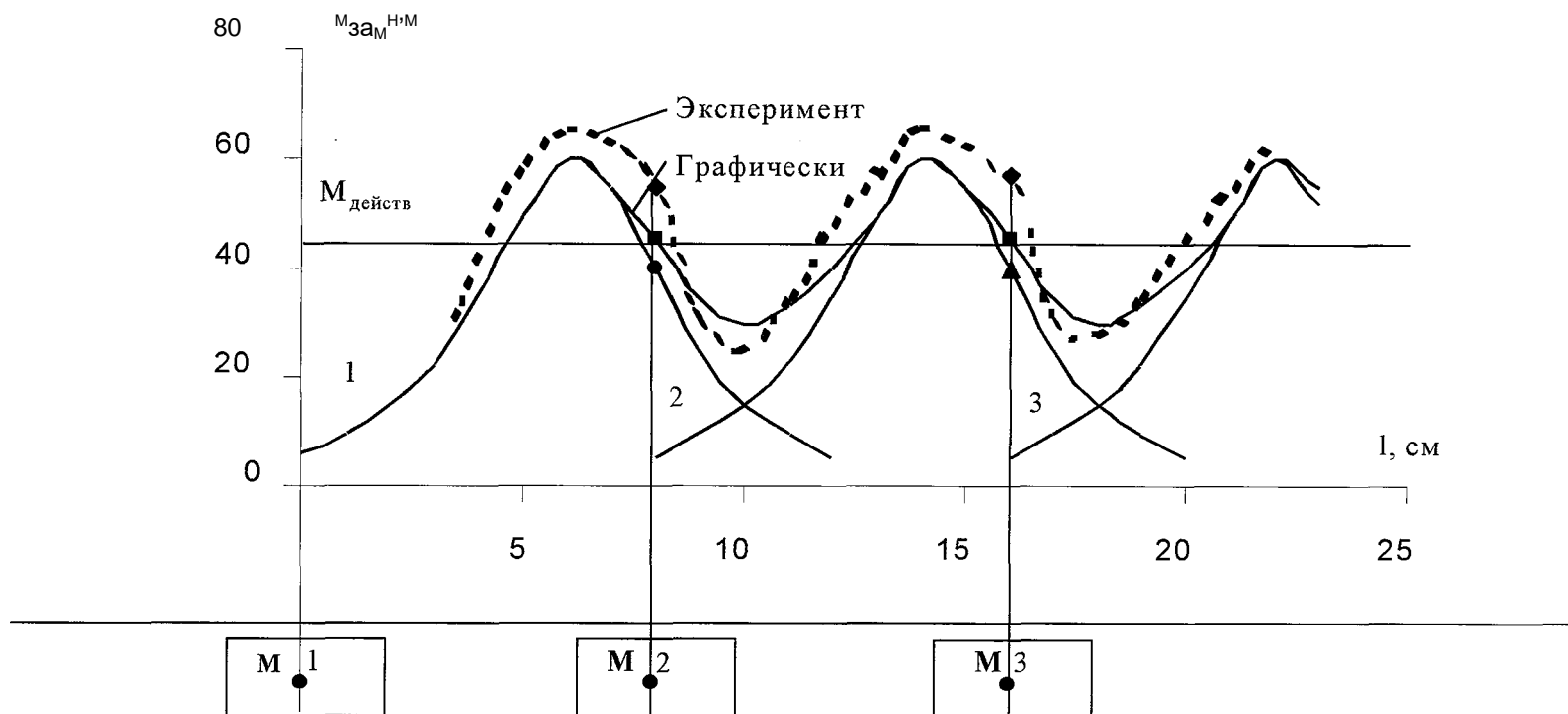


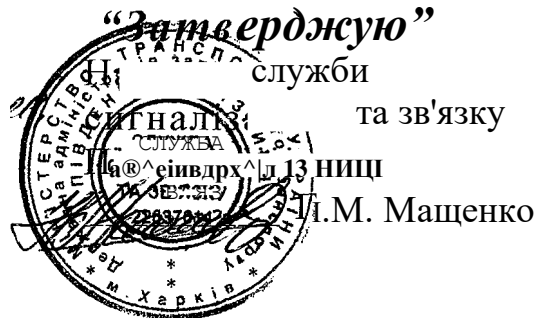
Рис. Б.3. Тяговая характеристика лабораторного макета двухзвенного ЭМЗУ

Показатели качества  
вариантах техн]

Результаты моделирования прицель  
вариантах техническ

Расположение парковых ТП, ускорителей-замедлителей (УЗ) и датчиков ИХС	Особенности системы АРС
$\frac{\text{ИХС}}{\text{А А А}} \text{ --- ПТП}$	$Q_{AW}=0,8 \text{ Н/кН}^* \text{ **}$ *** **
	**
$\frac{\text{ИХС}}{\text{А А А}} \quad   \text{ }^{\wedge} \text{ м ПТП}$	$Q_{AW}=0,2 \text{ Н/кН}$
$\frac{150 \text{ м}^2}{\text{Д}^{\wedge} \text{ Л ПТП}}$	$N_{\text{ДПТП}} = 0,4 \text{ м}$
$\frac{100 \text{ м } 300 \text{ м}}{\text{---}} >$	$B_{\text{нзп}} = 800 \text{ м}$
$100 \text{ м } 100 \text{ м } 100 \text{ м}$	$N_{\text{ДПТП}} = 0,6 \text{ м}$ ***
$200 \text{ м} \quad 200 \text{ м}$	$N_{\text{уз}} = \pm 0,62 \text{ м}$ >■<
$\frac{\text{ДАДД}_{\text{узи}}}{\text{---}} \quad \frac{\text{УЗ2} \text{ --- А}_{\text{уз3}}}{\text{---}}$	
$\frac{100 \text{ м } 100 \text{ м}}{\text{---}}$	$N_{\text{уз}} = 6;$ $N_{\text{уз}}=0,1 \text{ м}$
$\frac{\text{А Д Д}}{\text{---}} \quad \frac{\text{А}}{\text{---}}$	

- \* Температура среды  $T^{\circ} > 0^{\circ}\text{C}$ , скорость ветре
- \*\* Оценка  $W$  выполняется по справочным дані
- \*\*\* В знаменателе - показатели качества при  $P$   
вероятных повреждений вагонов в результа
- \*\*\*\* Величина  $N_{\text{уз}}$  характеризует мощность УЗ ]



## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Прогонного Олексія Миколайовича “Розробка та дослідження електромагнітного уповільнювача-прискорювача для підгіркових колій залізничних станцій”.

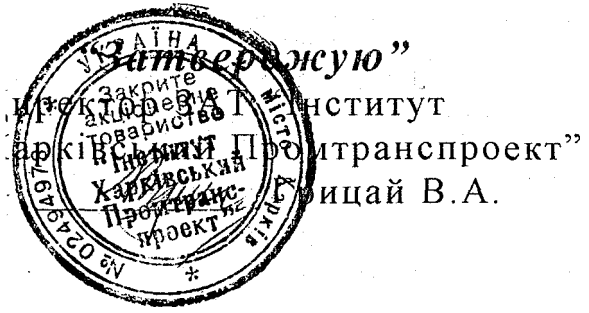
На сортувальній гірці ст. Харків-Сортувальний для прицільного регулювання швидкості відчепів на підгірковій позиції використовуються механічні уповільнювачі натискуючої дії, що дозволяє зменшити частку ручної праці. Але багатодетальні, важкі та інерційні балкові пристрої мають нестабільну уповільнюючу характеристику. Для реалізації безпечної швидкості підходу відчепів до вагонів, які знаходяться на сортувальних коліях, необхідне втручання оператора. Таким чином, існуючі технічні засоби стримують процес автоматизації сортувальної гірки.

Дисертаційна робота Прогонного О.М. присвячена розробці простого, надійного електромагнітного уповільнювача-прискорювача, що не має рухомих частин і спроможний забезпечити необхідну якість сортувального процесу. Дисертантом обгрунтовані габаритні розміри тягових ланок, електрична схема включення обмоток збудження пристрою. Автором досліджені експлуатаційні характеристики, розрахована енергетична потужність. Испити лабораторного зразка показують, що ряд малопотужних тягових ланок можуть забезпечити необхідну точність регулювання швидкості.

Висновки та рекомендації дисертаційної роботи Прогонного О.М. мають практичне значення для розвитку технічних засобів регулювання швидкості відчепів на сортувальній гірці. Матеріали роботи використані при виготовленні експериментального зразка електромагнітного уповільнювача-прискорювача.

Головний інженер  
ст. Харків-Сортувальний  
Південної залізниці

В.В. Гужва



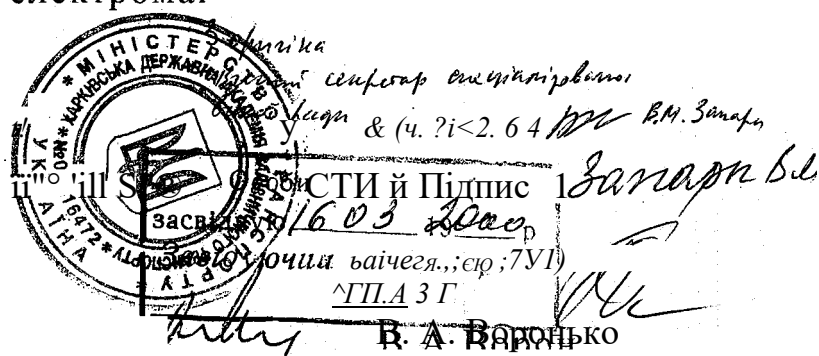
АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Прогонного Олексія Миколайовича "Розробка та  
дослідження електромагнітного уповільнювача-  
прискорювача для підгіркових колій залізничних  
станцій".

В дисертаційній роботі Прогонного О.М. визначено перспективний напрямок розвитку технічних засобів в системах регулювання швидкості відчепів на сортувальних гірках, зокрема для підгіркових колій. Запропоновано простий і надійний уповільнювач-прискорювач електромагнітної дії, що складається з ряду окремих тягових ланок і новизна якого захищена авторським свідоцтвом на винахід. Здобувачем обгрунтовані конструктивні параметри розробленого пристрою. Визначені основні експлуатаційні характеристики: навантажувальна, тягова, енергетична ефективність, час включення та виключення. Розрахункові тягові можливості уповільнювача-прискорювача підтверджується результатами дослідження лабораторного зразка. Встановлено, що розроблений пристрій забезпечує стабільну тягову характеристику. Енергетична потужність запропонованого засобу регулювання швидкості відповідає техніко-експлуатаційним вимогам, що пред'являються до пристроїв на підгіркових коліях. Синтезовано електромагнітний уповільнювач-прискорювач у вибраному варіанті технічного оснащення підгіркових колій, чим забезпечується найвища якість сортувального процесу. Одержані автором результати мають практичну цінність.

Матеріали дисертаційної роботи Прогонного О.М. передані в "Інститут Харківський Промтранспроєкт". На засіданні технічної ради прийнято рішення щодо розробки технічної документації для оснащення підгіркових колій електромагнітним уповільнювачем-прискорювачем.

Начальник відділу  
автоматизації та зв'язку  
залізничного транспорту  
ЗАТ "Інститут Харківський  
Промтранспроєкт"



## Приложение Е

Расчет экономической эффективности  
электромагнитного замедлителя-ускорителя

Производительность сортировочной горки И (ВК В?).

*Вариант I* (базовый - РНЗ). Суточная производительность горки 1000 вагонов в сутки:  $V_1 = 1000 - 365 = 365$  тыс. вагонов в год.

*Вариант II* (ЭМЗУ). За счет более точной работы ЭМЗУ, снижения объема маневровых передвижений, сокращения «окон» между отцепами (табл. В. 1) производительность горки повышается на 3%:  $V_2 = 1000 - 365 - 1,03 = 376$  тыс. вагонов в год.

Капитальные вложения.

Учитываются капитальные затраты на приобретение и монтаж устройств, сооружение компрессорной станции с сетью трубо-проводов и кабельной сети с преобразователями напряжения, эксплуатационные расходы на амортизацию, техническое обслуживание, электроэнергию, приобретение материалов и запасных частей. Стоимость устройств, устанавливаемых на 32 парковых путях:

*вариант I:* 35 тыс.грн.  $-32 = 1120$  тыс.грн.. Дополнительные капитальные вложения на расширение компрессорной станции или системы питания новых устройств составляют около 90 тыс. грн. Общие капитальные затраты в тыс. грн.:  $K_{\text{общ}} = 1120 + 90 = 1210$ .

*вариант II:* 25 тыс.грн.  $-32 = 800$  тыс.грн. Система питания 90 тыс. грн.  $K_{\text{общ}} = 800 + 90 = 890$ .

Эксплуатационные расходы:*Амортизационные отчисления.*

*Вариант I.* На капитальный ремонт (в тыс. грн.) 1210-0,12=145,2 на текущий ремонт 1210-0,01 = 12,1 на компрессорную станцию 90-0,09=8,1. Общие отчисления составят 165,4, где 12%-норма отчислений на капремонт; 1%-на текущий ремонт.

*Вариант II.* На капитальный ремонт (в тыс. грн.) 890-0,12=106,8 на текущий ремонт 890-0,1=8,9. Общие отчисления составят 115,7.

*Расходы на заработную плату обслуживающего персонала.*

*Вариант I.* Расходы на обслуживание замедлителей РНЗ 0,65-150-1,45-32-12=54,3, где 1,45 - коэффициент доплат; затраты на обслуживание компрессорной станции примерно 25 тыс. грн. Общие расходы на обслуживание - 79,3 тыс.грн.

*Вариант II.* Расходы на обслуживание ЭМЗУ с учетом снижения трудовых затрат на 50%: 0,65-150-0,5-1,45-32-12=27,144 тыс.грн., где 0,5 - коэффициент снижения трудозатрат.

*Затраты на электроэнергию.*

По вариантам I и II можно принять одинаковыми. Ориентируясь на существующие замедлители, годовые расходы составляют 29 тыс.грн.

*Повышение качества регулирования скорости отцепов.**Сокращение повреждаемости вагонов.*

*Вариант I.* По данным исследований число повреждений на 1 млн. переработанных горкой вагонов при использо-

вании замедлителей РНЗ при коэффициенте вариации мощности  $u=0,25$  составляет 100 вагонов.

*Вариант II.* Время включения и отключения ЭМЗУ может регулироваться и в общем в 2 раза меньше. Число повреждений при том же  $u$  равно 50 вагонов. Годовой экономический эффект от сокращения повреждаемости вагонов на горке:

$$1200 \cdot 50 \cdot 0,376 = 22,56 \text{ тыс. грн.},$$

где 1200 грн - стоимость ремонта поврежденного вагона;

0,376 - годовой объем переработки на одной горке, в млн. вагонов.

*Повышение сохранности грузов.*

При повреждаемости вагонов портится 10% грузов. Сокращение повреждаемости приводит к годовому экономическому эффекту:

$230 \cdot 50 \cdot 0,376 \cdot 46 \cdot 0,7 \cdot 0,1 = 13,92$  тыс.грн. Здесь: 230 - стоимость 1т перевозимого груза, грн; 0,7 - доля груженых вагонов в общем вагонопотоке; 46 - средняя масса груза нетто в одном вагоне, т.

*Суммарные эксплуатационные расходы, грн.:*

$$И\} = 165400 + 79300 + 29000 + 22560 + 13920 = 310180 \text{ грн.}$$

$$И\wedge = 115700 + 27144 + 29900 = 171844 \text{ грн.}$$

Годовой экономический эффект  $\mathcal{E}_{н.х}$  на 1 сортировочную горку:

$$\begin{aligned} & \text{их ПОПАЛА } 365000 \cdot 0,07 + 0,15 \cdot 310180 - 171844 \\ & \mathcal{E}_{н.х} \text{ в } 1120000 \cdot \frac{376000 \cdot 0,05 + 0,15}{0,2} - 1 \cdot \frac{310180 - 171844}{0,2} \cdot x \\ & x \cdot \frac{0,15(1120000 - 890000)}{0,2} - 800000 = \\ & = 1232001 + 519180 - 800000 = 951181 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Срок службы замедлителя РНЗ принят 15 лет, а ЭМЗУ - 20 лет.

Годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E}_r = \mathcal{E}_{\text{НХ}} - (p_2 + E_n) = 951181 \cdot 0,2 = 190236 \text{ грн.}$$

Годовой экономический эффект, приходящийся на новый замедлитель-ускоритель, составит  $190236:32=5945$  грн.