

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА  
УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



**В.В. Процив**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЖЕНИЯ ШАХТНОГО ПОЕЗДА  
РЕЛЬСОВЫМИ ТОРМОЗАМИ**

Монография

Днепропетровск  
НГУ  
2011

УДК 622.625.28  
ББК 33.16  
П84

Рекомендовано до друку вченою радою ДВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол № 10 від 26 жовтня 2011)

Рецензенти:

В.О. Салов, проф., канд. техн. наук, професор кафедри транспортних систем і технологій ДВНЗ «Національний гірничий університет»;

В.В. Скалозуб, проф., д-р техн. наук, завідувач кафедри комп'ютерних інформаційних технологій Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна.

Розглянуто особливості гальмування рейковими гальмами шахтного поїзда з важким шарнірно-зчленованим локомотивом на заданій ділянці рейкової колії з відомими геометричними параметрами.

Для спеціалістів, що працюють у сфері шахтного рейкового транспорту, співробітників вищих навчальних закладів, науково-дослідних і проектно-конструкторських інститутів, а також для студентів машинобудівних і гірничих спеціальностей.

**Проців, В.В.**

П84 Моделирование торможения шахтного поезда рельсовыми тормозами [Текст] / В.В. Проців. – Д.: Национальный горный университет, 2011. – 180 с.

ISBN 978–966–350–315–8

Рассмотрены особенности торможения рельсовыми тормозами шахтного поезда с тяжелым шарнирно-сочлененным локомотивом на заданном участке рельсового пути с известными геометрическими параметрами.

Для специалистов, работающих в сфере шахтного рельсового транспорта, сотрудников высших учебных заведений, научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов, а также для студентов машиностроительных и горных специальностей.

Ил. 52. Библиогр.: 94 назв.

УДК 622.625.28  
ББК 33.16

© В.В. Проців, 2011

ISBN 978–966–350–315–8 © ДНВЗ «Національний гірничий університет», 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЛЬСОВЫХ ТОРМОЗОВ В ШАХТНОМ ЛОКОМОТИВНОМ ТРАНСПОРТЕ .....	5
1.1. Общие сведения.....	5
1.2. Магниторельсовые тормоза.....	6
1.3. Гравитационные тормоза.....	13
1.4. Влияние неровностей и загрязненности рельсового пути на тормозную силу шахтного локомотива .....	14
РАЗДЕЛ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЖЕНИЯ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННОГО ЛОКОМОТИВА РЕЛЬСОВЫМИ ТОРМОЗАМИ.....	16
2.1. Динамическая модель торможения шахтного шарнирно- сочлененного локомотива рельсовыми тормозами .....	16
2.2. Разработка и обоснование использования новых материалов для создания магниторельсовых тормозов.....	29
2.3. Определение рациональной длины секции составного магнитного рельсового тормоза .....	36
2.4. Распределение температур в гравитационном рельсовом тормозе и определение его рациональных параметров.....	46
2.5. Влияние промежуточной среды на реализацию тормозной силы гравитационным рельсовым тормозом .....	53
РАЗДЕЛ 3. ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ПУТИ НА РЕАЛИЗАЦИЮ ТОРМОЗНОЙ СИЛЫ РЕЛЬСОВЫМИ ТОРМОЗАМИ.....	65
3.1. Влияние ступеньки рельсового стыка пути на эффективность торможения секционным магниторельсовым тормозом.....	65
3.2. Ослабление тормозной силы секции магниторельсового тормоза на единичных неровностях рельсовых путей.....	70
3.3. Ослабление тормозной силы секции магниторельсового тормоза на длинных неровностях рельсовых путей.....	80
3.4. Моделирование торможения шахтного поезда магниторельсовыми и гравитационными тормозами.....	88
РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННОГО ЛОКОМОТИВА.....	97
4.1. Секционный магниторельсовый тормоз.....	97
4.2. Повышение тормозной силы, реализуемой магниторельсовым тормозом на криволинейных участках пути .....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	102
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	104
Приложение А.....	111
Приложение Б .....	177

## ВВЕДЕНИЕ

Рельсовый локомотивный транспорт является основным средством транспортирования горной массы, оборудования, людей и материалов по горизонтальным выработкам горных предприятий. Но надежность тормозных систем шахтных локомотивов не позволяет увеличивать его производительность при безопасной эксплуатации, особенно при подземной добыче угля, главного энергоносителя Украины. Поскольку современные локомотивы обладают достаточным запасом по тяге, но имеют существенные ограничения по тормозным характеристикам, то увеличение эффективности перевозок подземным рельсовым транспортом может быть достигнуто, в том числе, и за счет совершенствования тормозных устройств новых и модернизируемых шахтных локомотивов.

Увеличение производительности внутришахтного рельсового транспорта возможно при увеличении массы и скорости движения поезда, и зависит от применяемых на локомотиве тормозных устройств. Шахтные локомотивы должны иметь многократное резервирование тормозных устройств и использовать тормозные системы различных видов, как реализующих тормозную силу в точке контакта колеса и рельса, так и непосредственным контактом с рельсовым путем. Для тормозных устройств первого вида (с ограниченным фрикционным моментом в точке контакта колеса и рельса), каковыми есть колесно-колодочные, дисковые осевые и трансмиссионные тормоза, а также динамическое торможение тяговыми двигателями, огромное значение имеют специфические условия эксплуатации шахтных локомотивов. Это – наличие различного вида загрязнений дорожек катания рельсов, формирующих низкий коэффициент сцепления колес с рельсами, плохое качество укладки и поддержания шахтных рельсовых путей, агрессивные рудничные воды, высокая влажность и запыленность шахтной атмосферы. Тормозные устройства второго вида (с непосредственным трением о рельсы), то есть электромагнитные рельсовые, магниторельсовые и гравитационные рельсовые тормоза от части лишены некоторых недостатков устройств первого вида, но применение их ограничено отсутствием надежных конструкций, эффективно работающих на шахтных рельсовых путях со значительными несовершенствами.

Тормозной путь, который проходит шахтный поезд в случае экстренного торможения, зависит от конструкции тормозных устройств, уклона и загрязненности рельсового пути, массы и скорости движения состава груженых вагонов перед началом торможения. Использование рельсовых тормозов снижает тормозной путь поезда, но поскольку развиваемая ими тормозная сила до последнего времени не регулировалась, то при их включении возникали существенные продольные динамические нагрузки на подвижной состав.

На шахтах и рудниках локомотивы работают на сравнительно небольших участках рельсовых путей, а наиболее тяжелые поезда в грузовом направлении движутся вниз по уклону, потому наиболее крутые спуски могут быть заранее определены как потенциально опасные, а их геометрические параметры измерены.

Книга предназначена для инженерных и научных работников, занимающихся вопросами шахтного рельсового транспорта, а также студентов высших учебных заведений горного профиля. Читать ее удобнее после ознакомления с [47].

## РАЗДЕЛ 1

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЛЬСОВЫХ ТОРМОЗОВ В ШАХТНОМ ЛОКОМОТИВНОМ ТРАНСПОРТЕ

#### 1.1. Общие сведения

Важнейшее значение при увеличении объемов добычи полезных ископаемых приобретают безопасные способы работы и использования оборудования, которое, обладая высокой производительностью, способно обеспечить снижение производственного травматизма и исключить несчастные случаи, особенно со смертельным исходом.

Наиболее широко на шахтах Украины применяются аккумуляторные и контактные электровозы постоянного тока. Они являются основным транспортным средством на откаточных выработках рудников и угольных и шахт. Локомотивная откатка на угольных шахтах выполняет перевозки около 70 %, а на подземных рудниках – почти 100 % грузопотока. Это объясняется тем, что при значительном расстоянии транспортирования целесообразно применять именно локомотивный транспорт в отличие от конвейерного, эффективного при сравнительно небольшой протяженности магистральных выработок с постоянно высоким грузопотоком [86]. Среди достоинств шахтных локомотивов универсальность, экономичность, простота, достаточная надежность и возможность применения для перевозки людей. К недостаткам можно отнести низкие тягово-тормозные характеристики при использовании локомотивной откатки на грязных рельсовых путях, особенно на участках со значительным продольным уклоном, что ограничивает производительность внутришахтного транспорта по скорости движения и массе прицепной части поезда.

Исследованием магниторельсовых тормозов для шахтных и рудничных локомотивов, а также карьерных тяговых агрегатов и маневровых локомотивов занимались В.П. Абрамов, Н.П. Балабан, Л.В. Балон, О.В. Бесценная, В.Н. Дорожкин, В.Д. Елманов, В.В. Зиль, Д.Э. Карминский, Л.М. Краплин, В.Ф. Криворученко, Ю.А. Курников, А.В. Новицкий, А.А. Ренгевич, В.А. Салов, В.И. Серов, В.П. Тюрин, М.Д. Фокин, В.Б. Шашкин, Г.М. Широков, Н.С. Шляхов, И.Г. Штокман, и другие.

Исследования, относящиеся к вопросам пространственного движения, а также формирования сил тяги и торможения магистральных и промышленных локомотивов, описаны в работах Е.П. Блохина, М.Ф. Вериги, А.М. Бабичкова, В.Г. Иноземцева, М.Л. Коротенко, С.М. Куценко, В.А. Лазаряна, Н.С. Полякова, Л.М. Пыжевича, Н.А. Радченко, Н.М. Хачануридзе и др. Многие вопросы, связанные с изучением и улучшением тягово-тормозных характеристик шахтных локомотивов и тяговых агрегатов, а так же влияние несовершенств рельсового пути освещены в многочисленных трудах С.Е. Блохина, В.Ф. Ганкевича, А.Л. Жупиева, К.А. Зиборова, А.Я. Когана, Б.А. Кузнецова, С.И. Лопатина,

Э.Г. Лоу, В.В. Мишина, Е.Е. Новикова, В.В. Скалозуба, Н.С. Полякова, П.С. Шахтаря, Л.Н. Ширина, Э.М. Шляхова, В.Г. Шорина и других.

По данным МакНИИ на шахтах Украины суммарная длина выработок с уклоном рельсового пути от 6 до 40 ‰ составляет 35 % всей протяженности откаточных выработок. До недавнего времени отечественные шахтные электровозы оборудовались только колесно-колодочными тормозами с ручным приводом, имеющим сравнительно большое время срабатывания. Поэтому развивать максимальную предусмотренную технической характеристикой скорость они не могли, прежде всего, из-за ограничений по длине тормозного пути при экстренном торможении, который в соответствии с требованиями безопасности [45, 87] для состава груженых вагонеток на преобладающем уклоне не должен превышать 40 м, а при перевозке людей – 20 м. Кроме того, из-за сложности конструкции, трудностей при эксплуатации и в связи с отсутствием экономической целесообразности, в рудничных поездах средства торможения устанавливаются только на локомотивах.

Для экономии электроэнергии на шахтах и рудниках порожние вагонетки (более легкие) локомотив транспортирует в гору, а груженный поезд движется по уклону вниз. Поэтому его максимальные масса и скорость движения обычно определяются исходя не из тяговых характеристик локомотива и расчета нагрева обмоток двигателя, а по условиям обеспечения требуемого правилами безопасности тормозного пути при экстренном торможении на спуске. Это равноценно уменьшению производительности локомотивной откатки от 15 до 30 %.

Рельсовые тормоза предназначены для увеличения тормозной силы шахтного поезда. Их устанавливают непосредственно на локомотиве или на специальной платформе и используют для режимов экстренного и служебного торможения. По принципу действия рельсовые тормоза разделяют на магнитные и гравитационные.

## 1.2. Магниторельсовые тормоза

Огромным шагом на пути совершенствования тормозных устройств рельсового подвижного состава стало создание электромагнитных рельсовых тормозов. Преимущество магниторельсовых тормозов над тормозами, использующими силы фрикционного сцепления колеса и рельса, заключается в том, что тормозная сила не зависит от веса экипажа, на котором они установлены, и реализуется непосредственным взаимодействием тормоза с рельсом [2, 3, 4, 7, 8].

Магниторельсовые тормоза разделяют на тормоза с электромагнитами и постоянными магнитами. По конструкции магнитопровода существуют два основных типа магнитных тормозов с поперечным и продольным замыканием магнитного потока относительно рельса. На практике широкое распространение получили тормоза с поперечным замыканием магнитного потока. Достоинствами тормозов этого типа по сравнению с тормозами продольного замыкания магнитного потока являются простота конструкции, технологичность в изготовлении, меньшие габариты по ширине, меньшее сопротивление магнитной цепи. Тормоза с продольным замыканием магнитного потока нашли примене-

ние на электровозах с большой жесткой базой, поскольку они помещаются между колесами [66].

Рельсовый электромагнитный тормоз представляет собой нейтральный электромагнит постоянного тока и состоит из стального сердечника, полюсов, полюсных наконечников и катушки возбуждения. Тормоза подвешивают на пружинах к раме или буксам экипажа над рельсами с зазором, обеспечивающим отсутствие ударов тормоза о рельсы во время движения без торможения. Тормозная сила, реализуемая при трении тормозов о рельсы, через специальные упоры или тяги передается на раму локомотива и далее всему составу.

Важнейшей характеристикой рельсовых магнитных тормозов является нагрузочная характеристика – зависимость силы магнитного притяжения тормоза к рельсу от намагничивающей силы.

При установке электромагнитных тормозов на контактных электровозах питание катушки возбуждения осуществляется непосредственно от контактной сети или от двигателей, работающих в генераторном режиме. Во втором случае полная остановка поезда рельсовыми тормозами невозможна.

При установке тормозов на аккумуляторных электровозах питание катушек возбуждения от двигателей нецелесообразно, ввиду автономности источника питания.

Реализуемая рельсовым тормозом тормозная сила пропорциональна его длине, которая ограничивается пространством между колесами экипажа. Поэтому при проектировании тормозов возникает необходимость выбора оптимальных параметров магнитопровода и источника магнитного поля, обеспечивающих максимальную силу магнитного притяжения тормозов к рельсам, а также надежность срабатывания тормозов при заданных габаритных размерах.

Впервые вопрос о целесообразности использования рельсовых электромагнитных тормозов на шахтном подвижном составе был поставлен А.А. Ренгевичем в 1950 г. [64]. В работе [63] приведены полученные экспериментально в лабораторных условиях нагрузочные характеристики рельсовых тормозов фирмы “МИЭКЭ” и установлены значения оптимального зазора между полюсными наконечниками (от 10 до 15 мм), допустимой плотности тока при длительном режиме включения ( $3 \text{ А/мм}^2$ ), жесткости пружин подвески, обеспечивающей срабатывание тормоза. Затем были рассмотрены вопросы конструирования и расчета тормозов [65, 67, 70]. Расчет сводился к определению силы электромагнитного притяжения и намагничивающей силы катушки по заданной средней магнитной индукции в рабочем зазоре. При этом магнитный поток рассеивания принимали равным 20 % общего потока, магнитным сопротивлением технологических зазоров пренебрегали.

Позже в работе [71] дается теоретическое обоснование рациональных параметров рельсовых тормозов для рудничных локомотивов. Получены формулы для определения рационального зазора между полюсными наконечниками и сечения магнитопровода, обеспечивающего максимальную силу электромагнитного притяжения. Однако принятые допущения о постоянстве магнитной проницаемости материала магнитопровода и соответствии максимальной магнитной индукции в рабочем зазоре максимальной силе притяжения приводили

к грубым ошибкам. Считалось, что электродинамические усилия, возникающие в результате взаимодействия магнитного потока тормоза с вихревыми токами, индуцируемыми в рельсе при скольжении тормоза, составляют от 20 до 35 % от общей тормозной силы.

В отечественной литературе приводятся результаты [11, 12, 75, 84, 91] исследования коэффициента трения скольжения рельсового тормоза. В работах зарубежных авторов [93, 94] так же даны значения коэффициентов трения без учета влияния скорости движения. Рекомендуемые для расчетов тормозных сил значения коэффициента трения скольжения составляют от 0,06 до 0,10.

Достаточно серьезно исследованы рельсовые тормоза подвижного состава городского и железнодорожного транспорта [12, 14, 16, 17, 18, 19, 85, 88]. На основе комплексных исследований рельсовых тормозов трамваев [88] и с учетом результатов исследований рельсовых тормозов за рубежом разработана методика расчета и получены параметры для решения тормозных задач. Экспериментально установлены зависимости коэффициента трения тормоза о рельсы от скорости движения для скоростей до 40 км/ч. При этом силу электромагнитного притяжения устанавливали расчетом по значению средней магнитной индукции в рабочем зазоре, определяемой экспериментально индукционно-импульсным методом. Тормозное усилие, реализуемое рельсовыми тормозами, определяли ориентировочно из уравнения движения по значениям тормозного пути и скорости движения. Методика расчета тормозов сводилась к определению силы притяжения и намагничивающей силы по заданной средней магнитной индукции в рабочем зазоре. Необходимые для расчета магнитной цепи тормоза параметры (коэффициент рассеивания, значения технологических и эквивалентного рабочего зазоров) определяли экспериментально. Влияние отдельных геометрических факторов магнитной цепи на величины коэффициента рассеивания и эквивалентного рабочего зазора не исследовано. Поэтому использование полученных данных при проектировании рельсовых тормозов для оценки влияния сечения магнитопровода, типа рельса, зазора между полюсными наконечниками и степени изношенности наконечников на величину силы электромагнитного притяжения сопряжено с трудностями. Предложен расчет времени срабатывания тормозов с учетом высоты подвеса над рельсом и особенностей магнитопровода. Влияние жесткости пружин подвески на величину времени срабатывания тормоза не учитывалось.

Для шахтных электромагнитных тормозов [75] рассмотрены вопросы методики расчета и создания конструкции с поперечным потоком во взрывобезопасном исполнении. Предложено учитывать неоднородности магнитного поля в зоне контакта тормоза и рельса при определении электромагнитной силы. Электромагнитная сила притяжения определялась расчетом по формуле Максвелла с использованием экспериментально полученной картины поля в зоне контакта тормоза и рельса при их относительном покое и экспериментально – динамометром при отрыве тормоза от рельса. Тормозное усилие измерялось электрическим динамометром, непосредственно связывающим тормоз с рамой электровоза. Рассмотрена зависимость электромагнитной силы притяжения от смещения продольных осей тормоза и рельса при их относительном покое и

при различных значениях зазора между полюсными наконечниками, экспериментально получена в шахтных условиях зависимость коэффициента трения скольжения от скорости движения рельсового тормоза.

Проводились сравнительные испытания конструкций тормозов с поперечным и продольным замыканием магнитного потока [85]. В лабораторных условиях на маховой установке экспериментально исследованы их электромагнитные, тяговые и тормозные характеристики. Трущимися элементами являлись чугунный обод маховой установки, имитирующий «бесконечный» рельс, и модели рельсового тормоза с поперечным и продольным потоками. Такая постановка эксперимента отличается от реальных условий работы рельсового тормоза, где трущимися элементами являются тормоз – рельс. Электромагнитная сила притяжения (тяговая характеристика) определялась расчетом из условий энергетического баланса рассматриваемой системы без учета потоков рассеивания и методом отрыва с помощью вагонного домкрата. Тормозная сила рассчитывалась по электромагнитной силе и коэффициенту трения, определяемому по эмпирической формуле для трущейся пары чугунная колодка – колесо колесной пары.

Сравнительные исследования показали, что модель тормоза с поперечным потоком имеет преимущество, заключающееся в реализации большей тормозной силы при одинаковой намагничивающей силе их катушек в диапазоне скоростей движения от 25 до 75 км/ч. При скорости торможения 25 км/ч величина удельной тормозной силы у модели тормоза с продольным потоком на 11,5 % меньше, чем у тормоза с поперечным потоком. В работе [14] не дана количественная оценка тормозных характеристик обеих моделей тормозов в диапазоне скоростей от нуля до 20 км/ч, характерных для рудничной электровозной откатки. Отсутствует количественная оценка влияния размагничивающего действия поля вихревых токов и потерь на циклическое перемагничивание.

Чаще всего в исследованиях рельсовых тормозов для железнодорожного и городского транспорта электромагнитная сила притяжения определялась расчетом по формуле Максвелла исходя из среднего значения магнитной индукции, замеренной в зоне контакта тормоза и рельса индукционно-импульсным методом или динамометром при отрыве тормоза. При этом вопрос влияния смещения продольных осей тормоза и рельса на эффективность работы тормоза с поперечным замыканием магнитного потока не рассматривался из-за отсутствия значительных отклонений продольной оси тормоза от соответствующей оси рельса ввиду достаточно жестких требований, предъявляемых к состоянию рельсового пути магистрального железнодорожного транспорта. В работе [75] установлено, что определить влияние вихревых токов на процесс торможения существующими методами практически невозможно.

Для электромагнитных рельсовых тормозов, применяемых на промышленном и магистральном железнодорожном транспорте [11, 12, 14, 15] установлены зависимости тормозной силы от скорости движения, удельного давления на рельс, материала межполюсной вставки и полюсов, силы магнитного притяжения тормоза от величины воздушного зазора между полюсом тормоза и рельсом.

По результатам исследования подвески электромагнитного рельсового тормоза скоростного поезда ЭР-200 [91] на рудничных локомотивах, в качестве стояночного предложен магниторельсовый тормоз на постоянных магнитах с продольным замыканием магнитного потока, а в работе [90] разработан метод определения силы электромагнитного притяжения к рельсу тормоза с продольным замыканием магнитного потока в движении. Даны экспериментальные зависимости тормозной силы электромагнитного рельсового тормоза от скорости движения и смещения оси тормоза относительно головки рельса. Предложена конструкция рельсового тормоза с продольным замыканием магнитного потока относительно головки рельса во взрывозащищенном исполнении. Получена экспериментальная зависимость величины индукции в рабочем зазоре с продольным замыканием магнитного потока при наличии размагничивающего действия вихревых токов и циклического перемагничивания. Однако отсутствует аналитический аппарат, описывающий электродинамические процессы, происходящие в рельсе при движении тормозного блока.

Особое внимание уделено подвеске магниторельсового тормоза [10, 26]. Доказано, что электромагнитные рельсовые тормоза шахтных электровозов с низкой подвеской не надежны. Для повышения надежности предложена и исследована высокая подвеска тормоза, оснащенная пневмо- или гидроцилиндрами, системой привода тормозного блока за счет действия гравитационных сил.

По результатам [92] исследований магниторельсовых тормозов на постоянных магнитах с продольным замыканием магнитного потока доказана их перспективность, но при расчетах магнитной системы размагничивающее действие вихревых токов в рельсе не учитывалось. В работах [5, 6] разработана математическая модель магнитной системы рельсового тормоза на постоянных магнитах с магнитным компенсатором, даны зависимости для определения геометрических параметров магнитной системы с продольным замыканием магнитного потока, рассмотрена математическая модель магнитного сопротивления рельса, учитывающая распределение рабочего потока тормоза по всему сечению рельса, рассчитаны параметры системы отключения тормоза методом нейтрализации магнитного потока, приведены результаты лабораторных испытаний рельсового тормоза на постоянных магнитах с продольным замыканием магнитного потока. По своей эффективности предложенный тормоз уступал аналогичным электромагнитным рельсовым тормозам, а система отключения методом нейтрализации магнитного потока оказалась склонной к заклиниванию и в шахтных условиях не работоспособной.

Достаточно успешным оказался опыт использования на шахтном кабельном электровозе ЭШК-10 двухсекционного магниторельсового тормоза на постоянных магнитах [23] с поперечным замыканием магнитного потока. Опускание тормозов выполнялось силами гравитации, а поднимался тормоз гидроцилиндрами. Взаимные продольные перемещения секций позволяли им самоустанавливаться на головке рельса, обеспечивая максимальную силу магнитного притяжения.

В целом, несмотря на ряд теоретических и экспериментальных исследований рельсовых электромагнитных тормозов [68], созданные на этой основе

методы расчета являются приближенными. Они не позволяют оценить влияние на величину силы магнитного притяжения неоднородности магнитного поля в рабочем зазоре, типа рельсов, величины зазора между полюсными наконечниками, изношенности наконечников. Методы расчета предусматривают определение намагничивающей силы при заданных геометрических параметрах магнитопровода и средней магнитной индукции в рабочем зазоре. Такая постановка задачи затрудняет выбор оптимальных параметров тормоза, так как именно намагничивающая сила определяет размеры магнитного блока и, следовательно, геометрию магнитопровода.

В работе [90] приведены тормозные характеристики рельсовых электромагнитных тормозов, полученные в результате промышленных испытаний. Графики показывают падающий характер зависимости тормозной силы от скорости движения локомотива, однако объяснения причин этого явления не приведено из-за влияния на результаты эксперимента множества разноплановых факторов.

В литературе отсутствуют теоретические методы расчета жесткости пружин подвески, от правильного выбора которых зависят надежность и время срабатывания магниторельсовых тормозов. Отсутствуют достоверные данные по исследованию в шахтных условиях зависимости коэффициента трения тормоза о рельсы от скорости движения и времени срабатывания, – основных параметров, необходимых для решения тормозных задач.

Необходимы также исследования влияния на эффективность торможения ступенек и проседаний рельсовых стыков, искривлений рельсовых нитей в плане и профиле, загрязнений рельсов и влияния промежуточной среды, температурных характеристик при реальных режимах эксплуатации, интенсивности износа полюсных наконечников. Нет конструкций, позволяющих регулировать величину тормозной силы в движении.

Представляет интерес использование для рудничных электровозов рельсовых тормозов, состоящих из нескольких секций, установленных в продольном направлении (составных или секционных магниторельсовых тормозов). Эти тормоза сохраняют примерно постоянную площадь рабочей поверхности при смещениях относительно рельса, вследствие чего их тормозная сила более стабильна.

Магнитная сила притяжения тормоза к рельсу – основной параметр, необходимый для оценки качества конструкции рельсовых тормозов. Существующие методы определения магнитной силы позволяют производить ее измерение только при относительном покое тормоза и рельса и лишь приблизительно в движении. Для сравнительной оценки тормозов с поперечным и продольным потоками необходим учет следующих факторов: смещения продольных осей тормоза и рельса, радиусов закруглений рельсового пути, размагничивающего влияния поля вихревых токов, циклического перемагничивания, а существующие методы определения магнитной силы не позволяют этого сделать. В полной мере можно дать сравнительную оценку только при определении магнитной силы в режиме скольжения тормоза по рельсу.

Существующие методики расчета рельсовых тормозов предусматривают определение тормозных характеристик по экспериментальному значению ко-

ээффициента трения от скорости движения при статической электромагнитной силе, что не отражает физики явлений в зоне взаимодействия, возникающих при движении тормоза по рельсу. Главными параметрами рельсовых тормозов являются магнитная и тормозная силы. Методы исследования этих параметров оказывают существенное влияние на достоверность методик расчета рельсовых тормозов и их тормозных характеристик. Поэтому при анализе работ этим вопросам уделено основное внимание.

При торможении шахтного локомотива поверхность контакта рельсового тормоза и рельса разделена промежуточной средой, содержащей продукты износа трущихся тел, частицы перевозимой горной массы, капельную влагу и другие компоненты, образующие многокомпонентную среду, содержащую твердые загрязнения, составляющие 80 % поверхностных загрязнений, представляющие собой продукты износа материала колодок, колес, рельсов, износа частиц, попадающих под колеса поезда, и коррозионного разрушения материала. Находясь в зоне трения тормоза и рельса, они испытывают очень большие нормальные и касательные нагрузки. Под действием механических напряжений и воздействием адсорбционно-активных жидких и газообразных веществ, происходит измельчение твердых частиц, в результате чего их первоначальные размеры уменьшаются в десятки и сотни раз. Наиболее вероятные средние размеры частиц твердых загрязнений составляют от 0,1 до 0,3 мкм, что во много раз меньше толщины слоя поверхностного загрязнения дорожек трения тормоза и рельса. На вынос загрязнений из зоны трения оказывает влияние также наличие таких факторов, как повышенное давление в зоне трения, избыток влаги и смазки, которые размягчают коллоидное загрязнение и способствуют его более легкому выдавливанию из зоны трения.

Делая выводы можно считать, что существует два способа определения магнитной силы притяжения при относительном покое тормоза: первый основан на магнитных измерениях индукции в зоне контакта с последующим расчетом по формуле Максвелла, второй – на механических измерениях силы отрыва тормоза от рельса. Магнитная сила, определенная при относительном покое тормоза, считается практически равной силе, реализуемой при скольжении тормоза по рельсу. Используют два способа определения тормозной силы, первый основан на расчете по электромагнитной силе и принятому или экспериментально полученному коэффициенту трения, второй – на экспериментальном измерении электрическим динамометром, непосредственно связывающим тормоз с рамой электровоза. Измерение тормозной силы электрическим динамометром дает более достоверные результаты.

В полной мере дать оценку качества конструкции рельсовых тормозов можно только при определении магнитной и тормозной сил в режиме скольжения тормоза по рельсу, так как при этом проявляется размагничивающее влияние поля вихревых токов, циклическое перемагничивание, смещение продольных осей тормоза и рельса [36, 37]. Такая постановка вопроса предопределяет иной подход к методике расчета рельсовых тормозов и определению их характеристик. Применяемые методы измерения электромагнитной силы притяжения при относительном покое тормоза и рельса не дают возможности выполнить

достоверную оценку качества конструкции. Отсутствует учет влияния смещения продольных осей тормоза и рельса, радиусов закруглений рельсового пути на электромагнитную и тормозную силы в режиме скольжения тормоза по рельсу. Электромагнитные рельсовые тормоза могут использоваться только в качестве резервных из-за относительно низкой надежности, связанной с высокой интенсивностью отказов электрических устройств, обеспечивающих работу тормоза, и большим энергопотреблением. Рельсовые тормоза на постоянных магнитах с продольным замыканием магнитного поля, оборудованные системой отключения методом нейтрализации магнитного потока, по своей надежности и эффективности уступают электромагнитным.

Фрикционная пара тормозной блок – рельс имеет неудовлетворительные фрикционные свойства, что ведет к снижению эффективности тормоза с увеличением скорости движения.

Повысить надежность и эффективность рельсовых тормозов можно за счет применения постоянных магнитов в качестве источника силы магнитного притяжения, выбора рациональных параметров тормоза, использования секционирования и подвижного соединения секций [73, 74].

В литературе отсутствуют нормативы для выбора материала магнитопроводов и постоянных магнитов рельсовых тормозов, оценки стабильности их свойств при воздействии тепловых и динамических нагрузок, размагничивающего действия вихревых токов рельса.

Не разработана методика расчета магнитной цепи рельсовых тормозов на постоянных магнитах с учетом размагничивающего действия вихревых токов рельса и нагрева магнитов, отсутствует методика расчета параметров магниторельсовых тормозов секционной конструкции. Требуется дополнительных исследований системы подвески, привода, передачи тормозного усилия и отключения тормоза с целью дальнейшего их совершенствования. В настоящее время отсутствуют конструкции подвески длинных магниторельсовых тормозов, размещаемых вне жесткой базы локомотива.

### 1.3. Гравитационные тормоза

Из-за особенностей конструкции подвески существующих шахтных локомотивов (буксовая) на них пока не нашли широкого применения рельсовые гравитационные тормоза. Исключение составляет электровоз Э10, оборудованный гидравлическим приводом подвески ходовой части [40]. В нем пружины подвески расположены горизонтально и с одной стороны упираются в рычаги буксовых узлов, а с другой – в штоки гидроцилиндров подвески. В случае аварийного торможения или просто для стоянки, поезда рабочая жидкость из гидроцилиндров сливается в маслобак и под действием силы тяжести локомотив опускается на колодки гравитационного тормоза, установленные между колесами. Такое решение позволяет гарантированно остановить и удержать локомотив при стоянке на пути с любым уклоном, поскольку энергия гравитации неистощима.

Единственным недостатком существующего гравитационного тормоза шахтного локомотива есть отсутствие регулирования тормозной силы, – она

всегда включается на полную величину и действует до поднимания локомотива гидроцилиндрами подвески.

Практически никаких серьезных исследований гравитационных рельсовых тормозов для шахтных локомотивов пока нет.

#### 1.4. Влияние неровностей и загрязненности рельсового пути на тормозную силу шахтного локомотива

Тормозная сила, реализуемая рельсовыми тормозами (магниторельсовый, гравитационный) в значительной мере зависит от качества рельсовой колеи, по которой движется локомотив. Существенное влияние имеют несовершенства пути, а также фрикционные характеристики пар трения колодка рельсового тормоза – рельс [32].

Главной особенностью шахтного рельсового пути есть узкоколейность и малая величина балластного слоя или его полное отсутствие [52]. Хотя нормативами укладки пути [21] предусмотрена подсыпка из щебня или гравия толщиной 500 мм, в балласт укладывают любой имеющийся материал, чаще всего это вмещающие породы, физико-механические свойства которых не соответствуют функции балластного основания рельсового пути. К тому же толщина подсыпки обычно незначительна и определяется только задачами выравнивания подошвы горной выработки. На временных путях балласт отсутствует вообще. Кроме того, подвижность горных пород во времени изменяет геометрические параметры рельсового пути, что требует регулярного наблюдения и своевременного ремонта.

Характерными отступлениями от нормативов (несовершенствами) являются увеличенные межшпальные расстояния, отсутствие шпальных подкладок, неправильно выполненная подуклонка рельсов, плохое состояние стыков и стрелочных переводов, локальные прогибы рельсовых нитей.

Значительные проблемы для рельсовых тормозов создают уширения колеи, износ поверхностей катания рельсов и бандажей колес. Для магниторельсовых тормозов это уменьшает площадь контакта полюсных наконечников с головкой рельса и, соответственно, уменьшает силу магнитного притяжения, а, следовательно, – и тормозную силу. Правилами безопасности допускается уширение пути на 4 мм и сужение на 2 мм против номинальной ширины рельсовой колеи, а отраслевым стандартом [87] допускается уширение рельсовой колеи на 10 мм и сужение на 2 мм при номинальных значениях ширины колесной пары 890 и 590 мм (соответственно для колеи 900 и 600 мм). Реальное уширение рельсовой колеи [43] равно семи- и даже восьмикратным значениям допусков, предусмотренных правилами безопасности, что составляет до 32 мм. При таких уширениях рельсовой колеи относительное смещение продольных осей магниторельсового тормоза и рельса составит от 19 до 21 мм, поэтому тормоз может не сработать при опускании на рельс [75]. Включение тормоза произойдет при наезде на искривленный в плане рельс при меньших смещениях осей тормоза и рельса, но при этом увеличится время срабатывания. Единственным способом борьбы с этим явлением может быть только конструкция самого тормоза (сек-

ционированного в продольном направлении), а также его подвеска, минимизирующая отклонение рельсового тормоза от дорожки катания рельса.

Чаще всего рельсовые стыки имеют вертикальные ступеньки и проседания. Длина рельсов, опускаемых в шахту под клетью зависит от размеров ствольных сооружений, и обычно составляет от 4 до 6 м. Для экономии рельсов используют даже короткие их обрезки, что увеличивает общее количество рельсовых стыков до 45 штук на 100 м пути (на обоих рельсах), а сами стыки часто оказываются расположенными вне шпал. При этом из-за неудовлетворительной фиксации концов рельсов относительно друг друга (по причине недостатка накладок и болтовых соединений), они со временем деформируются под действием ударных нагрузок от колес движущегося подвижного состава и приобретают изгиб профиля радиусом от 10 м до 70 м.

Из-за нарушений периодичности укладки шпал и проседания балластного слоя пути образуются сравнительно короткие (до 3 м) локальные прогибы рельсовых нитей, радиус кривизны которых составляет от 30 м до 70 м. Единичные длинные и короткие, систематические и локальные несовершенства пути создают помехи и при формировании тормозной силы колесами и рельсовыми тормозами [20].

Значительная часть рельсовых загрязнений находится в аморфном состоянии. Загрязнения представляют собой полидисперсную систему, средняя толщина которой примерно в десять раз превышает наиболее вероятные размеры частиц. Именно эти поверхностные слои в зоне контакта во многом определяют скольжение полюсного наконечника магниторельсового или тормозной колодки гравитационного тормоза по рельсу.

## РАЗДЕЛ 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЖЕНИЯ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННОГО ЛОКОМОТИВА РЕЛЬСОВЫМИ ТОРМОЗАМИ

#### 2.1. Динамическая модель торможения шахтного шарнирно-сочлененного локомотива рельсовыми тормозами

Динамические характеристики традиционных двухосных шахтных локомотивов достаточно хорошо исследованы в режиме тяги на прямых и криволинейных участках пути [51, 54]. Предпринимались попытки создания математических моделей шахтных шарнирно-сочлененных локомотивов для условий движения в установившемся режиме по идеальной кривой без учета упруго-диссипативных параметров пути [35, 79]. Однако для современного шахтного шарнирно-сочлененного локомотива необходима динамическая модель, учитывающая переходные режимы, в том числе режим торможения рельсовыми тормозами, как на прямых, так и в криволинейных участках реальных шахтных рельсовых путей. Должны быть учтены также пространственные колебания элементов локомотива и рельсошпальной решетки пути под воздействием систематических и единичных неровностей.

Для составления расчетной схемы выбрана модель шарнирно-сочлененного шахтного локомотива Э10. Его ходовая тележка, показанная на рис. 2.1, оборудована гравитационными рельсовыми 1 и магниторельсовыми 2 тормозами (помимо установленного на валу приводного электродвигателя 3 трансмиссионного дискового тормоза 4, а также осевых дисковых 5 и колесно-колодочных тормозов 6). Гравитационные тормоза размещены между колесами тележки тяговой секции, а магниторельсовые – вне ее жесткой базы. Магниторельсовые тормоза выполнены секционированными и могут иметь до трех секций в каждом тормозном устройстве.

Приведенные ниже исследования есть дополние рельсовыми тормозами, как это показано на рис. 2.2, расчетной схемы торможения шахтного поезда [47], описывающей использование тормозных устройств шарнирно-сочлененного локомотива, создающих тормозную силу в точке контакта колеса и рельса (колесно-колодочные, дисковые осевые и трансмиссионные тормоза, а также динамическое торможение тяговыми двигателями). Поэтому все остальные обозначения в динамической модели остаются неизменными. Здесь и далее для обозначения переменных дополнительно приняты следующие основные нижние индексы, определяющие принадлежность переменной к определенному объекту динамической модели:

$m\ ijm$  – к  $m$ -й секции ( $m = 1, 3$ ) секционного магниторельсового тормоза, установленного возле  $j$ -го колеса  $i$ -й секции, при чем 1 обозначена первая по ходу движения секция тормоза;

$g\ ij$  – к гравитационному тормозу, установленному возле  $j$ -го колеса  $i$ -й секции.

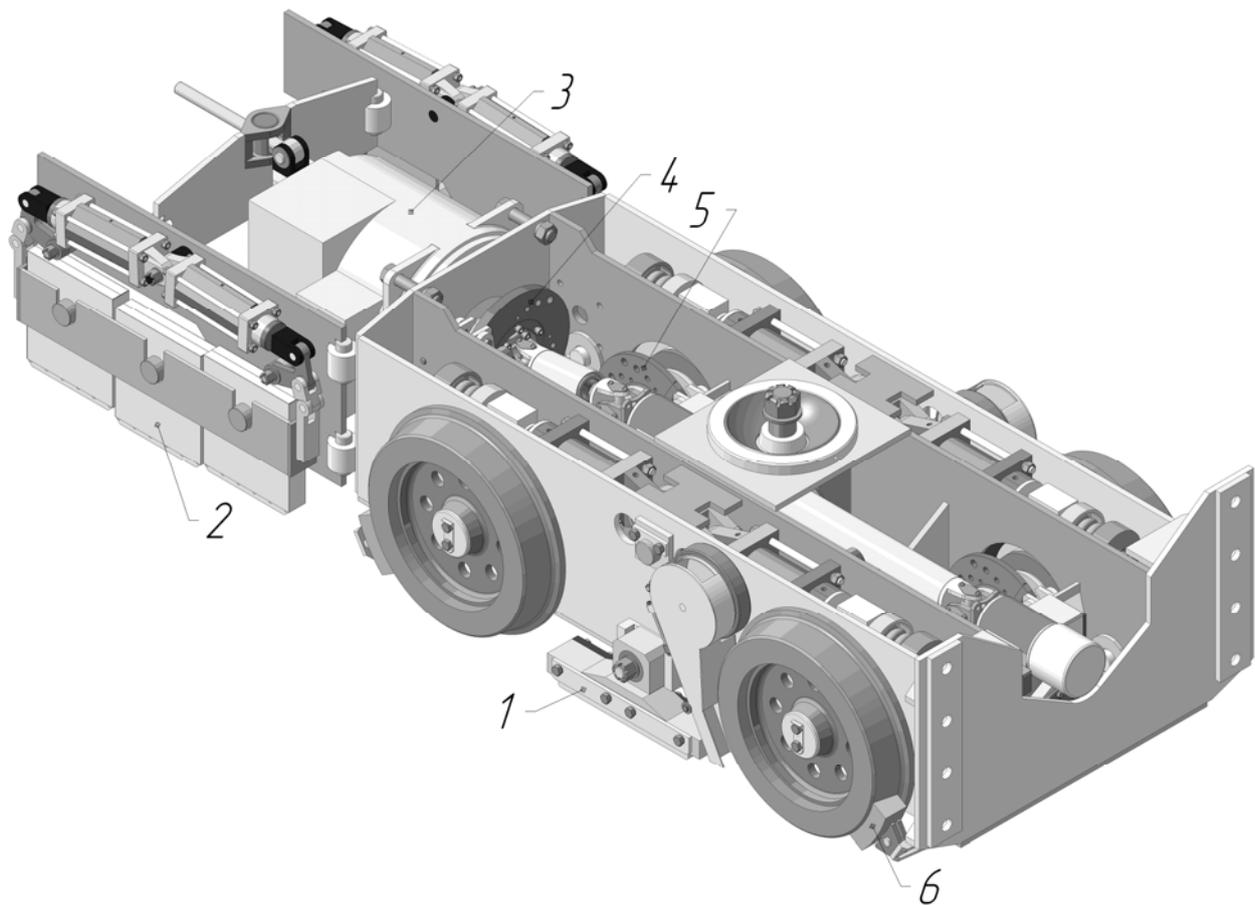


Рис. 2.1. Ходовая тележка локомотива Э10

Индекс  $m$  может употребляться в математических выражениях самостоятельно как коэффициент и показатель степени, обозначающий количество секций магниторельсового тормоза.

Локомотив (см. рис. 2.2) состоит из средней секции 1, опирающейся на две тяговые секции 2, оборудованные, в том числе, рельсовыми тормозами двух типов (гравитационный 3 и магнитный 4). Масса секции магниторельсового тормоза равна  $m_{m ij}$ , а масса гравитационного –  $m_{g ij}$ , кг. Поскольку массы гравитационных тормозов практически равны между собой, как и массы секций магниторельсового (отклонения не превышают 3 %), то их можно обозначать  $m_j$  и  $m_g$  соответственно. Тормозная сила, возникающая при включении секции магниторельсового тормоза, обозначена  $F_{m ij}$ , а тормозная сила гравитационного –  $F_{g ij}$ .

Принимая во внимание конструктивные особенности шарнирно-сочлененного локомотива помимо [47] можно записать следующие уравнения связи между дуговыми координатами секций магниторельсовых и гравитационных рельсовых тормозов:

$$\begin{aligned}
 S_{g ij} &= S_i; \\
 S_{m ij} &= S_i + (-1)^i [a_m + (m-1)(L+l)],
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

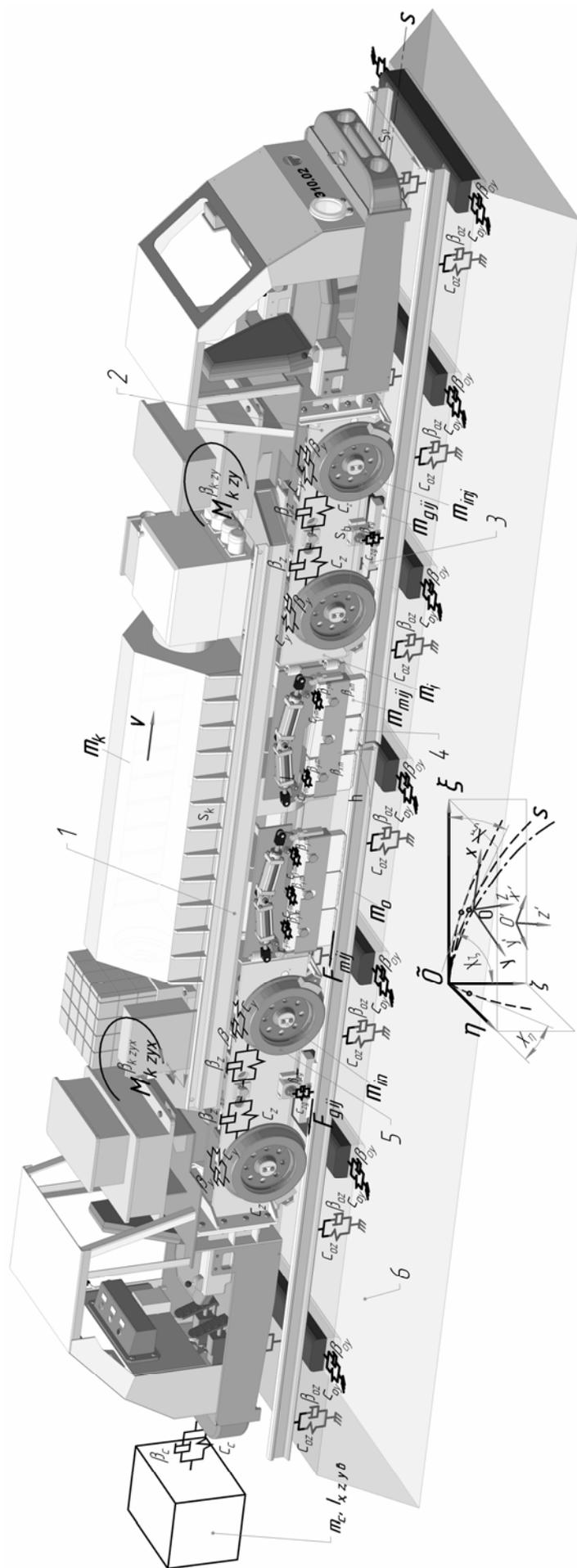


Рис. 2.2. Расчетная схема размещения локомотива на шахтном пути в режиме торможения рельсовыми тормозами

где  $a_m$  – расстояние от точки середины базы тележки тяговой секции до середины первой (ближней к кабине) секции магниторельсового тормоза;  
 $L$  – длина секции магниторельсового тормоза, м;  
 $l$  – расстояние между соседними секциями магниторельсового тормоза, м.

Вертикальные перемещения секций гравитационных и магнитных рельсовых тормозов равны соответствующим перемещениям рельсовых нитей под ними, их находят, как  $z_{g ij} = z_{go ij}$  и  $z_{m ijm} = z_{mo ijm}$ . Горизонтальные поперечные перемещения рельсового гравитационного тормоза совпадают с соответствующими перемещениями тяговой секции локомотива, поэтому  $y_{g ij} = y_i$ .

При решении задач определения тормозного пути поезда, останавливаемого рельсовыми тормозами, рассмотрены все возможные способы торможения локомотива. В файле *3DKP.nb*, разработанном в математическом программном комплексе Wolfram Mathematica 7 для моделирования процессов торможения шахтного поезда с шарнирно-сочлененным локомотивом (приложение 1), торможение магниторельсовыми тормозами обозначено признаком РМ, который равен следующим значениям:

0 – без торможения (выбег);

1 – торможение только первыми секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза первой по ходу движения тяговой секции;

2 – торможение первыми и вторыми секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза первой по ходу движения тяговой секции;

3 – торможение первыми, вторыми и третьими секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза первой по ходу движения тяговой секции;

4 – торможение только первыми секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза обеих тяговых секций;

5 – торможение первыми и вторыми секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза обеих тяговых секций;

6 – торможение первыми, вторыми и третьими секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза обеих тяговых секций.

В файле *3DKP.nb* торможение рельсовыми гравитационными тормозами обозначено признаком РГ, который равен следующим значениям:

0 – без торможения (выбег);

1 – торможение только гравитационными тормозами первой по ходу движения тяговой секции;

2 – торможение только гравитационными тормозами второй по ходу движения тяговой секции;

3 – торможение гравитационными тормозами первой и второй по ходу движения тяговых секций.

Поочередное или совместное включение признаков РМ и РГ позволяет затормаживать локомотив с составом вагонеток одним из указанных тормозов на выбранной ступени торможения или одновременно двумя рельсовыми тормозами с различными тормозными силами.

Дополнительные уравнения движения механической системы, описывающие поведение как работающих совместно рельсовых тормозов шахтного локомо-

тива, так и действующих по отдельности на реальном рельсовом пути, получены с использованием уравнений Лагранжа второго рода. После добавления 80 новых, общее число степеней свободы для рассматриваемой системы составит 149. В качестве обобщенных координат  $q_l$  дополнительно выбраны независимые между собой величины, приведенные в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Выбор обобщенных координат уравнений динамики торможения шахтного поезда рельсовыми тормозами

Главные направления перемещений	Обобщенные координаты	Число степеней свободы
$x$	$x_{g ij}, x_{m ijm}$	16
$z$	$z_{g ij}, z_{m ijm}, z_{og ij}, z_{om ijm}$	32
$y$	$y_{g ij}, y_{m ijm}, y_{og ij}, y_{om ijm}$	32
	Всего по рельсовым тормозам	80
	Всего по поезду	149

Дополнительная кинетическая энергия, которая состоит из кинетической энергии поступательного и вращательного (сферического) движения подвижных частей рельсовых тормозов локомотива, а также кинетической энергии твердых тел пути под ними, по направлениям основных осей в соответствии с теоремой Кенига и с учетом (2.1) описана в виде выражений

$$T_{zp} = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_g \dot{z}_{g ij}^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 m_m \dot{z}_{m ijm}^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{oz} \dot{z}_{og ij}^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 m_{oz} \dot{z}_{om ijm}^2 \right];$$

$$T_{xp} = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_g \dot{x}_{g ij}^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 m_m \dot{x}_{m ijm}^2 \right];$$

$$T_{yp} = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_g \dot{y}_{g ij}^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 m_m \dot{y}_{m ijm}^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{oy} \dot{y}_{og ij}^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 m_{oy} \dot{y}_{om ijm}^2 \right]. \quad (2.2)$$

По теореме Клайперона дополнительная потенциальная энергия упругих элементов подвески рельсовых тормозов равна

$$\begin{aligned}
\Pi_{xp} &= \frac{1}{2} \left[ c_{xg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (x_i - x_{g\ ij})^2 + c_{xm} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (x_i - x_{m\ ijm})^2 \right]; \\
\Pi_{zp} &= \frac{1}{2} \left[ c_{zg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (z_i - z_{g\ ij})^2 + c_{zm} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (z_i - z_{m\ ijm})^2 + \right. \\
&\quad \left. + c_{oz} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 z_{og\ ij}^2 + c_{oz} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 z_{om\ ijm}^2 \right]; \\
\Pi_{yp} &= \frac{1}{2} \left[ c_{yg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (y_i - y_{g\ ij})^2 + c_{ym} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (y_i - y_{m\ ijm})^2 + \right. \\
&\quad \left. + c_{oy} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 y_{og\ ij}^2 + c_{oy} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 y_{om\ ijm}^2 \right], \quad (2.3)
\end{aligned}$$

где  $c_{xg}$ ,  $c_{yg}$ ,  $c_{zg}$  – коэффициенты жесткости упругих элементов подвески тормозной колодки гравитационного тормоза в направлении соответствующих осей, Н/м;

$c_{xm}$ ,  $c_{ym}$ ,  $c_{zm}$  – коэффициенты жесткости упругих элементов подвески секции магниторельсового тормоза в направлении соответствующих осей, Н/м.

Функцию рассеивания энергии в элементах подвески рельсовых тормозов можно представить следующими выражениями

$$\begin{aligned}
\Phi_{xp} &= \frac{1}{2} \left[ \beta_{xg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (\dot{x}_i - \dot{x}_{g\ ij})^2 + \beta_{xm} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (\dot{x}_i - \dot{x}_{m\ ijm})^2 \right]; \\
\Phi_{zp} &= \frac{1}{2} \left[ \beta_{zg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (\dot{z}_i - \dot{z}_{g\ ij})^2 + \beta_{zm} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (\dot{z}_i - \dot{z}_{m\ ijm})^2 + \right. \\
&\quad \left. + \beta_{oz} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \dot{z}_{og\ ij}^2 + \beta_{oz} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 \dot{z}_{om\ ijm}^2 \right]; \\
\Phi_{yp} &= \frac{1}{2} \left[ \beta_{yg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (\dot{y}_i - \dot{y}_{g\ ij})^2 + \beta_{ym} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (\dot{y}_i - \dot{y}_{m\ ijm})^2 + \right. \\
&\quad \left. + \beta_{oy} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \dot{y}_{og\ ij}^2 + \beta_{oy} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 \dot{y}_{om\ ijm}^2 \right], \quad (2.4)
\end{aligned}$$

где  $\beta_{xg}, \beta_{yg}, \beta_{zg}$  – коэффициенты вязкого сопротивления подвески тормозной колодки гравитационного тормоза в направлении соответствующих осей, Н·с/м;  
 $\beta_{xm}, \beta_{ym}, \beta_{zm}$  – коэффициенты вязкого сопротивления подвески секции магниторельсового тормоза в направлении соответствующих осей, Н·с/м.

Обобщенные силы, соответствующие дополнительным обобщенным координатам, определяются как коэффициенты при вариациях обобщенных координат в выражениях для возможных работ от приложенных сил. Размерности обобщенных сил зависят от размерностей соответствующих обобщенных координат и дополняют их до размерности работы. Они могут быть записаны как

$$\begin{aligned}
 Q_{xg\ ij} &= -F_{g\ ij}; \\
 Q_{xm\ ijm} &= -F_{m\ ijm}; \\
 Q_{zg\ ij} &= -\left(m_i + \frac{m_k}{2}\right)g_0 \left(\frac{1}{2} \cos(\arctg i_s\ inj) + (-1)^j \sin(\arctg i_s\ inj) \frac{h_{ym} + r}{s_{p\ inj}}\right) (1 - k_{g\ ij}); \\
 Q_{zm\ ijm} &= -Z_{ijm} F_{\Pi\ ij}; \\
 Q_{zog\ ij} &= \left(m_i + \frac{m_k}{2}\right)g_0 \left(\frac{1}{2} \cos(\arctg i_s\ inj) + (-1)^j \sin(\arctg i_s\ inj) \frac{h_{ym} + r}{s_{p\ inj}}\right) (1 - k_{g\ ij}); \\
 Q_{zom\ ijm} &= Z_{ijm} F_{\Pi\ ijm}; \\
 Q_{yg\ ij} &= W_{yg\ ij}; \\
 Q_{ym\ ijm} &= W_{ym\ ijm}; \\
 Q_{yog\ ij} &= -W_{yg\ ij}; \\
 Q_{yom\ ijm} &= -W_{ym\ ijm}, \tag{2.5}
 \end{aligned}$$

где  $F_{g\ ij}$  – тормозная сила гравитационного тормоза, находят из (2.6), Н;

$F_{m\ ijm}$  – тормозная сила секции магниторельсового тормоза, ищут по (2.8) и (3.2) заранее определив (3.3), (3.4), (3.5), (3.7), (3.8), Н;

$k_{g\ ij}$  – коэффициент перераспределения силы веса локомотива между колесами и гравитационными тормозами; равен единице при отключенных тормозах и той доле веса локомотива, которая приходится на его колеса при включенных гравитационных тормозах;

$W_{yg\ ij}$  – сила поперечного трения скольжения тормозной колодки гравитационного тормоза, Н, определяют по формуле

$$W_{yg\ ij} = A_g \sin|\varepsilon_{yg\ ij}| + B_g \sin(3|\varepsilon_{yg\ ij}|),$$

где  $\varepsilon_{yg ij}$  – поперечное относительное скольжение секции гравитационного рельсового тормоза по рельсу, определяют как  $\varepsilon_{yg ij} = \sin \sigma_{g ij}$ , здесь углы установки гравитационного рельсового тормоза находят по [47] задавая  $a_i$  нулевым;

$A_g, B_g$  – коэффициенты Фурье, находят по формулам

$$A_g = \frac{4(F_{m ijm} + \alpha_{ск} \delta_{\max})}{\pi^2 \sin\left(\frac{\pi F_{m ijm}}{F_{m ijm} + \alpha_{ск} \delta_{\max}}\right)}; \quad B_g = \frac{4(F_{m ijm} + \alpha_{ск} \delta_{\max})}{9\pi^2 \sin\left(\frac{3\pi F_{m ijm}}{F_{m ijm} + \alpha_{ск} \delta_{\max}}\right)};$$

$W_{ym ijm}$  – сила поперечного трения скольжения полюсных наконечников магниторельсового тормоза, Н, определяют как

$$W_{m ijm} = A_m \sin|\varepsilon_{ym ijm}| + B_m \sin(3|\varepsilon_{ym ijm}|),$$

где  $\varepsilon_{ym ijm}$  – поперечное относительное скольжение секции магниторельсового тормоза по рельсу, определяют как  $\varepsilon_{ym ijm} = \sin \sigma_{m ijm}$ , здесь углы установки секций магниторельсового тормоза находят по [47], задавая числитель дроби равным  $a_m$ ;

Тормозную силу гравитационного тормоза определяют по формуле

$$F_{g ij} = \left(m_i + \frac{m_k}{2}\right) \left(\frac{1}{2} \cos(\arctg i_{pi}) + (-1)^n \sin(\arctg i_{pi}) \frac{h_{ym} + r}{s_b}\right) g_0 (1 - k_g) f_g, \quad (2.6)$$

где  $f_g$  – коэффициент трения скольжения тормозной колодки гравитационного тормоза по рельсу, находят по формуле как

$$f_g = k_{mg} \frac{\psi_{zg}}{\psi_0} 0,058207, \quad (2.7)$$

где  $k_{mg}$  – коэффициент дополнительной зачистки перед собой дорожки катания рельса тормозной колодкой рельсового тормоза, принимают равным от 1,0 до 1,1 (см. ниже);

$\psi_{zg}$  – коэффициент сцепления (трения покоя) тормозной колодки гравитационного рельсового тормоза с дорожкой катания сухого чистого рельса.

Тормозную силу секции магниторельсового тормоза определяют как

$$F_{m\ ijm} = Z_{ijm} F_{\Pi\ ijm} f_m, \quad (2.8)$$

где  $Z_{ijm}$  – сигнофункция, признак включения конкретной секции магниторельсового тормоза, равна нулю при отключении, и единице при включении;

$F_{\Pi\ ijm}$  – сила магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза к рельсу, Н;

$f_m$  – коэффициент трения скольжения полюсных наконечников магниторельсового тормоза по рельсу, как и в (2.7) находят по формуле

$$f_m = k_{mg} \frac{\psi_{zm}}{\psi_0} 0,058207, \quad (2.9)$$

где  $\psi_{zm}$  – коэффициент сцепления (трения покоя) полюсных наконечников магниторельсового тормоза с дорожкой катания сухого чистого рельса.

При торможении гравитационными рельсовыми тормозами реакции рельсов под колесами уменьшаются из-за переноса части силы веса локомотива на гравитационные тормоза в соответствии с коэффициентом  $k_{g\ ij}$  и приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} N_{1nj} = k_{g\ ij} & \left[ \begin{aligned} & m_1 g_0 + m_k g_0 \left( \frac{1}{2} \cos(\arctg i_{p1}) + (-1)^n \sin(\arctg i_{p1}) \frac{h_{yc}}{s_k} \right) \times \\ & \times \left( \cos(\arctg i_{s1}) + (-1)^j \sin(\arctg i_{s1}) \frac{h_{yc}}{s_{p1nj}} \right) \end{aligned} \right] \times \\ & \times \left( \frac{1}{2} \cos(\arctg i_{pi}) + (-1)^n \sin(\arctg i_{pi}) \frac{h_{ym+r}}{s_b} \right) \times \\ & \times \left( \frac{1}{2} \cos(\arctg i_{sijn}) + (-1)^j \sin(\arctg i_{sijn}) \frac{h_{ym+r}}{s_{p1nj}} \right) - \\ & - \ddot{x}_1 \left( -(-1)^n m_1 \frac{h_{ym+r}}{2s_b} - (-1)^j m_k \frac{h_{yc}}{4s_k} \right) - \frac{1}{4} \left( m_1 + \frac{m_k}{2} \right) \frac{\dot{x}_1}{R_{p1}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{2nj} = k_{gij} & \left( \begin{aligned} & m_2 g_0 + m_k g_0 \left( \frac{1}{2} \cos(\arctg i_{p1}) + (-1)^n \sin(\arctg i_{pi1}) \frac{h_{yc}}{s_k} \right) \times \\ & \times \left( \cos(\arctg i_{s2}) + (-1)^j \sin(\arctg i_{s1}) \frac{h_{yc}}{s_{p2nj}} \right) \end{aligned} \right) \times \\
& \times \left( \frac{1}{2} \cos(\arctg i_{pi}) + (-1)^n \sin(\arctg i_{pi}) \frac{h_{ym+r}}{s_b} \right) \times \\
& \times \left( \frac{1}{2} \cos(\arctg i_{s inj}) + (-1)^j \sin(\arctg i_{s inj}) \frac{h_{ym+r}}{s_{p2nj}} \right) - \\
& - \ddot{x}_2 \left( -(-1)^n m_2 \frac{h_{ym+r}}{2s_b} - (-1)^j m_k \frac{h_{yc}}{4s_k} \right) + (-1)^n \frac{F_c h_c}{2s_b} - \frac{1}{4} \left( m_2 + \frac{m_k}{2} \right) \frac{\dot{x}_2}{R_{p2}},
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Выполнив преобразования с учетом (2.2), (2.3), (2.4) и (2.5) получим полную систему из 149 дифференциальных уравнений второго порядка, которые описывают движение локомотива с составом вагонок в режиме торможения всеми установленными на локомотиве тормозными устройствами. Уравнения, описывающие поведение рельсовых тормозов (80 дифференциальных уравнений второго порядка), приведены ниже.

$$\begin{aligned}
m_g \ddot{x}_{g11} - \beta_{xg} (\dot{x}_1 - \dot{x}_{g11}) - c_{xg} (x_1 - x_{g11}) &= -F_{g11}; \\
m_g \ddot{x}_{g12} - \beta_{xg} (\dot{x}_1 - \dot{x}_{g12}) - c_{xg} (x_1 - x_{g12}) &= -F_{g12}; \\
m_g \ddot{x}_{g21} - \beta_{xg} (\dot{x}_2 - \dot{x}_{g21}) - c_{xg} (x_2 - x_{g21}) &= -F_{g21}; \\
m_g \ddot{x}_{g22} - \beta_{xg} (\dot{x}_2 - \dot{x}_{g22}) - c_{xg} (x_2 - x_{g22}) &= -F_{g22}; \\
m_m \ddot{x}_{m111} - \beta_{xm} (\dot{x}_1 - \dot{x}_{m111}) - c_{xm} (x_1 - x_{m111}) &= Z_{111} (-F_{m111}); \\
m_m \ddot{x}_{m112} - \beta_{xm} (\dot{x}_1 - \dot{x}_{m112}) - c_{xm} (x_1 - x_{m112}) &= Z_{112} (-F_{m112}); \\
m_m \ddot{x}_{m113} - \beta_{xm} (\dot{x}_1 - \dot{x}_{m113}) - c_{xm} (x_1 - x_{m113}) &= Z_{113} (-F_{m113}); \\
m_m \ddot{x}_{m121} - \beta_{xm} (\dot{x}_1 - \dot{x}_{m121}) - c_{xm} (x_1 - x_{m121}) &= Z_{121} (-F_{m121}); \\
m_m \ddot{x}_{m122} - \beta_{xm} (\dot{x}_1 - \dot{x}_{m122}) - c_{xm} (x_1 - x_{m122}) &= Z_{122} (-F_{m122}); \\
m_m \ddot{x}_{m123} - \beta_{xm} (\dot{x}_1 - \dot{x}_{m123}) - c_{xm} (x_1 - x_{m123}) &= Z_{123} (-F_{m123}); \\
m_m \ddot{x}_{m211} - \beta_{xm} (\dot{x}_2 - \dot{x}_{m211}) - c_{xm} (x_2 - x_{m211}) &= Z_{211} (-F_{m211}); \\
m_m \ddot{x}_{m212} - \beta_{xm} (\dot{x}_2 - \dot{x}_{m212}) - c_{xm} (x_2 - x_{m212}) &= Z_{212} (-F_{m212}); \\
m_m \ddot{x}_{m213} - \beta_{xm} (\dot{x}_2 - \dot{x}_{m213}) - c_{xm} (x_2 - x_{m213}) &= Z_{213} (-F_{m213}); \\
m_m \ddot{x}_{m221} - \beta_{xm} (\dot{x}_2 - \dot{x}_{m221}) - c_{xm} (x_2 - x_{m221}) &= Z_{221} (-F_{m221}); \\
m_m \ddot{x}_{m222} - \beta_{xm} (\dot{x}_2 - \dot{x}_{m222}) - c_{xm} (x_2 - x_{m222}) &= Z_{222} (-F_{m222}); \\
m_m \ddot{x}_{m223} - \beta_{xm} (\dot{x}_2 - \dot{x}_{m223}) - c_{xm} (x_2 - x_{m223}) &= Z_{223} (-F_{m223}); \\
m_g \ddot{z}_{g11} - \beta_{zg} (\dot{z}_1 - \dot{z}_{g11}) - c_{zg} (z_1 - z_{g11}) &= g_0 \left( -\frac{m_k}{2} - m_1 \right) (1 - k_{g11});
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_g \ddot{z}_{g12} - \beta_{zg} (\dot{z}_1 - \dot{z}_{g12}) - c_{zg} (z_1 - z_{g12}) &= g_0 \left( -\frac{m_k}{2} - m_1 \right) (1 - k_{g12}); \\
m_g \ddot{z}_{g21} - \beta_{zg} (\dot{z}_2 - \dot{z}_{g21}) - c_{zg} (z_2 - z_{g21}) &= g_0 \left( -\frac{m_k}{2} - m_2 \right) (1 - k_{g21}); \\
m_g \ddot{z}_{g22} - \beta_{zg} (\dot{z}_2 - \dot{z}_{g22}) - c_{zg} (z_2 - z_{g22}) &= g_0 \left( -\frac{m_k}{2} - m_2 \right) (1 - k_{g22}); \\
m_m \ddot{z}_{m111} - \beta_{zm} (\dot{z}_1 - \dot{z}_{m111}) - c_{zm} (z_1 - z_{m111}) &= Z_{111} (-F_{n111}); \\
m_m \ddot{z}_{m112} - \beta_{zm} (\dot{z}_1 - \dot{z}_{m112}) - c_{zm} (z_1 - z_{m112}) &= Z_{112} (-F_{n112}); \\
m_m \ddot{z}_{m113} - \beta_{zm} (\dot{z}_1 - \dot{z}_{m113}) - c_{zm} (z_1 - z_{m113}) &= Z_{113} (-F_{n113}); \\
m_m \ddot{z}_{m121} - \beta_{zm} (\dot{z}_1 - \dot{z}_{m121}) - c_{zm} (z_1 - z_{m121}) &= Z_{121} (-F_{n121}); \\
m_m \ddot{z}_{m122} - \beta_{zm} (\dot{z}_1 - \dot{z}_{m122}) - c_{zm} (z_1 - z_{m122}) &= Z_{122} (-F_{n122}); \\
m_m \ddot{z}_{m123} - \beta_{zm} (\dot{z}_1 - \dot{z}_{m123}) - c_{zm} (z_1 - z_{m123}) &= Z_{123} (-F_{n123}); \\
m_m \ddot{z}_{m211} - \beta_{zm} (\dot{z}_2 - \dot{z}_{m211}) - c_{zm} (z_2 - z_{m211}) &= Z_{211} (-F_{n211}); \\
m_m \ddot{z}_{m212} - \beta_{zm} (\dot{z}_2 - \dot{z}_{m212}) - c_{zm} (z_2 - z_{m212}) &= Z_{212} (-F_{n212}); \\
m_m \ddot{z}_{m213} - \beta_{zm} (\dot{z}_2 - \dot{z}_{m213}) - c_{zm} (z_2 - z_{m213}) &= Z_{213} (-F_{n213}); \\
m_m \ddot{z}_{m221} - \beta_{zm} (\dot{z}_2 - \dot{z}_{m221}) - c_{zm} (z_2 - z_{m221}) &= Z_{221} (-F_{n221}); \\
m_m \ddot{z}_{m222} - \beta_{zm} (\dot{z}_2 - \dot{z}_{m222}) - c_{zm} (z_2 - z_{m222}) &= Z_{222} (-F_{n222}); \\
m_m \ddot{z}_{m223} - \beta_{zm} (\dot{z}_2 - \dot{z}_{m223}) - c_{zm} (z_2 - z_{m223}) &= Z_{223} (-F_{n223}); \\
m_{oz} \ddot{z}_{og11} + \beta_{oz} \dot{z}_{og11} + c_{oz} z_{og11} &= g_0 \left( \frac{m_k}{2} + m_1 \right) (1 - k_{g11}); \\
m_{oz} \ddot{z}_{og12} + \beta_{oz} \dot{z}_{og12} + c_{oz} z_{og12} &= g_0 \left( \frac{m_k}{2} + m_1 \right) (1 - k_{g12}); \\
m_{oz} \ddot{z}_{og21} + \beta_{oz} \dot{z}_{og21} + c_{oz} z_{og21} &= g_0 \left( \frac{m_k}{2} + m_2 \right) (1 - k_{g21}); \\
m_{oz} \ddot{z}_{og22} + \beta_{oz} \dot{z}_{og22} + c_{oz} z_{og22} &= g_0 \left( \frac{m_k}{2} + m_2 \right) (1 - k_{g22}); \\
m_{oz} \ddot{z}_{om111} + \beta_{oz} \dot{z}_{om111} + c_{oz} z_{om111} &= Z_{111} F_{n111}; \\
m_{oz} \ddot{z}_{om112} + \beta_{oz} \dot{z}_{om112} + c_{oz} z_{om112} &= Z_{112} F_{n112}; \\
m_{oz} \ddot{z}_{om113} + \beta_{oz} \dot{z}_{om113} + c_{oz} z_{om113} &= Z_{113} F_{n113}; \\
m_{oz} \ddot{z}_{om121} + \beta_{oz} \dot{z}_{om121} + c_{oz} z_{om121} &= Z_{121} F_{n121}; \\
m_{oz} \ddot{z}_{om122} + \beta_{oz} \dot{z}_{om122} + c_{oz} z_{om122} &= Z_{122} F_{n122}; \\
m_{oz} \ddot{z}_{om123} + \beta_{oz} \dot{z}_{om123} + c_{oz} z_{om123} &= Z_{123} F_{n123}; \\
m_{oz} \ddot{z}_{om211} + \beta_{oz} \dot{z}_{om211} + c_{oz} z_{om211} &= Z_{211} F_{n211}; \\
m_{oz} \ddot{z}_{om212} + \beta_{oz} \dot{z}_{om212} + c_{oz} z_{om212} &= Z_{212} F_{n212}; \\
m_{oz} \ddot{z}_{om213} + \beta_{oz} \dot{z}_{om213} + c_{oz} z_{om213} &= Z_{213} F_{n213}; \\
m_{oz} \ddot{z}_{om221} + \beta_{oz} \dot{z}_{om221} + c_{oz} z_{om221} &= Z_{221} F_{n221}; \\
m_{oz} \ddot{z}_{om222} + \beta_{oz} \dot{z}_{om222} + c_{oz} z_{om222} &= Z_{222} F_{n222};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m_{oz}\ddot{z}_{om223} + \beta_{oz}\dot{z}_{om223} + c_{oz}z_{om223} = Z_{223}F_{n223}; \\
& m_g\ddot{y}_{g11} - \beta_{yg}(\dot{y}_1 - \dot{y}_{g11}) - c_{yg}(y_1 - y_{g11}) = W_{yg11}; \\
& m_g\ddot{y}_{g12} - \beta_{yg}(\dot{y}_1 - \dot{y}'_{g12}) - c_{yg}(y_1 - y_{g12}) = W_{yg12}; \\
& m_g\ddot{y}_{g21} - \beta_{yg}(\dot{y}_2 - \dot{y}_{g21}) - c_{yg}(y_2 - y_{g21}) = W_{yg21}; \\
& m_g\ddot{y}_{g22} - \beta_{yg}(\dot{y}_2 - \dot{y}_{g22}) - c_{yg}(y_2 - y_{g22}) = W_{yg22}; \\
& m_m\ddot{y}_{m111} - \beta_{ym}(\dot{y}_1 - \dot{y}_{m111}) - c_{ym}(y_1 - y_{m111}) = W_{ym111}; \\
& m_m\ddot{y}_{m112} - \beta_{ym}(\dot{y}_1 - \dot{y}_{m112}) - c_{ym}(y_1 - y_{m112}) = W_{ym112}; \\
& m_m\ddot{y}_{m113} - \beta_{ym}(\dot{y}_1 - \dot{y}_{m113}) - c_{ym}(y_1 - y_{m113}) = W_{ym113}; \\
& m_m\ddot{y}_{m121} - \beta_{ym}(\dot{y}_1 - \dot{y}_{m121}) - c_{ym}(y_1 - y_{m121}) = W_{ym121}; \\
& m_m\ddot{y}_{m122} - \beta_{ym}(\dot{y}_1 - \dot{y}_{m122}) - c_{ym}(y_1 - y_{m122}) = W_{ym122}; \\
& m_m\ddot{y}_{m123} - \beta_{ym}(\dot{y}_1 - \dot{y}_{m123}) - c_{ym}(y_1 - y_{m123}) = W_{ym123}; \\
& m_m\ddot{y}_{m211} - \beta_{ym}(\dot{y}_2 - \dot{y}_{m211}) - c_{ym}(y_2 - y_{m211}) = W_{ym211}; \\
& m_m\ddot{y}_{m212} - \beta_{ym}(\dot{y}_2 - \dot{y}_{m212}) - c_{ym}(y_2 - y_{m212}) = W_{ym212}; \\
& m_m\ddot{y}_{m213} - \beta_{ym}(\dot{y}_2 - \dot{y}_{m213}) - c_{ym}(y_2 - y_{m213}) = W_{ym213}; \\
& m_m\ddot{y}_{m221} - \beta_{ym}(\dot{y}_2 - \dot{y}_{m221}) - c_{ym}(y_2 - y_{m221}) = W_{ym221}; \\
& m_m\ddot{y}_{m222} - \beta_{ym}(\dot{y}_2 - \dot{y}_{m222}) - c_{ym}(y_2 - y_{m222}) = W_{ym222}; \\
& m_m\ddot{y}_{m223} - \beta_{ym}(\dot{y}_2 - \dot{y}_{m223}) - c_{ym}(y_2 - y_{m223}) = W_{ym223}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{og11} + \beta_{oy}\dot{y}_{og11} + c_{oy}y_{og11} = -W_{yg11}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{og12} + \beta_{oy}\dot{y}_{og12} + c_{oy}y_{og12} = -W_{yg12}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{og21} + \beta_{oy}\dot{y}_{og21} + c_{oy}y_{og21} = -W_{yg21}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{og22} + \beta_{oy}\dot{y}_{og22} + c_{og}y_{om22} = -W_{yg22}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om111} + \beta_{oy}\dot{y}_{om111} + c_{oy}y_{om111} = -W_{ym111}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om112} + \beta_{oy}\dot{y}_{om112} + c_{oy}y_{om112} = -W_{ym112}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om113} + \beta_{oy}\dot{y}_{om113} + c_{oy}y_{om113} = -W_{ym113}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om121} + \beta_{oy}\dot{y}_{om121} + c_{oy}y_{om121} = -W_{ym121}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om122} + \beta_{oy}\dot{y}_{om122} + c_{oy}y_{om122} = -W_{ym122}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om123} + \beta_{oy}\dot{y}_{om123} + c_{oy}y_{om123} = -W_{ym123}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om211} + \beta_{oy}\dot{y}_{om211} + c_{oy}y_{om211} = -W_{ym211}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om212} + \beta_{oy}\dot{y}_{om212} + c_{oy}y_{om212} = -W_{ym212}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om213} + \beta_{oy}\dot{y}_{om213} + c_{oy}y_{om213} = -W_{ym213}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om221} + \beta_{oy}\dot{y}_{om221} + c_{oy}y_{om221} = -W_{ym221}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om222} + \beta_{oy}\dot{y}_{om222} + c_{oy}y_{om222} = -W_{ym222}; \\
& m_{oy}\ddot{y}_{om223} + \beta_{oy}\dot{y}_{om223} + c_{oy}y_{om223} = -W_{ym223}.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Полученную динамическую (2.11) следует проверить на адекватность положениям классической механики по 10 тестам [58]. В этом случае в проверку должны быть добавлены тормозные силы магниторельсовых и гравитационных тормозов, как это видно на листинге ниже при решении задачи в математическом программном комплексе Wolfram Mathematica 7 [24].

```

Table[iFM[i,n,j] = FunctionInterpolation[FM[i,n,j][t] /. sol, {t, 0, te}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}]
Table[iWM[x,i,n,j] = FunctionInterpolation[WM[x,i,n,j][t] /. sol, {t, 0, te}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}]
Table[iiM[p,i] = FunctionInterpolation[iM[p,i][t] /. sol, {t, 0, te}], {i, 2}]
Table[iFM[m,i,j,m] = FunctionInterpolation[FM[m,i,j,m][t] /. sol, {t, 0, te}], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}]
Table[iFM[g,i,j] = FunctionInterpolation[FM[g,i,j][t] /. sol, {t, 0, te}], {i, 2}, {j, 2}]
Table[iWM[p,i,n,j] = FunctionInterpolation[WM[p,i,n,j][t] /. sol, {t, 0, te}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}]
Table[iYM[i,n,j] = FunctionInterpolation[YM[i,n,j][t] /. sol, {t, 0, te}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}]
Table[iYM[i,n,j] = FunctionInterpolation[YM[i,n,j][t] /. sol, {t, 0, te}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}]
WB = FunctionInterpolation[WB[t] /. sol, {t, 0, te}]
dt = 4.0
dtt = 4.0

(Finj = (Sum[Sum[Sum[Sum[Integrate[iFM[i,n,j][t] dt, {t, dt+tm+txx, te-dtt}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {m, 3}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}) +
Sum[Sum[Sum[Sum[Integrate[iFM[g,i,j][t] dt, {t, dt+tm+txx, te-dtt}], {i, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2})
) / ((te - dtt) - (tm + txx + dt))

Wx = (Sum[Sum[Sum[Sum[Integrate[iWM[x,i,n,j][t] dt, {t, dt+tm+txx, te-dtt}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2})
) / ((te - dtt) - (tm + txx + dt))

Wp = (Sum[Sum[Sum[Sum[Integrate[iWM[p,i,n,j][t] dt, {t, dt+tm+txx, te-dtt}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2})
) / ((te - dtt) - (tm + txx + dt))

Y = (Sum[Sum[Sum[Sum[Integrate[iYM[i,n,j][t] dt, {t, dt+tm+txx, te-dtt}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2})
) / ((te - dtt) - (tm + txx + dt))

gamma = (Sum[Sum[Sum[Sum[Integrate[iYM[i,n,j][t] dt, {t, dt+tm+txx, te-dtt}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2})
) / ((te - dtt) - (tm + txx + dt))

mc (WB + WB)
mloc
mc
x1 '[tm + txx + dt] /. sol
x1 '[te - dtt] /. sol
Sin[ArcTan[ip]]
(x1 [te - dtt] - x1 [tm + txx + dt]) /. sol
psi = (Finj + Wx + Wp + Y Sin[gamma] + mc (WB + WB)) / (g0 (mloc + mc))

sklass = ((x1 '[te - dtt])^2 - (x1 '[tm + txx + dt])^2) / (2 g0 (Sin[ArcTan[-ip]] - psi Cos[ArcTan[-ip]])) /. sol

shodimost = (x1 [te - dtt] - x1 [tm + txx + dt]) / sklass /. sol

```

Нормальные реакции рельсов должны быть определены по (2.10).

Таким образом, впервые разработана динамическая модель шахтного шарнирно-сочлененного локомотива с магниторельсовыми тормозами, расположенными вне жесткой базы тележки ходовой части.

Впервые создана динамическая модель шахтного шарнирно-сочлененного локомотива, движущегося по реальному рельсовому пути в режиме торможения с включенными одновременно и/или по отдельности колесно-колодочными, дисковыми осевыми и трансмиссионными тормозами, гравитационными и магнитными рельсовыми тормозами, а также в режиме торможения двигателем.

## 2.2. Разработка и обоснование использования новых материалов для создания магниторельсовых тормозов

Магниторельсовые тормоза показали себя надежным средством торможения рельсовых транспортных средств коммунального транспорта (городские трамваи). Также они отлично подходят для условий, когда торможение поезда выполняется только установленными на локомотиве тормозами. Это предприятия горнометаллургического и нефтехимического комплекса, использующие вагонный парк МПС или специальный подвижной состав, который оснащен колесно-колодочными тормозами с пневмоприводом (автотормозами), однако по тем или иным причинам тормозная система вагонов не подключаются к общей тормозной пневмосистеме локомотива (экономия времени и средств). Не оборудованы тормозами вагонетки шахтного и рудничного транспорта. В таких условиях тормозобеспеченности локомотива придается первостепенное значение.

Широкое распространение получили электромагнитные тормоза, устанавливаемые на маневровые локомотивы и карьерные тяговые агрегаты [13], а также на рудничные контактные и шахтные аккумуляторные электровозы [69]. Однако для шахтных аккумуляторных электровозов вопрос энергопотребления рельсовых тормозов особенно актуален, поскольку потребление электроэнергии для торможения ограничивает продолжительность использования батареи для тяговой работы. Поэтому получили распространение магниторельсовые тормоза на постоянных магнитах [23].

За последнее десятилетие появились новые материалы [60], использование которых позволило повысить эксплуатационные характеристики магниторельсовых тормозов и увеличить эффективность их работы, особенно на тяжелых шахтных шарнирно-сочлененных локомотивах в сложных горно-геологических условиях (обводненность и знакопеременный профиль выработок с локомотивной откаткой). Это, прежде всего, новые магнитомягкие материалы, отлично подходящие для изготовления магнитопроводов и в первую очередь, первичное железо, технология получения которого разработана в Украине ООО «Колорит» при участии автора. Первичное железо представляет собой химически чистое железо с содержанием 99,9 % и более, полученное методом прямого плазменного восстановления в жидкой ванне из окискованного железорудного сырья (окатыши, брикеты). Высокое процентное содержание железа в продукте означает также крайне низкое содержание остальных элементов (примесей), обычно ухудшающих свойства электротехнического железа. В соответствии с ТУ У 13448618.101-2001 первичное железо может выпускаться в пяти марках, однако для магнитных систем рельсовых тормозов наиболее подходят марки П1-9.9 (с содержанием железа от

99,90 % до 99,95 %) и PI-9.95 (с содержанием железа от 99,95 % до 99,99 %). Марка PI-9.99 (с содержанием железа 99,99 % и более), хотя и является наиболее чистой по примесям, однако слишком дорога для промышленного использования. Ниже приведен химический состав образца марки PI-9.90, полученный на комбинированном (искра-плазма) спектрометре IRIS ENTREPED II XDL SSEA.

6-LA_UNС		УГЛЕРОДИСТЫЕ, НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ								29/06/04 15:45	
Среднее по 4 анализам										No. пробы 7	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	Cu	
X	<.00240	<.00320	<.00050	.00755	0.0222	0.0132	<.00180	<.00130	<.00100	<.00642	
	V	W	Al	Ti	Fe						
X	.00292	<.00660	<.00050	<.00050	99.93						

Метод основан на возбуждении отобранной из однородного расплава монолитной пробы аперриодическим импульсным разрядом в атмосфере аргона, разложении получаемого излучения в спектр, регистрации интенсивностей линий анализируемых элементов и автоматическим расчетом концентраций в массовых долях составляющих элементов. Калибровка спектрометра проводится на основании химанализа спектральных проб-эталонных для градуировки традиционными методами аналитической «мокрой» химии, применяемыми для анализа сталей и сплавов.

Из распечатки видно, что содержание в пробе таких элементов как углерод, кремний, марганец, никель, молибден, кобальт, медь, вольфрам, алюминий и титан ниже порога чувствительности прибора.

Указанные марки являются отличным мягким железом, значительно превосходящим по свойствам армкожелезо марок 0001, 0003 и 0005 по ТУ 14-1-2279-78, железо раскисленное марок 0,05ЖР, 0,08ЖР, 0,08ЖРЮ по ТУ 14-1-2033-77, магнитомягкие стали марок 20864, 20880 и 20895 по ГОСТ 11036-75, а тем более низкоуглеродистую сталь Ст.3пс по ГОСТ 380-94, из которой обычно изготавливают магнитопроводы и полюсные наконечники магниторельсовых тормозов. Электротехнические характеристики железа первичного приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Электромагнитные свойства первичного железа

Параметр	Марка железа первичного по ТУ У 13448618.101-2001		
	PI-9.9	PI-9.95	PI-9.99
Коэрцитивная сила $H_c$ , А/м	36,5	25,7	менее 17,1
Максимальная магнитная проницаемость $\mu_{max}$	100 000	150 000	более 250 000
Время запаздывания индукции относительно приложенного поля для образца толщиной 0,1 мм, с	0,51	1,18	1,83

Измерения электромагнитных характеристик образцов первичного железа производили в компьютерном программном комплексе «АРМ Измерения статических характеристик магнитомягких материалов». Пример результатов измерения одного из образцов приведен на рис. 2.3. В подобном комплексе «АРМ Измерения статических характеристик магнитотвердых материалов» определяли характеристики магнитов, изготовленных из различных материалов. В качестве периферийного устройства для подключения исследовательских щупов с датчиками Холла и нормирующих (входных) усилителей использовали многофункциональное устройство сбора данных для компьютерной шины USB от компании National Instruments – NI USB-6009, показанное на рис. 2.4.

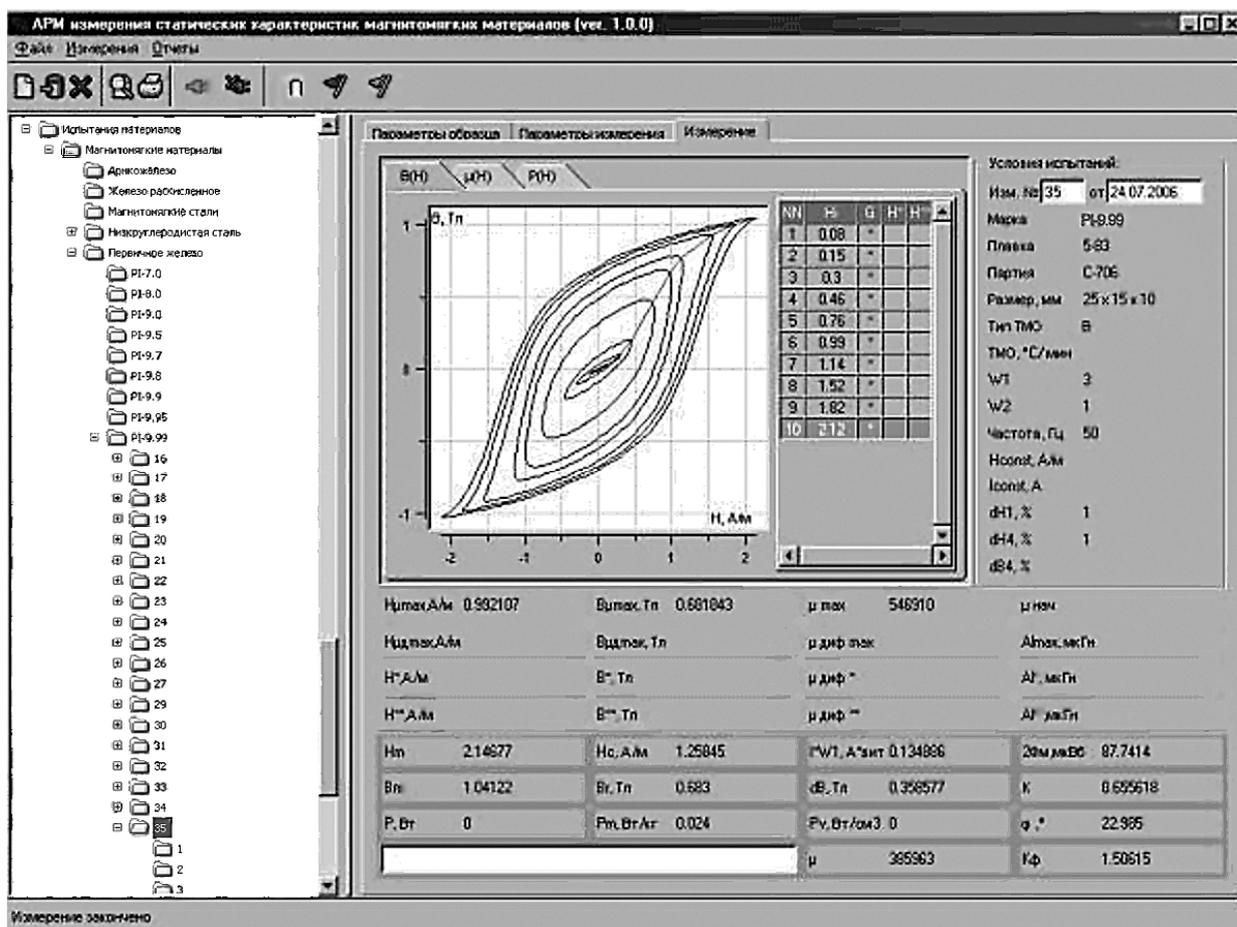


Рис. 2.3. Измерения статических характеристик магнитомягких материалов

Поскольку соприкасающиеся между собой элементы магнитной системы (сердечники, магнитопроводы, постоянные магниты) должны быть тщательно подогнаны друг к другу и прошлифованы по поверхностям соприкосновения для минимизации воздушных зазоров между ними, то важнейшей проблемой, возникающей по мере эксплуатации тормозов, является коррозия.

Из-за образования ржавчины на стыках магнитной системы магнитная проводимость их ухудшается, при этом уменьшается сила магнитного притяжения полюсных наконечников тормоза к рельсам и коэффициент полезного действия, повышается нагрев электродвигателей и, как следствие, снижается тор-

мозная сила локомотива. Первичное железо обладает хорошими антикоррозионными свойствами (железная колонна в Индии, сохранившаяся с 415 г.н.э. не окисленной, имеет содержание железа только 99,72 %).



Рис. 2.4. Периферийное устройство NI USB-6009

В отличие от низкоуглеродистой стали, на поверхности которой образуется сплошной слой оксида, быстро увеличивающийся по толщине во влажной среде, каковой является рудничная и шахтная атмосфера, окислы на поверхности первичного железа вышеназванных марок возникают не в форме пленки, а в виде игл и глобулей. Толщина оксидных слоев, измеренная при помощи интерференционного микроскопа МИИ-4, составляет от 0,2 мкм до 0,3 мкм, а ширина отдельных игл достигает 30 мкм, как это видно на рис. 2.5.

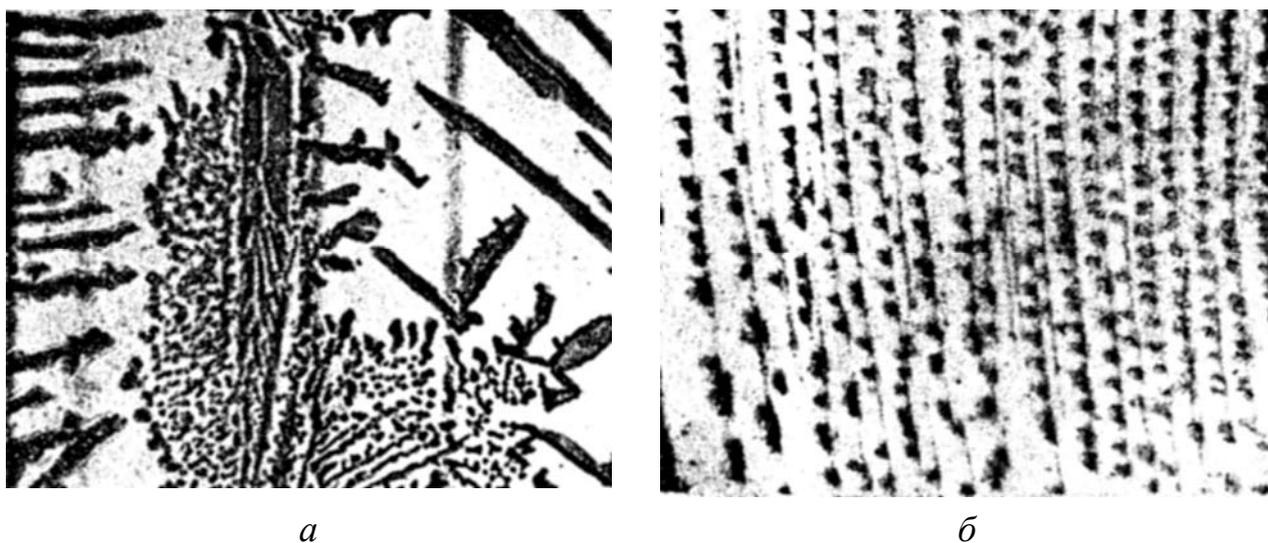


Рис. 2.5. Окислы на поверхности образца первичного железа марки PI-9.95:  
*a* – увеличение  $\times 90$ ; *б* – увеличение  $\times 300$

Этот световой микроскоп предназначен для анализа прозрачных объектов и включает два оптических пути для раздваиваемого луча, один из которых проходит через объект, а другой обходит его. После соединения лучей происходит интерференция за счет запаздывания по фазе одного из лучей. Для исследований готовились тонкие шлифы железа толщиной менее 0,1 мм.

Как конструкционный материал, первичное железо хорошо подходит для изготовления магнитопроводящих частей рельсовых тормозов, оно также может использоваться для изготовления полюсных наконечников, поскольку имеет более высокий коэффициент трения скольжения, чем низкоуглеродистая сталь. Оно мягче и пластичнее. Основные механические свойства первичного железа приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Механические свойства первичного железа

Параметр	Марка железа первичного по ТУ У 13448618.101-2001		
	PI-9.9	PI-9.95	PI-9.99
Предел текучести при 20 °С, МПа	160	140	120
Временное сопротивление разрыву при 20 °С, МПа	220	200	180
Твердость по Бринелю	90	80	70
Коэффициент трения скольжения по стали	0,20	0,21	0,22

Для магниторельсовых тормозов большое значение имеет отвод выделяющегося в процессе торможения тепла, чтобы не перегреть электрокатушки (это приводит к пробое изоляции) или постоянные магниты (что уменьшает их магнитную индукцию и даже может привести к размагничиванию). У первичного железа есть преимущество перед низкоуглеродистыми сталями, – его коэффициент теплопроводности при 20 °С равен 110 Вт/(м·К) против 57,4 Вт/(м·К) у стали Ст.3сп.

Помимо уже применявшихся в магниторельсовых тормозах магнитных материалов [44] типа алькино, ферритобарий, сплавы на базе редкоземельных элементов самарий-кобальт и самарий-стронций, появились новые постоянные магниты. Кроме того, существенно улучшены свойства ранее известных магнитов. В настоящий момент доступны для широкого применения следующие основные типы магнитных материалов.

- 1) Изотропные и анизотропные ферриты бария и стронция (спечённые).
- 2) Постоянные магниты железо-никель-алюминий и железо-никель-алюминий-кобальт (ЮНД или Al-Ni и ЮНДК или Al-Ni-Co).
- 3) Магниты самарий-кобальт Sm-Co (спеченные).
- 4) Магниты неодим-железо-бор Nd-Fe-B (спеченные).
- 5) Редкоземельные магнитопласты неодим-железо-бор Nd-Fe-B.

Последний вид, – полимерные постоянные магниты или магнитопласты, изготавливаются из смеси магнитного порошка и полимерного связующего. По-

сле сухого прессования «в размер» производится отверждение изотропных заготовок в сушильных шкафах в воздушной атмосфере. Этот вид магнитных материалов имеет ряд ценных свойств, выгодно отличающих их от металлических или керамических магнитов, получаемых спеканием, среди них следующие:

а) высокая воспроизводимость и стабильность, однородность магнитных свойств, большой срок службы (более 200 тыс. ч);

б) хорошая механическая прочность и пластичность, ударная выносливость до 500g;

в) высокая технологичность, т.е. возможность получать изделия сложной формы с малыми затратами и при этом соблюдать с высокой точностью заданные размеры.

Сопоставительный анализ основных типов постоянных магнитов (одного размера) [55], применяемых при изготовлении магниторельсовых тормозов, приведен на рис. 2.6. Видно, что самыми дорогими (см. рис. 2.6, а), являются магниты на основе самарий-кобальт (их стоимость принята за 100 %).

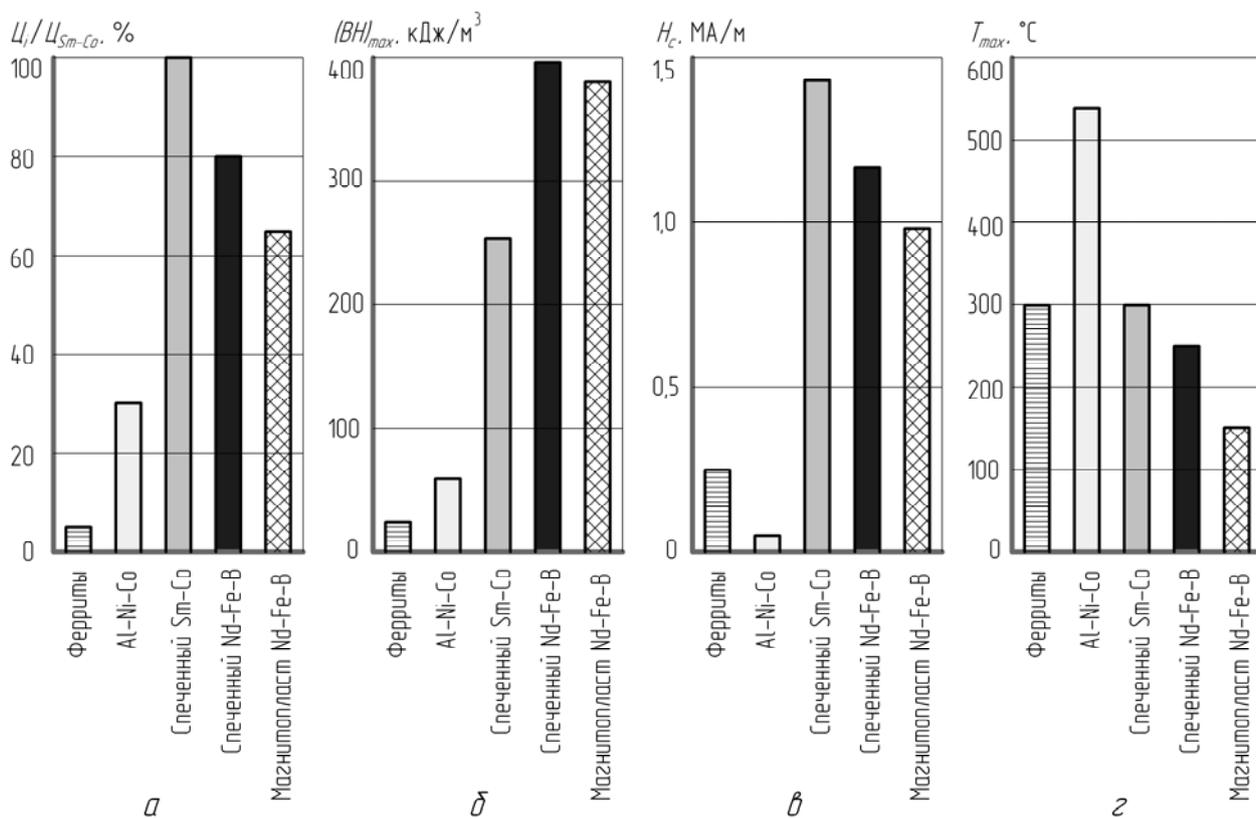


Рис. 2.6. Сопоставительный анализ потребительских свойств основных типов постоянных магнитов:

а – относительная цена магнитов;

б – максимальная энергия;

в – коэрцитивная сила;

г – максимальная рабочая температура

Самыми мощными (см. рис. 2.6, б) оказались спеченные магниты неодим-железо-бор ( $395 \text{ кДж/м}^3$ ). Наибольшую коэрцитивную силу (см. рис. 2.6, в) имеют магниты самарий-кобальт (1,4 МА/м), а выдерживают наибольшую рабочую температуру (выше которой магнит временно теряет часть своих магнитных свойств)

– Al-Ni-Co (545 °C) (см. рис. 2.6, з). Редкоземельные магнитоласты неодим-железо-бор на основе порошков марок  $Nd_2Fe_{14}B$ ,  $Nd_3Fe_{16}B$  и  $Nd_4Fe_{28}B_3$  очень хорошо подходят для формования магнитных блоков размером 80×40×10 мм. Кроме того, полимерное связующие предохраняет поверхностный слой магнитного порошка от коррозии. Для намагничивания изделий с магнитами из феррита бария, стронция или легированных редкоземельными металлами применяются намагничивающие устройства, позволяющие получать поле с амплитудой магнитной индукции до 1,0 Тл в зоне намагничивания.

Для намагничивания редкоземельных магнитов (РЗМ) состава неодим-железо-бор и самарий-кобальт необходимы намагничивающие устройства с амплитудой индукции до 3,0 Тл. В некоторых случаях, используя специальный режим предварительной термообработки РЗМ, можно существенно понижать амплитуду магнитной индукции в зоне намагничивания. Это позволяет использовать для намагничивания редкоземельных магнитов устройства, разработанные для намагничивания ферритов. Такой прибор, рассчитанный на электропитание от сети переменного тока 220/380 В, показан на рис. 2.7.

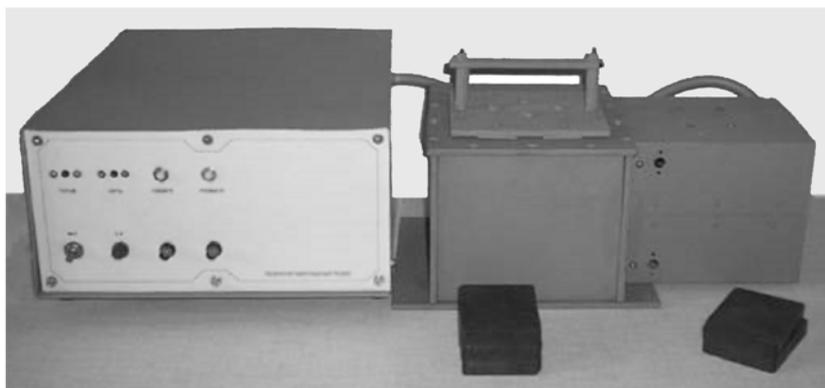


Рис. 2.7. Установка для намагничивания и полного размагничивания магнитных блоков размером до 115×85×65 мм

При серийном производстве намагничивание может выполняться уже после сборки секции магниторельсового тормоза.

В целом, современные магниты, применяемые для изготовления магниторельсовых тормозов, можно классифицировать следующим образом (см. рис. 2.8).

Темным фоном выделены технические решения, использование которых наиболее рационально. Это электромагниты с поперечным замыканием магнитного потока, первичное железо в качестве материала для изготовления магнитопроводов и полюсных наконечников, а также применение постоянных магнитов, изготовленных по технологии магнитоластов Nd-Fe-B.

В результате проведенных исследований можно сделать выводы, что целесообразно использование первичного железа марок ПІ-9.9 и ПІ-9.95 для изготовления магнитопроводов и полюсных наконечников рельсовых тормозов как электромагнитных, так и на постоянных магнитах, поскольку оно имеет очень низкую коэрцитивную силу от 25 А/м до 36 А/м и высокую максимальную магнитную проницаемость от 100 000 до 150 000. Первичное железо обладает хо-

рошими антикоррозийными свойствами, сопоставимыми с нержавеющей сталью, имеет при 20 °С коэффициент теплопроводности, равный 110 Вт/(м·К) и повышенный коэффициент трения скольжения по стали от 0,2 до 0,21.

Предлагаемый магнитный блок магнитоласта Nd2Fe14B размером 80×40×10 мм имеет остаточную магнитную индукцию  $B_r$  величиной 1,23 Тл, коэрцитивную силу  $H_c$ , равную 0,86 МА/м, максимальную энергию  $(BH)_{max}$  370 кДж/м<sup>3</sup>. Рабочая температура в 100 °С вполне допустима учитывая, что секция магниторельсового тормоза конструктивно пригодна для интенсивного рассеивания выделяющейся при торможении тепловой энергии. Полимерное связующее магнитоласта придает магнитному блоку эластичность, предохраняет его от коррозии, растрескивания и размагничивания в момент удара секции рельсового тормоза об рельсовые стыки или при быстром опускании на дорожку катания рельса. Такой магнит способен выдерживать длительное динамическое воздействие до 20g с частотой от 5 Гц до 250 Гц, а также воспринимать одиночные удары с ускорением до 500g.

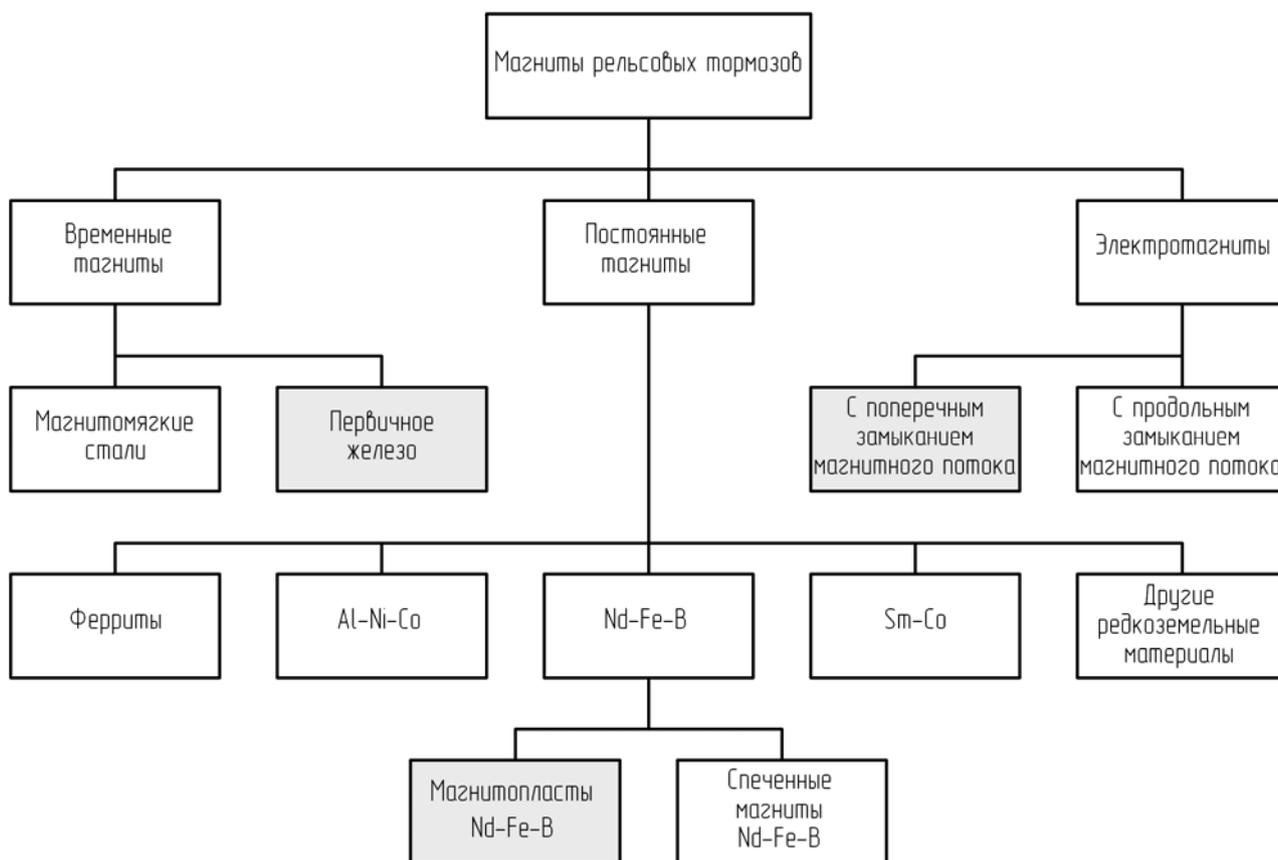


Рис. 2.8. Классификация магнитов для магниторельсовых тормозов

### 2.3. Определение рациональной длины секции составного магнитного рельсового тормоза

Одним из наиболее эффективных способов экстренного и служебного торможения шахтных локомотивов является использование рельсовых тормо-

зов. До последнего времени на угольных шахтах, в основном, использовались электромагнитные тормоза, которые изготавливались во взрывобезопасном исполнении. Но поскольку на их работу расходуется электроэнергия аккумуляторной батареи, то это, во-первых, уменьшает продолжительность работы локомотива до перезарядки (замены) батареи, а во-вторых, снижает эффективность использования рельсового тормоза по мере разряда батареи вплоть до полного его отказа. Для устранения этой проблемы предпринимались попытки включения в состав шахтного поезда специальных тормозных платформ, оборудованных рельсовыми электромагнитными тормозами с отдельной аккумуляторной батареей [69]. Однако это увеличивало общую массу поезда и, следовательно, скатывающую силу состава, которую на подъемах необходимо компенсировать повышенной тягой электродвигателей локомотива, а на спусках – мириться с повышенным износом наконечников электромагнитного рельсового тормоза тормозной платформы. И, конечно же, это приводило к увеличенным расходам электроэнергии, перегрузкам электросилового оборудования (повышенные токи), а также к потерям времени на обслуживание.

Преодолеть указанные недостатки электромагнитных рельсовых тормозов позволили рельсовые тормоза на постоянных магнитах. Наиболее удачным из них оказался тормоз на постоянных магнитах с поперечным замыканием магнитного потока [89]. Поскольку возможности современных магнитов накладывают определенные ограничения на величину магнитной индукции, которую может иметь единица длины рельсового тормоза, то достижение максимально необходимой тормозной силы требует создания тормоза большой длины. С другой стороны наконечники длинного тормоза не могут постоянно эффективно примагничиваться к реальному рельсовому пути, поскольку помимо искривления его в плане на закруглениях имеют место значительные перегибы профиля, ступеньки рельсовых стыков и даже винтовое кручение рельсовых нитей вдоль их продольной оси.

Указанные несовершенства пути могут быть успешно пройдены при торможении локомотивом, оборудованным рельсовым тормозом на постоянных магнитах, состоящим из нескольких секций сравнительно небольшой длины [22, 48, 81]. Минимальная длина такой секции ограничена как по конструктивным соображениям, так и по магнитодинамическим (поскольку в рельсах под движущимся тормозом возникают вихревые токи, то на концах каждой его секции магнитное поле изменяется, что влияет не только на реализуемое тормозное усилие конкретной секцией, но и на работу смежных секций).

Для выбора представительного участка реального шахтного пути, по методике автора проводили измерения параметров рельсового пути на шахте «Терновская» ДТЭК «Павлоградуголь». Наиболее подходящим был выбран участок закругления восточного полевого откаточного штрека горизонта 265 м, имеющий одновременно средний радиус кривизны в плане, равный 21 м, перегиб профиля пути радиусом 155 м и винтовое кручение ниток профиля с шагом 300 м. Такие параметры пути можно считать наиболее типичными для работы шахтных локомотивов в режиме торможения (это примерно две трети спусков с уклоном более 20 %). На кривых меньшего радиуса силы сопротивления воз-

растают настолько, что необходимости в дополнительном торможении, как правило, не возникает [46].

Влияние локальных несовершенств рельсов (ползуны и синусоидальный износ поверхности катания) в данном случае не учитывались.

Известно, что развиваемая рельсовым тормозом сила торможения зависит, прежде всего, от сил магнитного притяжения, которые при прочих равных параметрах магнитной системы определяются воздушным зазором между рельсом и наконечниками тормоза. Известно, что для хорошо приработанных наконечников и рельсов на идеально ровном и достаточно чистом пути он равен примерно 0,1 мм (0,15 мм по данным Салова В.А. [75]). Для новых неприработанных наконечников тормозов и рельсов Р34 его значение равно 0,22 мм. При этом возможности магнитной системы не реализуются полностью. Поскольку поверхность катания рельсов реального шахтного пути значительно отличается от плоскости, величина воздушного зазора существенно зависит от длины тормоза.

Определение эквивалентного зазора выполнялось в компьютерной программе трехмерного твердотельного проектирования КОМПАС 3D методом создания модели опирания наконечников рельсовых тормозов различной длины на рельсы (внутренний и наружный), деформированные эквивалентно выбранному реальному участку пути [55]. На модель рельса 1 (рис. 2.9, а) накладывалась модель тормоза 2 до их взаимного соприкосновения в точке 3 и строились тела, соответствующие воздушным зазорам между рельсом и тормозом 4 и 5 (два зазора между поверхностью катания рельса и поверхностями трения двух полюстных наконечников рельсового тормоза).

При помощи встроенных функций программы определяли площадь контактирующих поверхностей и объем воздушного зазора. Поверхность полюсного наконечника тормоза на изогнутом участке рельса не полностью совпадает с поверхностью дорожки катания рельса, как это видно на рис. 2.9, б. Отношение объема к площади есть ни что иное, как эквивалентный зазор для конкретных условий.

С целью упрощения, указанные выше построения проводились для половины тормоза. Как видно из рис. 2.10, с увеличением длины наконечников рельсовых тормозов растет и эквивалентный зазор между ними и рельсами (для внутреннего рельса – кривая 1, для внешнего – 2). При длине тормоза от 0,125 до 0,5 м эквивалентный зазор изменяется в диапазоне от 0,22 до 0,54 мм, что достаточно близко к величине зазора на прямых рельсах без несовершенств (линия 3) и вполне приемлемо для столь трудных условий эксплуатации на реальном шахтном пути.

При большей же длине тормоза из-за значительной искривленности рельсовых ниток зазор становится большим, что ухудшает проводимость магнитной цепи и, следовательно, уменьшает силу магнитного притяжения. Далее, на натурном эксперименте в статике над ровным горизонтальным рельсом, а затем над участком рельса, с деформированным аналогично реальному (см. рис. 2.9, а), размещали магнитные рельсовые тормоза различной длины, собранные с использованием однотипных постоянных магнитов.

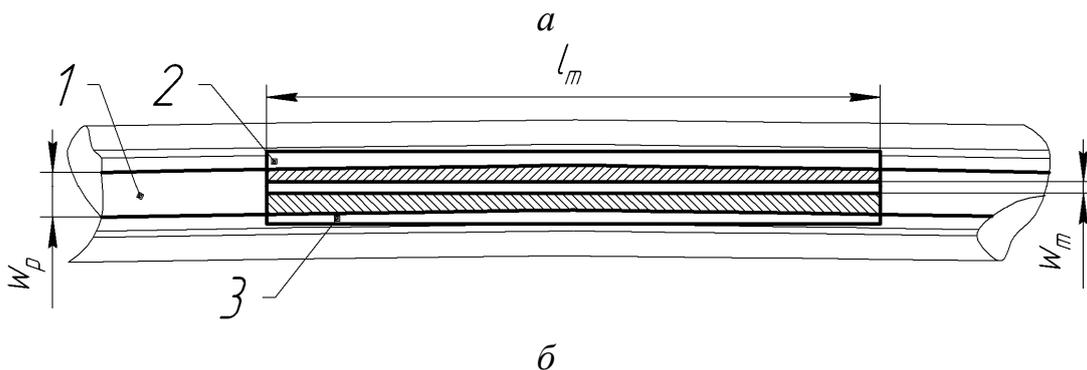
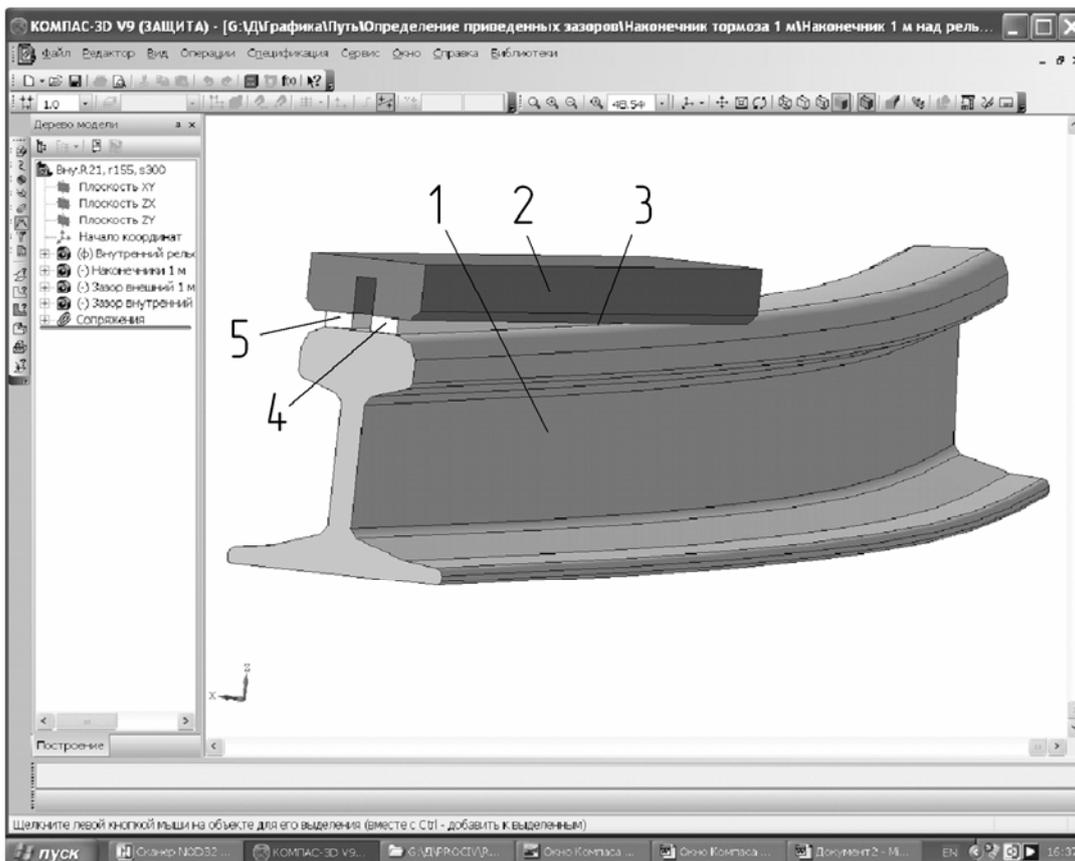


Рис. 2.9. Расчетная схема определения величины эквивалентного зазора:  
 а – трехмерное моделирование;  
 б – пресечение площадей наконечников и рельса (вид сверху)

Зазор между рельсом и наконечником тормоза каждого типоразмера последовательно устанавливали от минимально возможного, равного 0,1 мм (соприкосновение), до 2 мм и динамометром на отрыв измеряли силу магнитного притяжения.

Ослабление силы магнитного притяжения к рельсу для рельсовых тормозов различной длины [76] можно обозначить коэффициентом использования силы магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза к рельсу  $k_{o\ ijm}$  (отношение силы притяжения тормоза над реально искривленным рельсом к ее максимально возможной величине над прямым рельсом), который для выбранного участка пути изменяется в соответствии с зависимостью 4 (см. рис. 2.10).

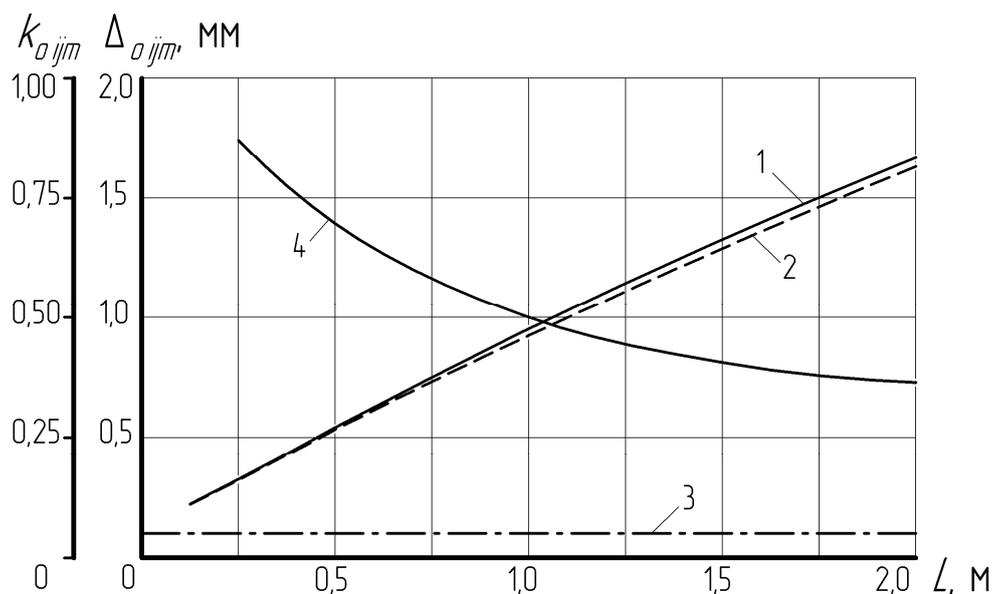


Рис. 2.10. Зависимость величины эквивалентного зазора от длины тормоза

Максимальный коэффициент (близкий к единице) получается при наибольшей площади контакта наконечников тормоза с дорожкой контакта рельса и при минимальном зазоре между ними. Поэтому его значение при движении локомотива по рельсовой колее постоянно изменяется как функция  $k_{o ijm} = f(R, i_p, i_s)$  и в каждый конкретный момент времени равно

$$k_{o ijm} = \frac{S_m \cap S_p}{S_m} \frac{\Delta_{o ijm}}{\Delta_0},$$

где  $S_p$ ,  $S_m$  – площади контактирующих поверхностей дорожки катания рельса 1 (рис. 2.9, б) и наконечников 2 и 3 магниторельсового тормоза соответственно,  $m^2$ , равные

$$S_p = l_m w_p; \quad S_m = l_m (w_p - w_m);$$

$l_m$  – длина контактной поверхности наконечника магниторельсового тормоза, м;  
 $w_p$ ,  $w_m$  – ширина дорожки катания рельса и наконечника магниторельсового тормоза соответственно, м;

$\Delta_{o ijm}$  – воздушный зазор между рельсом и наконечниками тормоза, м;

$\Delta_0$  – воздушный зазор между рельсом и наконечниками тормоза для хорошо приработанных наконечников и рельсов на идеально ровном и достаточно чистом пути, м, равен 0,1 мм.

Пересечение площадей  $S_m$  и  $S_p$  удобнее определять геометрически методом вычислительного эксперимента на электронной модели локомотива в режиме торможения магниторельсовыми тормозами на реальных шахтных путях,

имеющих искривления в плане и профиле. Для участка пути функция определяется заранее и при необходимости аппроксимируется удобной зависимостью.

В ходе эксперимента проводились измерения с магнитами трех типов высотой магнитного блока, равной 120 мм. Как видно из рис. 2.11, удельная сила магнитного притяжения  $F_{\text{пум}}$  (отношение величины силы магнитного притяжения к длине тормоза) для тормозов на современных магнитах из сплава неодим-железо-бор (кривая 1) выше, чем для тормозов с магнитами алюминий-никель-кобальт (кривая 2). Тормоза с магнитами второго поколения типа самарий-кобальт (кривая 3) уступают первым двум, по измеряемому показателю. Исследования показали, что величина зазора между наконечником тормоза и поверхностью катания рельса существенно влияет на значение силы магнитного притяжения. При зазоре, равном 0,1 мм,  $F_{\text{пум}}$  составляет примерно 97 % от теоретически возможной (при зазоре равном нулю), при зазоре в 0,5 мм – 84 %, а при зазоре в 1,0 мм – только 72 %. Линия 4 (зазор, равный 0,1 мм) отсекает от кривых участки, которые в реальных условиях никогда не используются по причине наличия промежуточной среды между наконечником тормоза и поверхностью катания рельса.

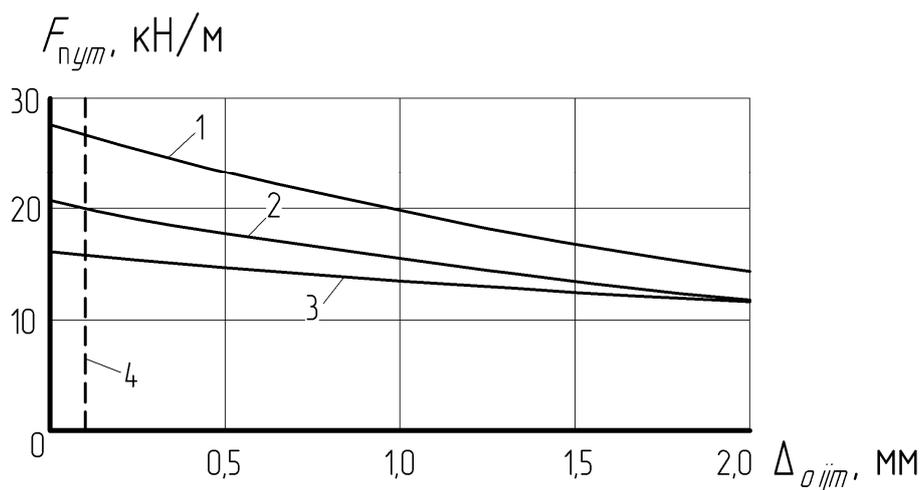


Рис. 2.11. Зависимость удельной силы магнитного притяжения от величины воздушного зазора для рельсовых тормозов на постоянных магнитах различного типа

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что эквивалентный магнитный зазор для рельсовых магнитных тормозов длиной от 125 до 250 мм, при движении по реальному шахтному пути с наиболее характерными параметрами, приближается к оптимальному и не превышает 0,33 мм. При этом сила примагничивания тормоза к рельсу (а значит и сила торможения) реализуется более чем на 85 % от теоретически возможной. Это значит, что по критерию минимизации воздушного зазора в системе магнитный рельсовый тормоз – рельс наиболее рациональной была бы секция магнитного рельсового тормоза длиной не более 300 мм.

Однако известно, что при движении на тормозной блок секционного рельсового тормоза действуют магнитные поля вихревых токов, возникающих в рельсе, динамические и тепловые нагрузки, снижающие магнитную силу взаимодействия. Для оценки влияния размагничивающих факторов на стабильность сил магнитного притяжения при движении оборудованного тормозами на постоянных магнитах локомотива по реальному шахтному пути проведены динамические испытания. В движении определялись магнитные поля в рельсе и рабочем зазоре между наконечниками тормоза, а также экспериментальные зависимости тормозной силы от скорости движения для тормозных секций различной длины.

Измерение индукции в рабочем зазоре при движении тормозного блока рельсового тормоза на постоянных магнитах проводилось по методике [9, 76]. Перед измерениями производили магнитную подготовку, заключающуюся в многократном реверсировании магнитного потока рельсов для получения установившейся петли гистерезиса. Измерение магнитного потока осуществляли при его коммутации от  $-\Phi$  до  $+\Phi$ . Схема эксперимента для динамических исследований параметров рельсовых тормозов представлена на рис. 2.12. К раме 1 электровоза через наклонные динамометрические тяги 2 присоединялось два составных рельсовых тормоза на постоянных магнитах (правый и левый), состоящих из двух секций 3 каждый. Длина секции обозначена  $L$ , а расстояния между соседними секциями –  $l$ . Скорость движения локомотива измерялась при помощи путевых датчиков 4, перемещающихся над стационарными площадками опор 5. В специально подготовленных пазах рельсов 6 размещали измерительные витки-рамки 7 шириной  $a$ .

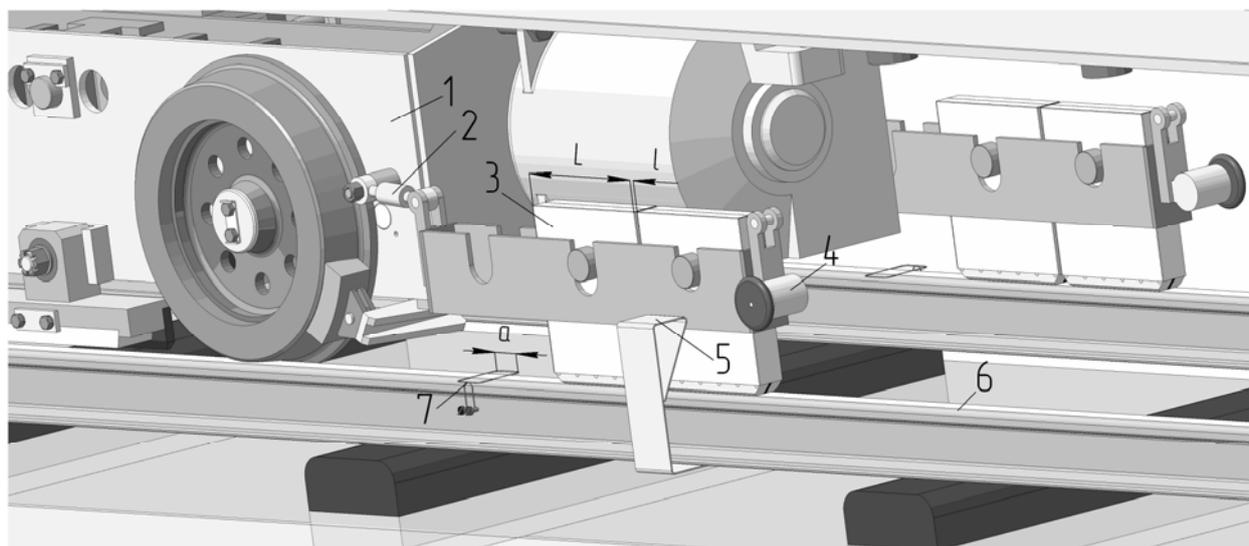


Рис. 2.12. Схема эксперимента по определению электродинамических явлений в системе магниторельсовый тормоз – рельс

Показания датчиков фиксировали осциллографом. В движение электровоз приводился собственными тяговыми двигателями. Замеры производили на

участке пути шахты «Герновская» ДТЭК «Павлоградуголь». При движении тормозного блока в рельсе наводится электродвижущая сила (ЭДС)

$$e_{эдс} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.12)$$

При проезде секции тормоза над витком-рамкой, магнитные линии тормоза наводят в ней электрический ток, который фиксируется гальванометром осциллографа, отклоняя луч пропорционально величине ЭДС в левом 1 и правом 2 рельсах (рис. 2.13).

Сигналы путевых датчиков по левому 3 и правому 4 борту обозначают на осциллограмме моменты времени, когда тормоза находятся над витками-рамками, установленными на рельсах, и позволяют определить скорость движения экипажа. Сигналы динамометрических тяг, пропорциональные силам торможения правого 5 и левого 6 тормозов, также записываются на ленту. Время обозначается отметчиком осциллографа. В набегавшей части секции тормоза возникает краевой эффект (или концевой, как его иногда называют), когда вихревые токи по (2.12) создают магнитное поле, которое «размагничивает» магнитную систему, уменьшая, тем самым, силу магнитного притяжения тормоза к рельсу. Индукция в зазоре между наконечниками тормоза изменяется в зависимости от скорости движения локомотива и от величины зазора между секциями составного тормоза.

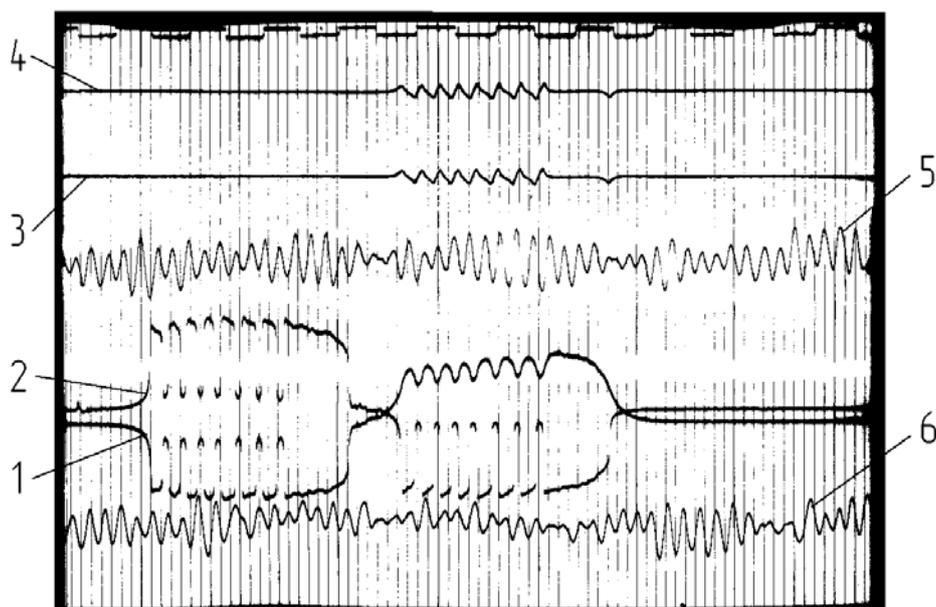


Рис. 2.13. Осциллограмма параметров движения тормозов электровоза по реальному рельсовому пути

На графике (рис. 2.14) приведены зависимости магнитной индукции в рабочем зазоре составного двухсекционного рельсового тормоза от величины относительного зазора между секциями тормоза (отношение расстояния между

соседними секциями тормоза к длине одной секции), полученные теоретически (штриховая линия) и экспериментально (сплошная) на различных скоростях движения. Кривая 1 соответствует скорости 2 м/с, кривая 2 – для скорости, равной 3 м/с, зависимость 3 – для 4 м/с.

Адекватность модели, предложенной в [82] и дополненной в [55, 83], проверяли методами математической статистики по коэффициенту корреляции

$$R_B = \sqrt{1 - \frac{\sum (B_{\zeta} - \bar{B}_m)^2}{\sum (B_{\zeta} - \bar{B}_{\zeta})^2}},$$

где  $B_{\zeta}$  – экспериментальное значение индукции в рельсе  $B_p$  в  $i$ -м опыте, Тл;  $\bar{B}_{\zeta}$ ,  $\bar{B}_m$  – математическое ожидание значений индукции, полученных экспериментально и теоретически, соответственно, Тл.

Коэффициент корреляции теоретических и экспериментальных зависимостей  $B_p = f(x)$  равен 0,96. Это подтверждает адекватность математической модели. Ошибка вычислений не превышает 10 %, что является допустимым для электродинамических расчетов.

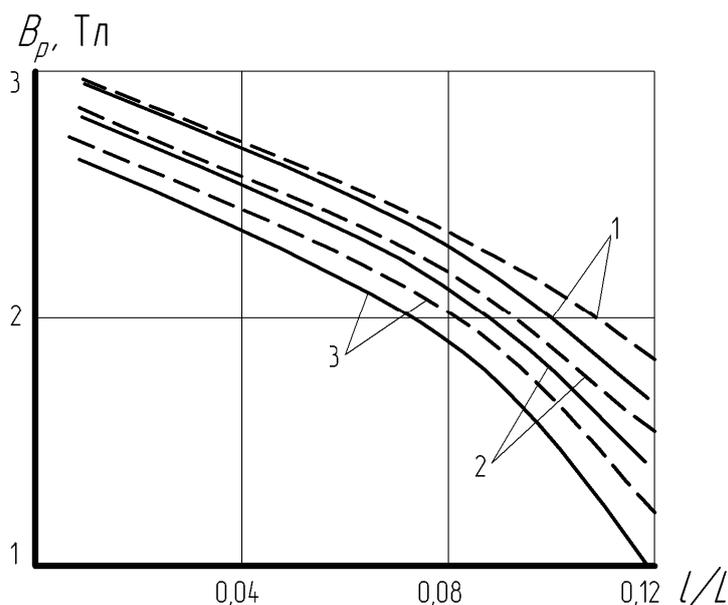


Рис. 2.14. Зависимость магнитной индукции от величины относительного зазора между секциями тормоза при различной скорости движения

Взаимное влияние двух соседних секций составного магнитного тормоза оценивалось также путем измерений сил торможения на каждой секции (см. рис. 2.13). Сигналы от динамометрических тяг записывались осциллографом. Величина тормозной силы, развиваемой секцией тормоза, равна

$$F_{m\ ijm} = F_{\partial} \cos \beta,$$

где  $F_D$  – показания динамометра, Н;

$\beta$  – угол наклона тяги по отношению к продольной оси рельса, рад.

Скорость движения определяли из выражения  $v = \frac{L}{t}$ , где  $t$  – время прохождения тормозного блока над витком-рамкой (см. рис. 2.13), с.

По результатам обработки полученных данных были определены средние значения величины тормозной силы магниторельсовой секции  $F_{m inj}$  при скорости движения локомотива до 4 м/с. На рис. 2.15 приведены зависимости удельной тормозной силы секционированного рельсового тормоза (отношение тормозной силы, к длине составного тормоза) от величины относительного зазора между секциями тормоза при различных скоростях движения. Кривая 1 соответствует скорости 2 м/с, кривая 2 – для скорости, равной 3 м/с, зависимость 3 – для 4 м/с.

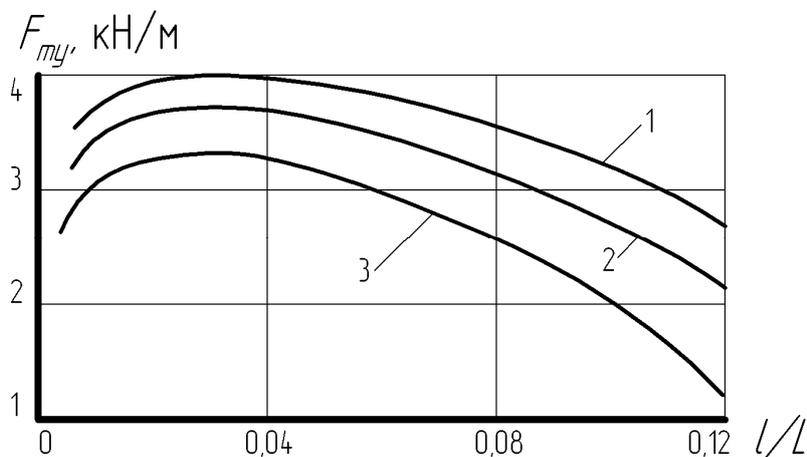


Рис. 2.15. Зависимость удельной тормозной силы от величины относительного зазора между секциями тормоза при различной скорости движения локомотива

Для количественной оценки эффективности рельсового тормоза на постоянных магнитах зависимость  $F_{m inj} = f(v)$  представим в виде  $F_{m inj} = F_0 \exp(-\phi v)$ . Здесь  $F_0$  – тормозная сила при нулевой скорости (на стоянке).

Используя метод наименьших квадратов, получим

$$\phi = \left( \frac{\sum_{\zeta=1}^{\sigma} v \ln F_{\zeta}}{\sum_{\zeta=1}^{\sigma} v^2} \right)^{-1},$$

где  $F_{\zeta}$ ,  $v_{\zeta}$  – полученное экспериментально значение тормозной силы, Н, при установившейся скорости, м/с, в  $\zeta$ -м заезде.

Оценку эффективности секционного рельсового тормоза производили по среднеинтегральной мощности и тормозной силе.

Величину тормозной силы секции магниторельсового тормоза локомотива, движущегося по ровному прямому участку рельсового пути, можно определить следующим образом

$$F_{m\ ijm} = F_{0\ пум} l_m \varphi_m k_{vm} k_{vf} k_T, \quad (2.13)$$

где  $F_{0\ пум}$  – удельная сила магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза к прямому рельсу, Н/м;

$f_m$  – коэффициент трения скольжения материала наконечника магниторельсового тормоза по рельсу для конкретных условий загрязненности рельсов;

$k_{vm}$  – коэффициент, учитывающий влияние скорости движения магниторельсового тормоза на силу его магнитного притяжения к рельсу, (учет влияния краевого эффекта, когда вихревые токи создают магнитное поле, «размагничивающее» магнитную систему, уменьшая тем самым эффективность торможения);

$k_{vf}$  – коэффициент, учитывающий влияние скорости движения магниторельсового тормоза на коэффициент трения скольжения тормозной колодки по дорожке катания рельса;

$k_T$  – коэффициент, учитывающий ослабление магнитного поля магниторельсового тормоза из-за повышения его температуры в процессе торможения.

Экспериментально обнаруженное снижение силы магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза к рельсу при возрастании скорости движения локомотива, обозначенное коэффициентом  $k_{vm}$ , хорошо аппроксимируется степенной функцией [25] (полученной с помощью программного комплекса Wolfram Mathematica 7), листинг ее приведен ниже.

$$1.00000 - 0.163867 v + 0.0930833 v^2 - 0.0395417 v^3 + 0.00791667 v^4 - 0.000591667 v^5.$$

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности установки на шахтных локомотивах составных рельсовых тормозов на постоянных магнитах с поперечным замыканием магнитного потока из-за более устойчивого размещения секций тормоза на поверхности катания рельса.

Рациональной следует считать длину секции магниторельсового тормоза от 150 до 300 мм с расстоянием между соседними секциями, равным от 10 до 15 мм. Такой тормоз реализует силу торможения на 20 % большую, чем цельный тормоз той же длины.

#### 2.4. Распределение температур в гравитационном рельсовом тормозе и определение его рациональных параметров

При торможении кинетическая энергия поезда преобразуется в тепловую, которая, выделяясь в зоне трения тормозного блока, отрицательно влияет на свойства фрикционных материалов, поэтому эффективность торможения будет зависеть от конструкции тормоза и качества материала колодки [27].

Тормозные колодки шахтного локомотива работают в очень жестких условиях [82]. Это и перманентные перепады температур, и условия стопроцентной влажности, абразивная пыль, грязь, перегревы при торможении на спуске рельсового пути. Все это предъявляет жесткие требования не только к свойствам стали или полимерного фрикционного композита, но и к стабильности этих свойств. Фрикционный материал – это главный компонент, отвечающий за работу колодки. Коэффициент трения должен оставаться на постоянном уровне во всем диапазоне температур, скоростей и давлений. Он обязан обеспечивать длительный срок службы колодки, а также поглощать и рассеивать тепло, выделяемое при работе.

Как известно, росту эффективности любого тормозного механизма препятствует температура в паре трения [38]. Чем чаще шахтный локомотив тормозит, тем больше выделяется тепла и тем сильнее нагреваются накладки тормоза [28, 29]. Снижение коэффициента трения приводит к потере фрикционных свойств тормозной колодки. В работе [72] выполнены термомеханические расчеты фрикционных пар тормозных устройств, получены выражения для определения величин среднеобъемной температуры тормозного устройства.

Выполним теоретическое описание стационарного температурного поля гравитационного рельсового тормоза при реализации им тормозной силы, а также определим поле распределения температур и найдем значение нужной толщины тормозной накладки, используя [34, 49].

По рельсу 1 (рис. 2.16), трется тормозная колодка 2, зафиксированная планкой 3 на тормозном башмаке 4, закрепленном на раме локомотива через цилиндрический шарнир 5.

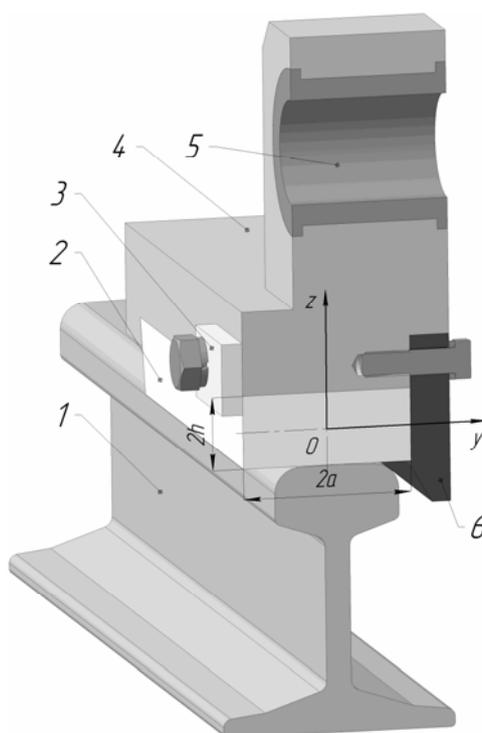


Рис. 2.16. Схема взаимодействия тормозной колодки неподрессоренного гравитационного тормоза с рельсом

Для гарантированного попадания тормозной колодки на дорожку катания рельса к башмаку с внутренней стороны колеи прикреплен отбойник 6, выполняющий ту же функцию, что и реборда железнодорожного колеса. Рассмотрим колодку рельсового тормоза шириной  $2a$  и высотой  $2h$  (см. рис. 2.16). Учитывая, что длина рельсового тормоза намного больше ширины и высоты, задачу теплопроводности можно считать плоской, а температурное поле симметричным относительно вертикальной оси  $Oz$ .

Для определения распределения температур в накладке воспользуемся уравнением теплопроводности [27, 34]:

$$\nabla^2 \Theta = 0, \quad (2.14)$$

где  $\nabla^2$  – оператор второй производной по координатам  $y, z$ ;

$\Theta = (T - T_0)$  – приращение температуры от  $T_0$  до  $T$ ;

$T, T_0$  – температура в тормозном блоке и окружающей среде, К.

Решение уравнения (2.14) найдем при следующих граничных условиях, отражающих теплообмен между тормозным блоком и окружающей средой, по закону Ньютона [34].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial y} + H_{g1} \Theta = 0 \text{ при } y = a, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial y} - H_{g1} \Theta = 0 \text{ при } y = -a; \\ \frac{\partial \Theta}{\partial z} + H_{g2} \Theta = 0 \text{ при } z = h, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial z} = H_{g0} \text{ при } z = -h, \end{aligned}$$

где  $H_{g1}, H_{g2}$  – коэффициенты теплообмена между колодкой и окружающей средой, а также колодкой и башмаком рельсового тормоза;

$H_{g0}$  – параметр теплоотвода, определяемый как

$$H_{g0} = F_{gy} v \frac{\alpha_T}{\lambda},$$

где  $F_{gy}$  – удельная тормозная сила гравитационного тормоза (отношение тормозной силы к длине рельсового тормоза), Н/м;

$v$  – скорость движения локомотива, м/с;

$\alpha_T$  – коэффициент распределения тепловых потоков между рельсом и тормозом;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Вид решения уравнения (2.14) определяется геометрией колодки, интенсивностью теплового потока, граничными условиями и теплофизическими свойствами материала. Уравнение решим при указанных граничных условиях, выбрав его решение в виде

$$\Theta = c_1 + c_2 y^2 + c_3 z + c_4 z^2, \quad (2.15)$$

которое согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [72]. Удовлетворяя граничным условиям по методу коллокаций [28] в точках с координатами  $(0, h)$ ,  $(0, -h)$ ,  $(a, 0)$  получим следующую систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов  $c_1, c_2, c_3, c_4$ :

$$\begin{cases} H_{g1}c_1 + (2 + H_{g1}a^2)c_2 = 0; \\ H_{g2}c_1 + (1 + H_{g2}h)c_3 + (2h + H_{g2}h^2)c_4 = 0; \\ c_3 - 2hc_4 = H_{g0}; \\ c_2 + c_4 = 0. \end{cases} \quad (2.16)$$

Из решения системы уравнений (2.16) получим выражения неизвестных коэффициентов  $c_1, c_2, c_3, c_4$  через геометрические и термомеханические параметры колодки, башмака и параметры нагрузки

$$c_1 = -\frac{(2 + a^2 H_1) B H_{g0}}{H_2 D}; \quad c_2 = \frac{B H_{g0}}{D}; \quad c_3 = W - \frac{2h B H_{g0}}{D}; \quad c_4 = \frac{B H_{g0}}{D},$$

где  $B = 1 + h H_{g2}$ ,  $D = 2 + 4h + a^2 H_{g1} + 3h^2 H_{g2}$  – упрощающие обозначения.

Используя полученное решение, найдем глубину нагрева  $b_{кр}$  тормозной колодки выше критической температуры  $\Theta_{кр}$  как

$$b_{кр} = h - \frac{-c_3 \pm \sqrt{c_3^2 - 4c_4(c_1 - \Theta_{кр})}}{2c_3}.$$

Для колодки рельсового тормоза с размерами  $a = 0,1$  м,  $h = 0,03$  м,  $H_{g1} = 140$  м<sup>-1</sup>,  $H_{g2} = 40$  м<sup>-1</sup> и параметрами нагружения  $F_{gy} = 5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>2</sup>,  $v = 5$  м/с,  $\alpha_T = 0,5$ ,  $\lambda = 50$  Вт/(м·К) (для тормозных колодок, изготовленных из стали марки Ст.3кп) приращение температуры из (2.15) выражается формулой

$$\Theta = 73,88 + 3042,45y^2 + 1174,53z + 15042,45z^2. \quad (2.17)$$

Поле температур в поперечном сечении колодки, построенное в соответствии с (2.17), изображено на рис. 2.17. Экспериментальные измерения температуры вблизи зоны контакта доказали, что прирост температуры за одно торможение при тормозном пути около 40 м на сухих чистых рельсах составляет 75 °С, на мокрых

рельсах и покрытых угольно-прородной грязью – 50 °С. Анализ осциллограмм торможений показывает, что максимальная температура накладки после 10 торможений подряд при тормозном пути около 40 м составляет 180 °С, что не приводит к изменению ее фрикционных характеристик.

Основная задача – определение допустимой толщины колодки рельсового тормоза и допустимой скорости движения шахтного локомотива. Под допустимой толщиной колодки понимают такое ее начальное значение (соответствующее температуре окружающей среды), при которой температура колодки при эксплуатации тормозов не превышает допустимую для данного класса материала.

За расчетную допустимую скорость движения при использовании рельсовых тормозов для служебного торможения принимают значение, соответствующее длительности включения, при которой температура колодки равна максимальной температуре при реальном режиме работы тормозов.

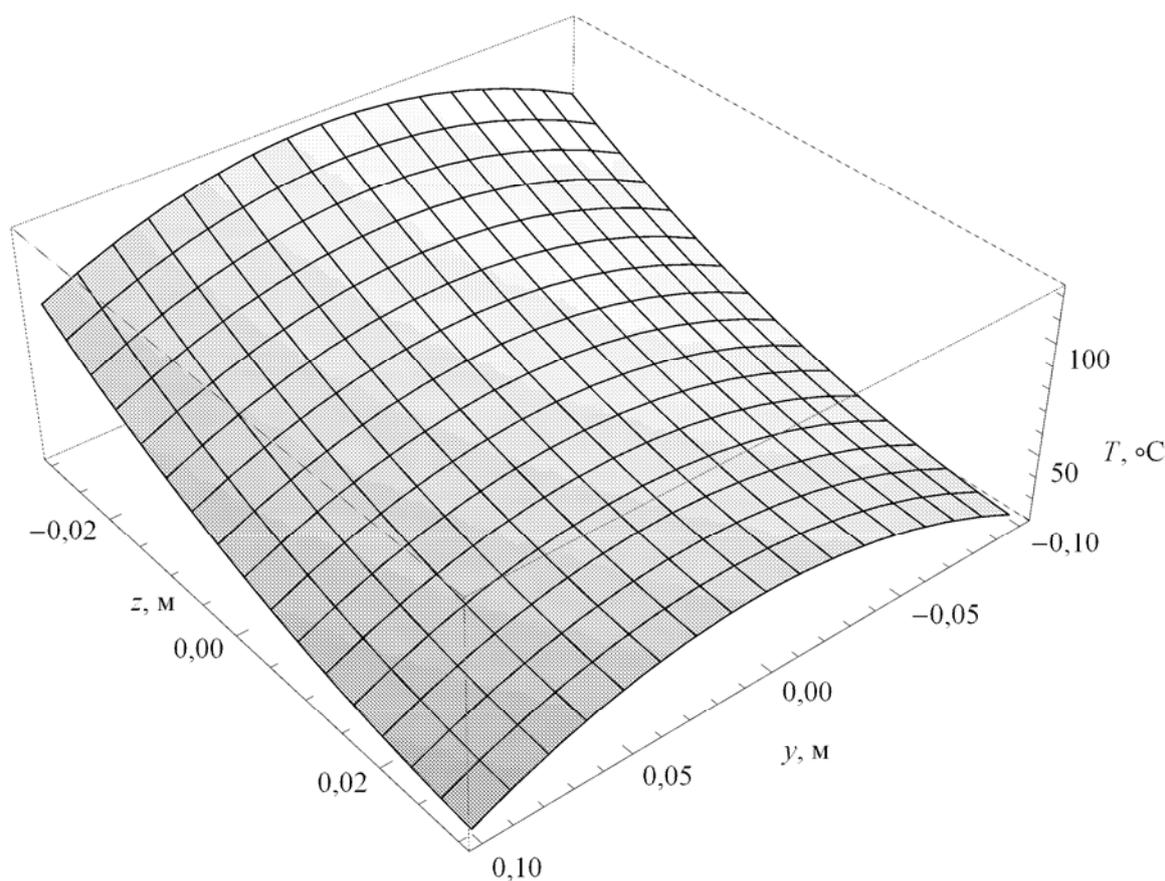


Рис. 2.17. Поле температур в сечении тормозной колодки рельсового тормоза

Максимальную температуру колодки гравитационного тормоза определяли экспериментально в шахтных условиях при эксплуатации специально переоборудованных шахтных электровозов АМ8Д на горизонте 245 м шахты "Герновская", где электровозная откатка применяется для транспортирования породы из забоев подготовительных выработок. Условия транспортировки следующие: уклон пути в грузовом направлении равен 35 ‰, длина перевозки составляет от 1 до 2 км, масса груженого состава до 45 т.

Температуру измеряли [30] термистором Т8С2М, установленным на колодке на расстоянии от 1 до 30 мм от поверхности трения. Термистор включали в одно из плеч одинарного измерительного моста. Балансировку моста осуществляли при 20° С подбором сопротивлений остальных плеч моста. Тарировку термистора производили в масляной ванне, помещенной в термостат.

При рейсовой работе рудничного поезда в течение смены регистрировали температуру тормозов. Максимальная температура колодки за 9 рейсов составила 85 °С, что соответствует длительности включения 25 мин.

При использовании тормозов для экстренного торможения допустимая скорость должна соответствовать времени одного торможения и времени, необходимого для затормаживания поезда стояночным тормозом (если торможение производится на уклоне). Проведенные расчеты и эксперименты показывают, что по условию температурной устойчивости материала колодки ее толщина может быть не более 50 мм.

Полученное решение задачи позволяет на стадии проектирования выполнить расчет температурной устойчивости гравитационного рельсового тормоза.

Экспериментальные исследования позволили сделать вывод о возможности использования гравитационного тормоза для служебного, экстренного и стояночного торможения.

Тормозное усилие достаточно эффективно реализуется с помощью гравитационного тормоза, установленного между колесными парами тележки и имеющего встроенное рессорное подвешивание тормозной колодки (рис. 2.18).

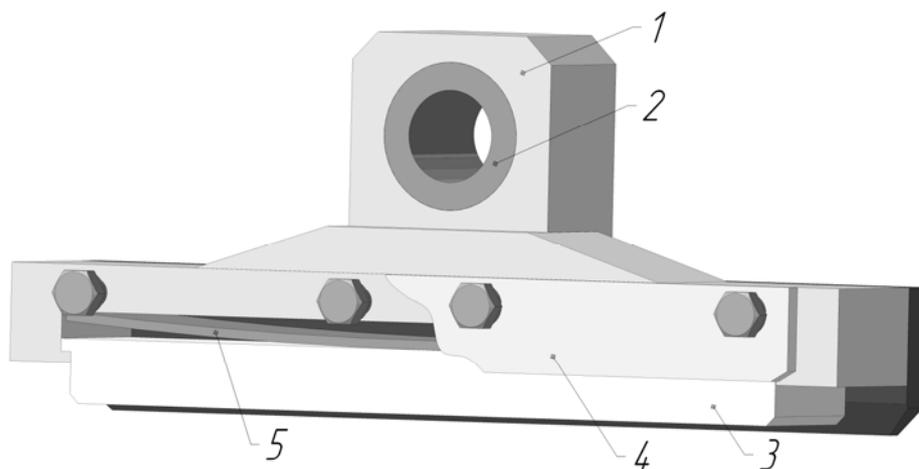


Рис. 2.18. Гравитационный подрессоренный тормоз

Башмак 1 с втулкой 2 для крепления к раме приводной тележки имеет сменную тормозную колодку 3, зафиксированную от выпадения накладкой 4. Тормозная колодка после опускания ее на рельс при торможении имеет возможность вертикальных перемещений внутри башмака, деформируя при этом изогнутую листовую рессору 5. По мере опускания рамы локомотива и передачи вертикальной нагрузки на рельс через рессору возрастает нормальная реакция рельса и, соответственно, увеличивается сила трения тормозной колодки о поверхность дорожки катания рельса, а значит и тормозная сила локомотива.

При этом, за счет плавного регулирования высоты подвески рамы локомотива над рельсовым путем [41] с помощью гидроцилиндров подвески, силу торможения можно плавно изменять в диапазоне от нуля до максимума, не смотря на сравнительно небольшой ход тормозной колодки внутри башмака, равный примерно 10 мм.

Наличие существенно нелинейных упругих и диссипативных элементов в ходовой части локомотива, нелинейное взаимодействие колеса с рельсом при качении, а также вертикальные и горизонтальные пульсации, вызванные фрикционными процессами в режиме торможения рельсовыми тормозами, – все это приводит к тому, что колебания шахтных локомотивов описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений (2.11) [56]. При оптимизации параметров тормозной системы шахтного локомотива необходимо учесть взаимодействие колебаний в различных плоскостях и их влияние на характеристики динамической системы.

Проанализировав полученные результаты можно сделать вывод о том, что удельные тормозные силы магниторельсовых тормозов  $F_{my}$  (отношение тормозной силы к длине рельсового тормоза), реализуемые рельсовым тормозом на современных постоянных магнитах из сплава неодим-железо-бор, и гравитационным тормозом  $F_{gy}$  с тормозной колодкой из стали марки Ст.3кп, примерно равны. Они составляют от 14,8 до 58,4 кН/м при разных скоростях движения. Однако, в отличие от гравитационного, магниторельсовый тормоз не вызывает существенных вертикальных колебаний системы рельсовый путь-локомотив, поскольку примагничиваясь к рельсу он прикладывает к элементам верхнего строения пути нагрузки, противоположные силе веса локомотива, в значительной мере рассеивая колебания, возникающие при качении колесных пар.

Поэтому можно сделать вывод о том, что наиболее целесообразным есть использование подрессоренного гравитационного тормоза в качестве аварийного и стояночного. Удачной для служебного торможения может быть комбинация секционного магниторельсового тормоза, который включается ступенчато с рывками, и подпружиненного гравитационного, который будет сглаживать эти рывки. Наличие магниторельсового и гравитационного тормозов на тяжелых шарнирно-сочлененных локомотивах следует считать обязательным.

Аргументом против использования предложенной конструкции гравитационного тормоза в качестве служебного следует считать возможность попадания посторонних предметов (которые могут находиться на реальном шахтном рельсовом пути) под днище тяговых секций при их опускании для торможения гравитационным тормозом, что в свою очередь может привести к сходу локомотива с рельсов. Но при увеличении упругого хода подвески гравитационного подрессоренного тормоза до 20 мм он может достаточно эффективно использоваться в качестве служебного тормоза шахтного локомотива, при этом высота его установки над дорожкой катания рельса должна быть не больше 15 мм для достижения нужной скорости срабатывания.

## 2.5. Влияние промежуточной среды на реализацию тормозной силы гравитационным рельсовым тормозом

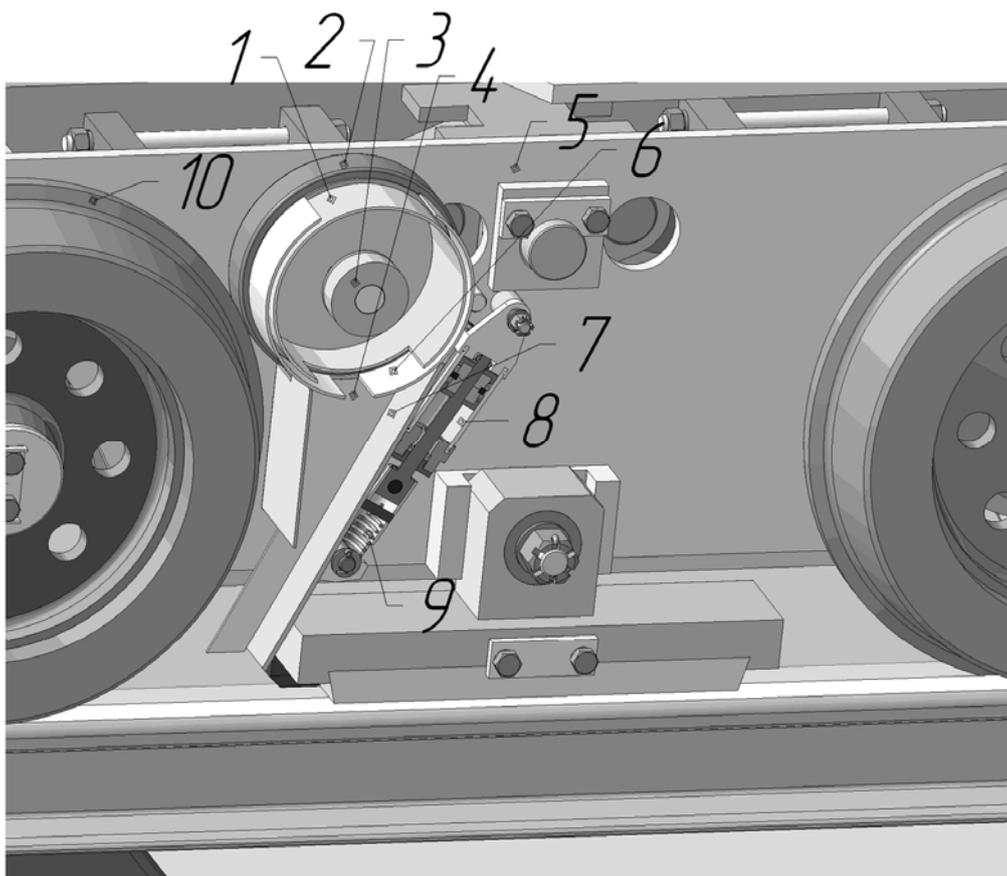
В современных шахтных рельсовых локомотивах в случае экстренного торможения обычно используют колесно-колодочный или магниторельсовый тормоза. В качестве стояночного чаще всего применяется колесно-колодочный тормоз, реже рельсовый тормоз на постоянных магнитах. Однако в силу различных обстоятельств, выход из строя указанных тормозных систем (например, по причине механических поломок отдельных элементов) делает невозможным плавное торможение груженого состава на крутом спуске и, тем более не позволяет безопасно остановить локомотив для устранения неисправности. Надежность затормаживания тяжелого поезда на стоянке, особенно на время отсутствия машиниста в кабине локомотива, также является весьма актуальной задачей.

Наиболее надежным видом тормозных устройств, которые могли бы использоваться как стояночные, а также для экстренного торможения шахтных локомотивов всех типов есть гравитационные рельсовые тормоза, которыми оборудован шарнирно-сочлененный шахтный электровоз Э10 [41]. Вместе с тем, низкий коэффициент трения тормозной колодки о рельс в условиях шахтной загрязненности угольной пылью и влагой не позволяет иметь стабильные характеристики тормозной силы. Поэтому важной задачей есть определение влияния промежуточной среды на реализацию тормозной силы локомотивом, оборудованным гравитационным тормозом, а также разработка мер, повышающих эффективность его использования на реальном рельсовом пути с несовершенствами [80].

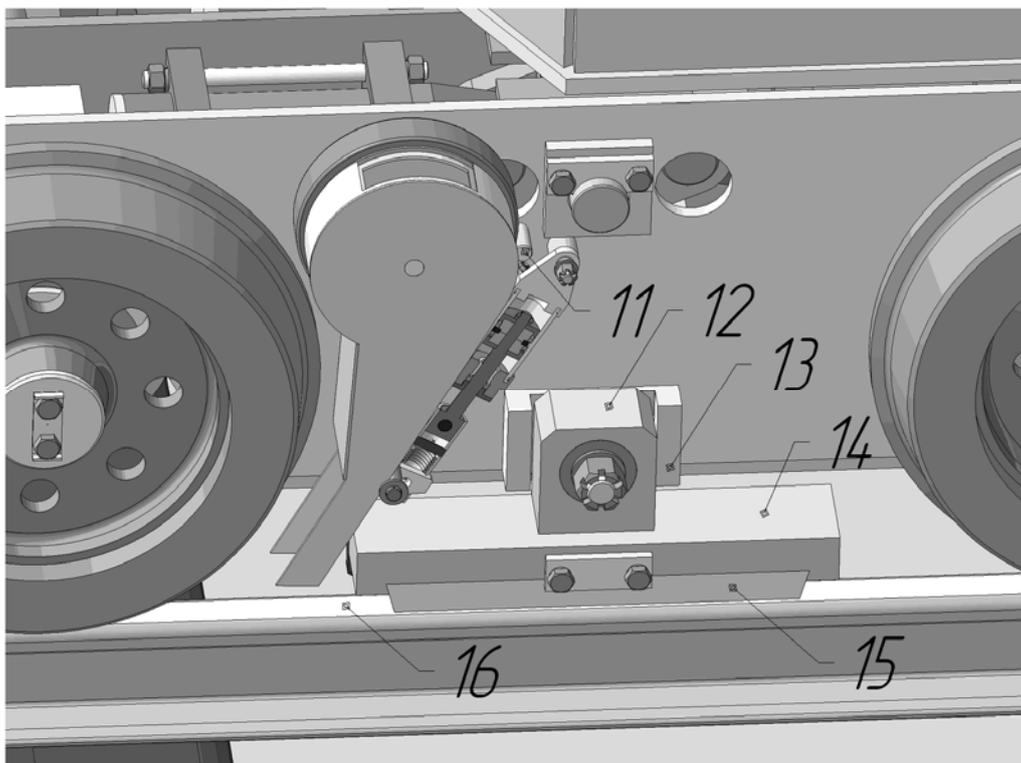
Минимизировать вредное влияние загрязнений можно применив подсыпку песка под башмак гравитационного тормоза. Однако известно, что в шахтных условиях песок не подвергается просеиванию и просушке, поэтому он склонен к слеживанию, слипанию, образованию комков в песочницах существующих шахтных локомотивов. Устранить указанные недостатки позволила песочница барабанного типа [1, 62], которая имеет (на рис. 2.19, *a* песочница и гидроцилиндр показаны в разрезе) вращающийся барабан 1 с резиновым ободом 2, закрепленный при помощи подшипникового узла 3 на качающемся рычаге 4, установленном на раме 5 тяговой секции локомотива.

Вращающийся барабан закрыт кожухом 6, имеющим отверстие в нижней его части, и содежит лоток 7 на качающемся рычаге 4. Когда на загрязненном участке пути необходимо повысить коэффициент сцепления, включают гидроцилиндр 8, который через пружину 9 поворачивает качающийся рычаг до соприкосновения резинового обода 2 с ребордой колеса 10. Барабан 1 начинает вращаться, встряхивая, перемалывая (по принципу барабанных мельниц самоизмельчения) и подсушивая имеющийся в нем песок.

Гравитационный тормоз 12 электровоза Э10 шарнирно крепится к раме тяговой тележки, но его угловые повороты ограничены упором 13, приваренным к раме локомотива. В башмаке 14 тормоза размещена сменная фрикционная вставка (колодка) 15, которая при опускании рамы локомотива вместе с башмаком 12 тормоза трется о дорожку катания 16 рельса, вызывая торможение состава.



*a*



*б*

Рис. 2.19. Песочница барабанного типа и гравитационный тормоз:  
*a* – барабан песочницы в рабочем положении;  
*б* – барабан песочницы в нерабочем положении

В подвеске указанного локомотива (на рис. 2.20 показано сечение тяговой тележки по осям гидроцилиндров подвески) размещены гидроцилиндры 1. В случае необходимости экстренного торможения или стоянки, рабочая жидкость из гидроцилиндров сливается, их штоки 2 выдвигаются, рычаги подвески 3 поворачиваются вокруг осей 4, закрепленных на раме тяговой тележки, и одновременно вокруг осей 5 колесных пар 6.

Периодически один раз за оборот загрузочное окно барабана совпадает с прорезью в нижней части кожуха, и некоторое количество песка просыпается на качающийся лоток 7, по которому он поступает на дорожку катания рельса перед башмаком тормоза. Поскольку в рабочем положении резиновый обод постоянно подпрыгивает над ребордой колеса в пределах рабочего хода пружины 9, то скорость вращения барабана переменна.

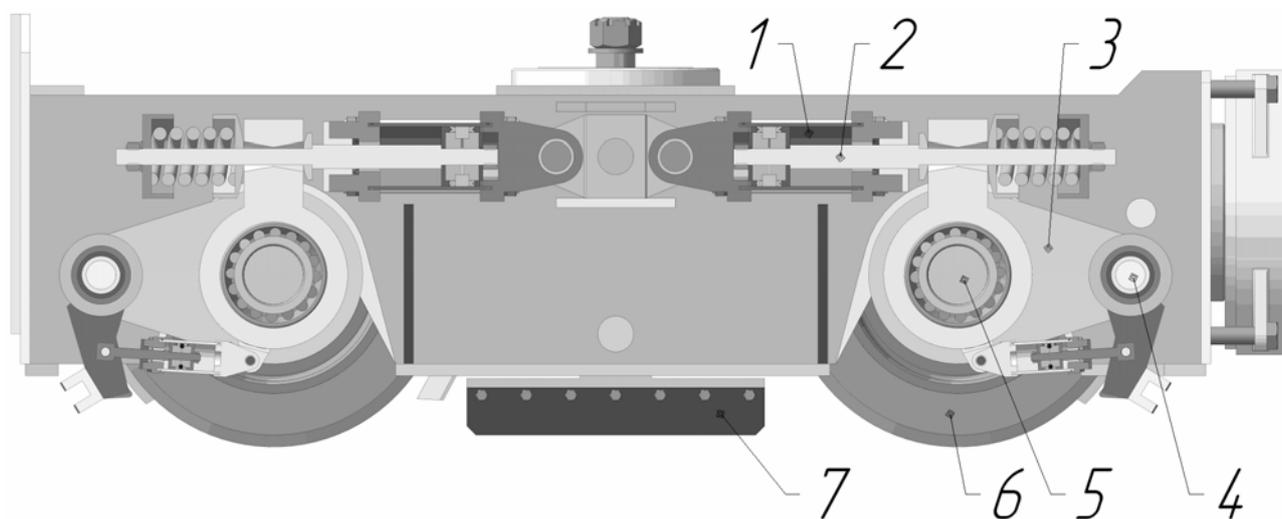


Рис. 2.20. Подвеска тяговой тележки

В дополнение рычаг 4 с лотком 7 непрерывно качается, поэтому частички песка совершают сложное движение, которое делает невозможным слипание даже очень сырого песка. Из барабана сразу весь песок не может высыпаться, поскольку размеры щели в кожухе выбраны так, что при неподвижном барабане песок с влажностью более 30 % образует прочный свод. В выключенном положении (рис. 2.19, б) гидроцилиндр прижимает резиновый обод 2 барабана 1 к упору 11 на раме локомотива.

Для торможения весь локомотив опускается до опирания на рельсы колодками гравитационного тормоза 7. В аварийной ситуации, когда, например, исчезло напряжение в бортовой сети локомотива и/или приводные двигатели насосов остановились, гидротаспределители (краны) устанавливаются в положение «открыто» и давление в магистрали гидроцилиндров подвески снижается, – рабочая жидкость выдавливается из гидроцилиндров силой веса локомотива, и он автоматически затормаживается гравитационным тормозом.

Поскольку современные локомотивы секционной компоновки имеют малую колесную базу, необходимую для устойчивого прохождения криволиней-

ных участков рельсового пути с радиусами кривизны менее 10 м, то невозможно создать гравитационный рельсовый тормоз достаточно большой длины, оборудованный фрикционными вставками из композитных материалов, например, типа ДАФМИ. По конструктивным соображениям при расположении гравитационного рельсового тормоза в тележке локомотива Э10 между колесными парами его длина не может превышать 0,6 м. Поэтому при работе гравитационного рельсового тормоза во фрикционных вставках возникают существенно бóльшие удельные давления, чем рекомендуемые производителем композитных материалов. В таких условиях использование фрикционных вставок для повышения коэффициента трения ограничено сроком их службы (буквально несколькими десятками торможений). Однако уже существуют специальные композитные материалы для тормозных колодок железнодорожного транспорта (например, ТИИР 300), лишенные этого недостатка. Значение коэффициента трения для фрикционной пары стальной тормоз – рельс в шахтных условиях (наличие значительного количества воды и угольной пыли на дорожках катания рельсов) не превышает величины 0,1, что не позволяет гравитационному рельсовому тормозу реализовать при экстренном торможении нужное тормозное усилие.

Твердые неорганические вещества, попадая в зону трения тормоза по поверхности дорожки катания рельса, дробятся и в значительной мере увеличивают площадь поверхности трения. Образующиеся при измельчении частицы новые поверхности несут большой запас свободной поверхностной энергии и обладают повышенными адсорбционными свойствами. Под действием этих сил происходит перенос органических загрязнений с поверхностей трения тормоза и рельса в разделяющий их дисперсный слой. Постоянное пополнение дисперсионного слоя новыми дисперсионными порошками и непрерывный вынос твердыми частицами органических веществ способствуют удалению смазочных материалов из зоны контакта тормоза и рельса. Однако наличие между трущимися поверхностями дисперсного слоя позволяет рассматривать процесс взаимодействия тормоза и рельса как жидкостное трение, при котором трущиеся поверхности должны быть полностью разделены слоем жидкой или твердой смазки.

Описанные особенности взаимодействия тормоза с поверхностью трения рельса положены в основу построения физической модели процесса. Поверхность рельса шахтного пути [77] имеет несовершенства (ползуны, углубления, прокат до 2 мм). Исследования [50] по определению профиля поверхности указывают, что основной вид несовершенств (около 65 %) – это синусоидальные неровности амплитудой от 1,2 до 1,5 мм и длиной волны от 40 до 60 мм. При взаимодействии тормоза и рельса между поверхностью рельса и поверхностью трения тормоза для описанной модели возникает нестационарное движение вязкой несжимаемой жидкости. Также будем считать, что толщина слоя промежуточной среды и длина неровности поверхности рельса намного меньше длины тормоза, поэтому рассмотрим задачу о истечении смазки между двумя наклонными друг к другу поверхностями. Будем также считать, что поверхность рельса неподвижна, а поверхность тормоза движется со скоростью  $v$ . Найдем закон вызванного этим движением течения промежуточной среды в слое между поверхностями тормоза и рельса.

Уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости имеет вид [33]

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_{cp y}}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial p(y, t)}{\partial y} + v_{cp} \frac{\partial^2 v_{cp y}}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial v_{cp y}}{\partial y} + \frac{\partial v_{cp z}}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (2.18)$$

где  $v_{cp}$ ,  $v_{cp y}$ ,  $v_{cp z}$  – скорость течения слоя промежуточной среды и ее составляющие по осям, м/с;

$\rho$  – плотность слоя промежуточной среды, кг/м<sup>3</sup>;

$p(y, t)$  – давление в слое промежуточной среды, Па;

$y$ ,  $z$  – координаты сечения слоя, аналогичные принятым на рис. 2.16, м.

Обозначим высоту слоя промежуточной среды через  $h_{cp}$ , а его минимальную величину при соприкосновении (когда между поверхностями трения остается эквивалентный зазор, равный амплитуде синусоидальной неровности, – примерно 0,15 мм) как  $h_{cp0}$ .

Далее обозначим  $p_0$  – начальное давление в слое, Па;  $\mu_{cp}$  – вязкость слоя промежуточной среды, м/с<sup>2</sup>;  $2a$  – ширина колодки тормоза.

Заменяя ускорение в (2.18) средним по толщине слоя и принимая

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_{cp y}}{\partial z^2} &= A(y, t); \\ A(y, t) &= \frac{1}{\mu_{cp}} \frac{\partial p(y, t)}{\partial y} + \frac{1}{v_{nc} h_{cp0}} \int_0^h \frac{\partial v_{cp y}}{\partial t} dz; \\ h &= h_{cp0} \left( 1 + k_n \frac{2y}{a} \right), \end{aligned} \quad (2.19)$$

где  $k_n$  – коэффициент поперечной неравномерности канала течения промежуточной среды из-за кривизны поверхности дорожки катания рельса.

Решение (2.19) будем искать при следующих граничных и начальных условиях:

$$v_{cp y} = -v_{cp}; \quad v_{cp z} = 0 \quad \text{при } z = 0.$$

$$v_{cp y} = 0; \quad v_{cp z} = 0 \quad \text{при } z = h_{cp}; \quad p = p_0 \quad \text{при } y_0 = 0; \quad y = a/2.$$

$$v_{cp y} = v_{cp}; \quad v_{cp z} = 0; \quad v_{cp} = v_{cp0}; \quad p = p_0 \quad \text{при } t = 0. \quad (2.20)$$

Интегрируя (2.19) по  $y$  и удовлетворяя (2.20), найдем

$$v_{cp\ y} = \frac{1}{2} A_{cp} (z^2 - zh_{cp}) - u_{cp} \left( 1 - \frac{z}{h_{cp}} \right), \quad (2.21)$$

где  $u_{cp}$  – скорость течения промежуточной среды в середине зазора между поверхностью трения колодки и дорожной катания рельса, м/с;

Далее, интегрируя уравнение (2.19) по  $z$  в пределах от нуля до  $h_{cp}$ , а также удовлетворяя (2.20) и интегрируя по  $x$ , получим  $\int_0^{h_{cp}} v_{cp\ y} dz = F_{gy}(t)$ .

Подставляя в полученное выражение  $v_{cp\ y}$  из (2.21), найдем  $A_{cp}$

$$A_{cp} = -6v_{cp} \left( \frac{1}{h_{cp}^2} - \frac{h_{cp0}\Omega}{h_{cp}^3} \right),$$

где  $\Omega$  – подлежащая определению функция  $t$ .

Подставляя значение  $A_{cp}$  в (2.21), найдем  $v_{cp\ y}$

$$v_{cp\ y} = -v_{cp} \left[ 1 - \frac{z}{h_{cp}} + 3 \left( 1 - \frac{h_{cp0}\Omega}{h_{cp}} \right) \left( \frac{z^2}{h_{cp}^2} - \frac{z}{h_{cp}} \right) \right].$$

Из уравнения (2.19) с помощью найденных  $A_{cp}$  и  $v_{cp\ y}$ , перейдя к переменным  $\Xi = \frac{v_{cp}}{h_{cp0}^2} t$ ;  $h_{cp} = h_{cp0} \left( 1 + k \frac{2y}{a} \right)$  найдем уравнение, описывающее распределение давления в промежуточном слое

$$\frac{\partial p}{\partial h_{cp}} + \frac{3\mu_{cp} a v_{cp}}{k h_{cp0}} \left( \frac{1}{h_{cp}^2} - \frac{h_{cp0}\Omega}{h_{cp}^3} \right) - \frac{\mu_{cp} a}{4k h_{cp0}^3} \frac{1}{h_{cp}} \frac{\partial(v_{cp}\Omega)}{\partial \Xi} = 0.$$

Интегрируя по  $h_{cp}$  и удовлетворяя граничным условиям, получим

$$p - p_0 = \frac{\mu_{cp} a}{2k h_{cp0}^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{h_{cp}}{h_{cp0}} \frac{\partial(v_{cp}\Omega)}{\partial \Xi} + 3 \left( 1 - \frac{h_{cp0}^2}{h_{cp}^2} \right) v_{cp}\Omega - 6 \left( 1 - \frac{h_{cp0}}{h_{cp}} \right) v_{cp} \right];$$

$$\frac{\partial(v_{cp}\Omega)}{\partial \Xi} + b_1(v_{cp}\Omega) - b_2 v_{cp} = 0;$$

$$b_1 = \frac{6 \left( 2h_{cp} + k^2 \right)}{(1+k)^2 \ln(1+k)}; \quad b_2 = \frac{12k}{(1+k) \ln(1+k)}. \quad (2.22)$$

Интегрируя систему уравнений (2.22) с учетом начальных условий при  $t = 0$ ,  $v_{cp} = v_{cp0}$ , найдем выражение для закона распределения давления в промежуточном слое как

$$p - p_0 = \frac{3\mu_{cp} a v_{cp}}{k h_{cp0}^2} \left[ \frac{1}{2} \frac{b_2}{b_1} \left( 1 - \frac{h_{cp0}^2}{h_{cp}} \right) - 1 + \frac{h_{cp0}}{h_{cp}} \right] +$$

$$+ \frac{\mu_{cp} a \tilde{v}_{cp}}{4k h_{cp0}^2} \left[ b_2 \ln \frac{h_{cp}}{h_{cp0}} - 6 \frac{b_2}{b_1} \left( 1 - \frac{h_{cp0}}{h_{cp}^2} \right) \right];$$

$$\tilde{v}_{cp} = e^{-b_1 \Xi} \int_0^{\Xi} \frac{\partial v_{cp}}{\partial \Xi} e^{b_1 \Xi} d\Xi.$$

Полная сила давления, действующая на единицу ширины тормоза (удельное давление), равна

$$P_y = \int_0^a (p - p_0) dy = \frac{a}{2k h_{cp0}} \int_{h_{cp0}}^{(1+k)h_{cp0}} (p - p_0) dh_{cp}.$$

Заменяя  $b_1$  и  $b_2$ , а затем вычисляя интеграл, получим выражение для определения силы удельного давления

$$P_y = \frac{3\mu_{cp} a^2}{2k^2 h_{cp0}^2} \left\{ v_{cp} \left[ \ln(1+k) - \frac{2k}{2+k} \right] - \tilde{v}_{cp} \left[ \frac{k^2}{(1+k) \ln(1+k)} \right] - \frac{2k}{2+k} \right\}.$$

Удельная сила трения, действующая на единицу ширины тормоза, будет равна

$$F_{gy} = \frac{a}{2k h_{cp0}} \int_{h_{cp0}}^{(1+k)h_{cp0}} \left[ \mu_{cp} \left( \frac{u_{cp}}{h_{cp}} - 3 \frac{b_2}{b_1} \frac{h_{cp0}}{h_{cp}^2} \right) v_{cp} + 3 \frac{b_2}{b_1} \frac{h_{cp0}}{h_{cp}^2} \tilde{v}_{cp} \right] dh_{cp}.$$

Вычисляя интеграл и заменяя  $b_1$  и  $b_2$ , получим окончательную формулу для удельной силы трения

$$F_{gy} = \frac{\mu_{cp} v_{cp}}{h_{cp0}} \left( \frac{u_{cp}}{k} \ln(1+k) - \frac{6}{2+k} \right) + \frac{3\mu_{cp} a}{(2+k)h_{cp0}\tilde{v}_{cp}}.$$

Коэффициент трения скольжения промежуточной среды  $f_{cp} = \frac{F_{gy}}{P_y} \approx \frac{2h_{cp0}}{a}$  в первом приближении равен от 0,0001 до 0,001, что намного

меньше коэффициента трения фрикционной пары сталь – сталь, поэтому при расчетах взаимодействия тормоза и поверхности дорожки катания рельса нужно учитывать разгрузку от гидродинамической составляющей промежуточной среды. Необходимо отметить, что несущая способность промежуточного слоя не зависит от силы прижатия тормоза к рельсу.

С учетом изложенного, коэффициент трения скольжения между рельсом и тормозом, зависящий от несущей способности слоя промежуточной среды, будет определяться как

$$f_{mg} = f_0 \left( 1 - \frac{P}{F_{пг\ ij}} \right), \quad (2.23)$$

где  $P$  – полная сила давления промежуточной среды, действующая на тормозную колодку в зависимости от ее скорости, Н;

$F_{пг\ ij}$  – сила прижатия колодки гравитационного тормоза к рельсу силой веса соответствующей части локомотива, Н.

Полученные результаты могут быть так же распространены и на магниторельсовый тормоз, в этом случае в знаменатель подставляют силу магнитного притяжения тормоза к рельсу  $F_{пм\ ijm}$  [59]. В целом они хорошо согласуются с (2.7) и (2.9) на малых скоростях движения.

Зависимость рассчитанного по формуле (2.23) коэффициента трения скольжения гравитационного рельсового тормоза от скорости движения при различном состоянии поверхности дорожки катания рельса приведена на рис. 2.21 (штриховые линии).

Кривая 1 соответствует варианту с подсыпкой песка на грязные влажные рельсы, а в качестве фрикционного материала тормозной колодки гравитационного тормоза принята стальная пластина. Зависимость 2 получена для случая применения колодки из композитного материала на грязных влажных рельсах без подсыпки песка. Кривая 3 описывает изменение значения коэффициента трения скольжения тормоза со стальной колодкой на сухих чистых рельсах, а зависимость 4 – для стальной колодки на грязных влажных рельсах без подсыпки песка.

Влияние скорости движения локомотива  $v$  над промежуточной средой на величину действующего значения коэффициента трения скольжения  $f_{mg}$  тормозных колодок магниторельсового и гравитационного тормозов можно опи-

сать зависимостью  $f_{mg} = f_0 k_{vf}$ , где коэффициент  $k_{vf}$  представляют в виде аппроксимирующей функции, полученной в программном комплексе Wolfram Mathematica 7. Ее листинг приведен ниже.

$$1.00000 - 0.102300 v + 0.0714361 v^2 - 0.0697708 v^3 + 0.0267986 v^4 - 0.00442917 v^5 + 0.000265278 v^6$$

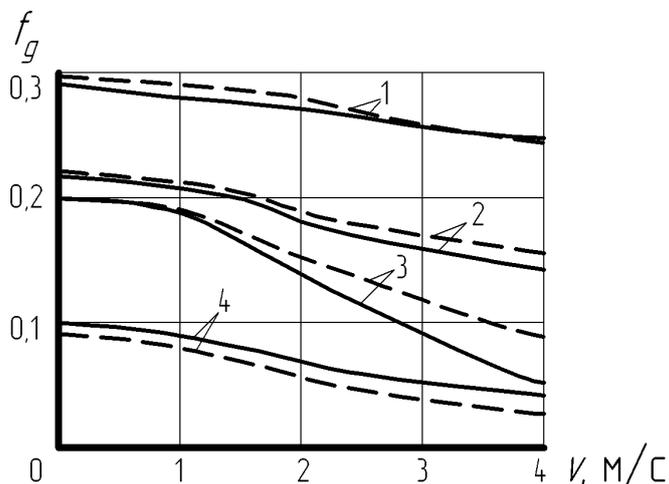


Рис. 2.21. Зависимость коэффициента трения скольжения от скорости движения в режиме торможения гравитационным рельсовым тормозом

Чем ниже скорость, тем лучше тормозная колодка рельсового тормоза зачищает перед собой дорожку катания рельса. И чем выше скорость, тем больше она всплывает (глиссирует) над рельсом, что соответствует [31, 39].

Для экспериментального определения коэффициента трения скольжения фрикционных вставок гравитационного тормоза, на шахте «Терновская» ДТЭК «Павлоградуголь» проведены испытания электровоза Э10. Задачей экспериментальных исследований стало определение зависимости коэффициента трения скольжения фрикционных вставок гравитационного рельсового тормоза от скорости движения локомотива при различной степени загрязненности рельсовых путей и использовании подсыпки песка на рельсы. Коэффициент трения определяли как отношение суммы тормозных сил всех гравитационных тормозов локомотива  $\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{пг\ ij}$ , реализуемой при скорости движения  $v$ , к суммар-

ной нормальной реакции рельсов  $\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 N_{g\ ij}$  (шарнирно-сочлененный электро-

воз имеет две тяговые секции по два башмака гравитационного тормоза в каждой), умноженной на косинус угла наклона пути к горизонтали.

Эксперименты проводили на прямолинейном участке рельсового пути со средним уклоном 30 ‰, состояние загрязненности которого моделировалось предварительным нанесением на поверхности дорожек катания рельсов наибо-

лее характерных для шахтных условий загрязнений (угольной пыли и жидкой грязи из водоотводной канавки) или их очисткой технической водой с небольшим количеством моющих средств. В отдельных опытах на грязных рельсах использовалась подсыпка песка, подававшегося на рельсы из барабанных песочниц, которыми оборудован электровоз. На указанном участке уложены рельсы типа Р34. Каждый опыт при неизменных условиях повторяли не менее 15 раз. В движение электровоз приводился собственными тяговыми двигателями, а постоянная скорость его движения в каждом опыте регулировалась дисковыми тормозами, которыми оснащен локомотив.

Специально для экспериментов был изготовлен комплект высоких башмаков 1 гравитационного тормоза (на рис. 2.22 узел крепления башмака показан в разрезе), которые устанавливались на закрепленные в раме 2 локомотива оси 3 через роликовые радиально-упорные подшипники 4.

После опускания башмаков на рельсы, рама локомотива получала возможность перекачиваться на подшипниках по горизонтальным продольным пазам длиной 10 мм внутри башмаков, что дало возможность с высокой степенью точности измерять силы торможения, возникающие при трении фрикционных вставок башмаков гравитационного тормоза о поверхность дорожек катания рельсов. Силы торможения измерялись одновременно на каждом из четырех рельсовых тормозов электровоза с помощью пары динамометрических шайб 5, установленных между башмаками и упорами рамы и включенных по мостовой схеме. Скорость локомотива и пройденный путь определялись путевым датчиком 6, размещенным на кронштейне и вращающимся от колеса 7 локомотива.

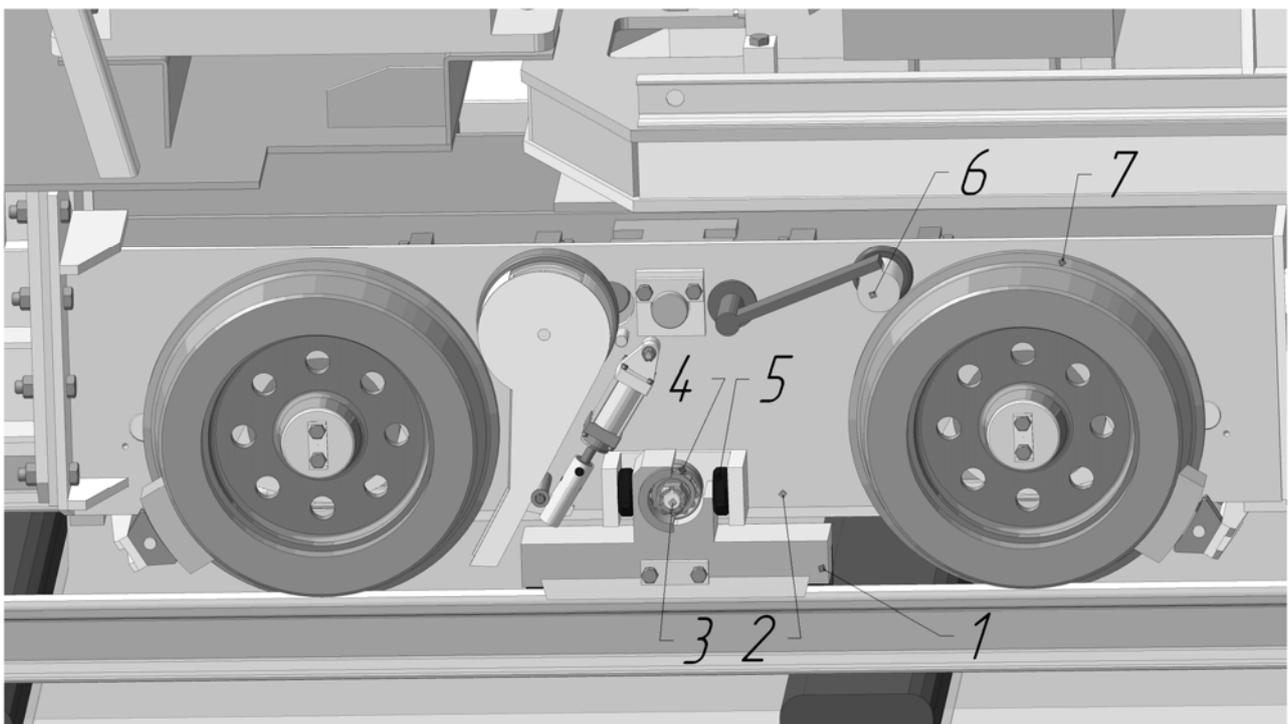


Рис. 2.22. Схема эксперимента по определению тормозной силы гравитационного рельсового тормоза

Все указанные параметры регистрировались осциллографом, а время движения обозначалось на осциллограмме отметчиком времени. На осциллограмме (рис. 2.23) кривая 1 соответствует сигналу путевого датчика, 2 и 3 – динамометрических шайб левого и правого гравитационных тормозов первой по ходу движения тяговой секции локомотива.

На кривых 4 и 5 зарегистрированы сигналы от динамометрических шайб, пропорциональные силам торможения левого и правого гравитационных тормозов второй тяговой секции. Сигнал 6 поступал от специально изготовленного индукционного датчика, который измерял продольный уклон под первой тяговой секцией локомотива. Сигналы от всех датчиков оцифровывались при помощи платы аналогово-цифрового преобразователя и записывались на жесткий диск мобильного промышленного компьютера в реальном масштабе времени. Затем данные обрабатывались (фильтровались, сглаживались, усреднялись) в интегрированной среде разработки виртуальных инструментов LabVIEW от компании National Instruments и по ним строились осциллограммы.

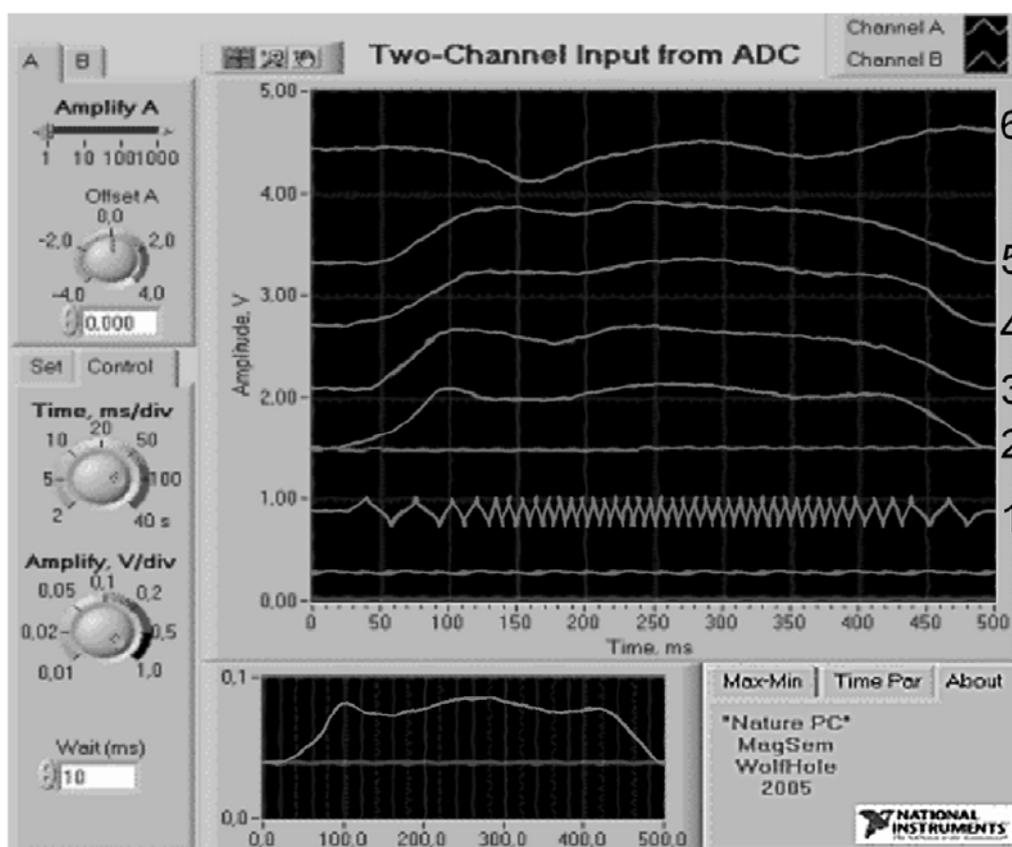


Рис. 2.23. Осциллограмма параметров движения гравитационных тормозов локомотива по реальному рельсовому пути

Коэффициент трения вычислили для девяти значений скорости движения в диапазоне от нуля до 4 м/с (через каждые 0,5 м/с). Графики зависимостей среднеарифметических значений экспериментально полученных коэффициентов трения скольжения от скорости движения представлены сплошными линиями на рис. 2.21 (аппроксимация кривых производилась методом наимень-

ших квадратов в программе Wolfram Mathematica 7). Кривая 1 соответствует опыту с подсыпкой песка на грязных влажных рельсах, а в качестве фрикционной вставки гравитационного тормоза использована пластина из стали марки 10. Зависимость 2 получена для вставки из композитного материала типа ДАФМИ на грязных влажных рельсах без подсыпки песка. Кривая 3 описывает изменение коэффициента трения скольжения тормоза со стальной вставкой на сухих чистых рельсах, а зависимость 4 – для стальной вставки на грязных влажных рельсах без подсыпки песка.

Максимальная относительная погрешность измерений равна 9 % (для скорости движения 0,5 м/с на сухих рельсах). При этом доверительный интервал коэффициента трения скольжения составил 0,022 с доверительной вероятностью, равной 0,95.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что коэффициент трения покоя тормоза о рельс выше коэффициента трения скольжения, который с увеличением скорости движения уменьшается. Причем реальное его значение выше примерно на 10 % значений, полученных по формуле 2.23. Это связано с явлением зачистки поверхности трения рельса тормозной колодкой в движении, которое можно учесть коэффициентом зачистки рельса  $k_{mg}$ . На сухих чистых рельсах коэффициент трения стальной фрикционной вставки выше примерно в два раза, чем на грязных влажных. Коэффициент трения скольжения вставки из композитных материалов на 5 % (а с увеличением скорости движения локомотива, – до 20 %) больше в сравнении с коэффициентом трения, реализуемым стальной колодкой на сухих рельсах. При торможении на сухих чистых рельсах (в диапазоне скоростей движения от 1,5 до 5 м/с) коэффициент трения скольжения уменьшается на величину от 30 до 45 %. Последнее можно объяснять тем, что на сухих чистых рельсах трущиеся на большой скорости стальные поверхности взаимозачищаются и заполировываются. Существенное увеличение коэффициента трения покоя до значений от 0,25 до 0,28 для фрикционной пары стальной тормоз – рельс возможно с применением подсыпки песка на рельс перед движущимся тормозом.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, наиболее эффективным для шахтных локомотивов следует считать использование стальных фрикционных колодок в башмаках рельсового гравитационного тормоза одновременно с применением подсыпки песка на поверхность дорожек катания рельсов песочницами барабанного типа. Это позволит, гарантировано иметь в шахтных условиях коэффициент трения покоя тормоза о грязную и влажную поверхность дорожки катания рельса, равный не менее 0,25. Возможно также применение композитных колодок из материала ТИИР 300.

## РАЗДЕЛ 3

### ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ПУТИ НА РЕАЛИЗАЦИЮ ТОРМОЗНОЙ СИЛЫ РЕЛЬСОВЫМИ ТОРМОЗАМИ

#### 3.1. Влияние ступеньки рельсового стыка пути на эффективность торможения секционным магниторельсовым тормозом

Надежная работа магниторельсовых тормозов зависит от параметров взаимодействия их полюсных наконечников с рельсами [15]. Снижение тормозной силы при движении рельсового тормоза по реальному шахтному рельсовому пути с геометрическими несовершенствами в плане и профиле вызвано, в частности, увеличением воздушных зазоров между дорожками катания рельсов и поверхностями трения наконечников тормозом при наезде на ступеньки рельсовых стыков [78]. Эквивалентный воздушный зазор, который образуется в этом случае между поверхностью трения длинного магниторельсового тормоза и дорожкой катания рельса становится значительно больше обычного (при движении в тех же условиях по прямому ровному рельсу), что ухудшает проводимость магнитной системы тормоз – рельс, а значит, уменьшает силу магнитного притяжения тормоза к рельсу и, следовательно, – силу трения скольжения. Использование секционного рельсового тормоза позволяет при той же длине тормоза уменьшить воздушные зазоры, возникающие между наконечником тормоза и рельсом при его взаимодействии с неровностями пути, такими как ступеньки и проседания рельсовых стыков, а также локальные прогибы рельсов. Эта проблема требует дополнительного изучения.

Известно, что развиваемая рельсовым тормозом сила торможения зависит, прежде всего, от сил магнитного притяжения, которые при прочих равных параметрах магнитной системы определяются воздушным зазором между рельсом и наконечниками тормоза, а для хорошо приработанных наконечников и рельсов на идеально ровном и достаточно чистом пути он равен примерно 0,1 мм [55]. При проезде ступеньки или локального прогиба, когда тормоз съезжает с рельса или всползет на новый участок рельса, изменяется эквивалентный зазор и, соответственно, сила примагничивания.

Экспериментальные наблюдения показывают, что магниторельсовый тормоз (рис. 3.1, *a*), съезжающий с одного участка рельсовой нити на другой, продолжает двигаться по первому участку рельса (рис. 3.1, *б*) до тех пор, пока соотношение части *a* его длины, скользящей по первому участку рельса к части *b* его длины, нависающей над новым участком рельса, не будет удовлетворять условию  $0,25 \leq \frac{a}{b} \leq 0,35$ . Затем нависающая часть рельсового тормоза опускается ребром на новый участок рельса (рис. 3.1, *в*) и движется, опираясь поверхностью трения на ребро торца предыдущего участка рельса, пока полностью не опустится на новый рельс.

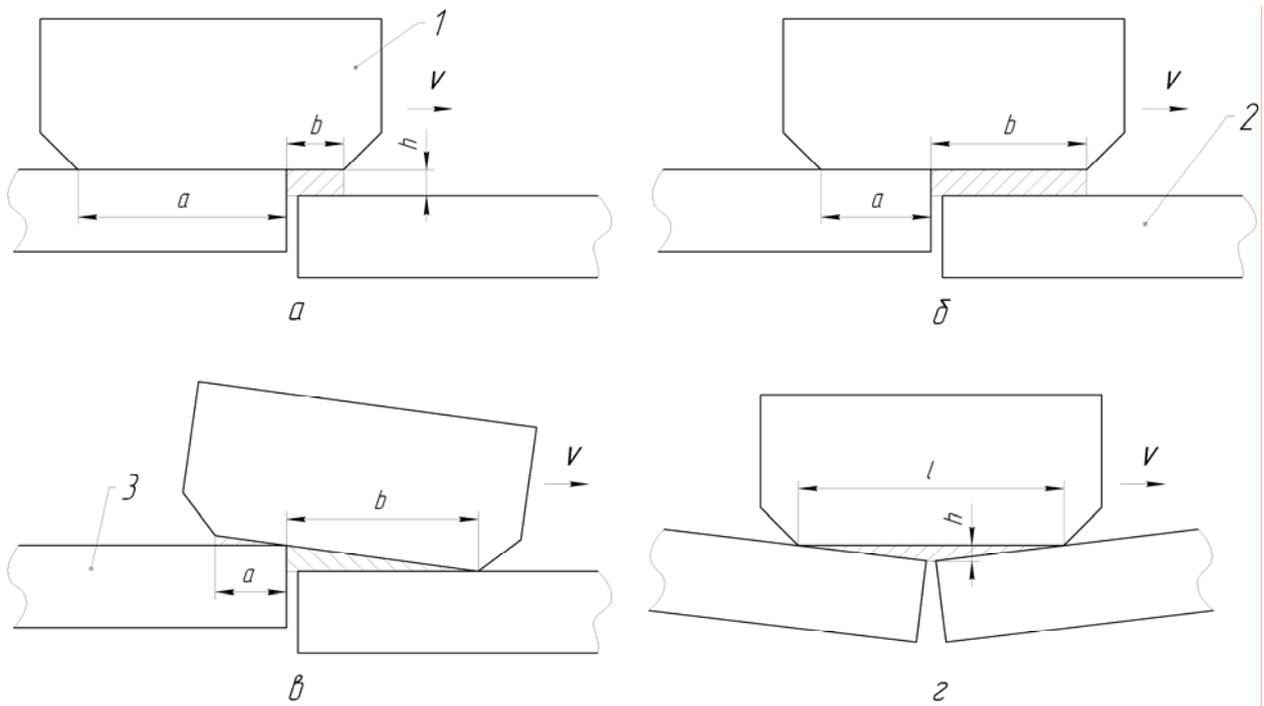


Рис. 3.1. Движение магниторельсового тормоза по ступеньке рельсового стыка

Изменение величины эквивалентного зазора  $\Delta_{c\ ijm}$  между поверхностью трения секции магниторельсового тормоза, продвигающейся над ступенькой рельсового стыка, и дорожкой катания рельсовой нити можно записать в виде выражения

$$\Delta_{c\ ijm} = \Delta_0 + \frac{1}{2} \int_0^{l_m} h(x) dx, \quad (3.1)$$

где  $h$  – высота ступеньки рельсового стыка под секцией магниторельсового тормоза (увеличенного рабочего зазора), м.

В случае если локальным несовершенством пути (рис. 3.1, г) есть статический или динамический прогиб (возникающий либо на стыке двух участков рельсовой нити, либо на сплошном рельсе вследствие увеличенного интервала между шпалами), то зависимость изменения величины эквивалентного зазора от высоты ступеньки остается такой же.

На шахте «Терновская» ДТЭК «Павлоградуголь» проведены экспериментальные исследования величины тормозной силы магниторельсовых тормозов при проезде ими ступенек рельсовых стыков и прогибов рельсовой нити (рис. 3.2). Для эксперимента в раме 1 секционного магниторельсового тормоза шахтного шарнирно-сочлененного электровоза Э10 размещены тормозные секции 2, при чем каждая секция имеет возможность перемещаться в вертикальных пазах рамы, а также поворачиваться вокруг горизонтальной поперечной и продольной осей. Указанная рама 1 через динамометрическую тягу 3, наклоненную под углом  $\beta$  к горизонтали, прикреплена к раме 4 тяговой секции

локомотива. Этот угол измеряется реостатным датчиком 5. Скорость движения локомотива определяется путевым датчиком 6, обремененный ролик которого приводится во вращение от реборды колеса. При проезде ступеньки рельсового стыка 7 каждая секция тормоза по очереди всползает или опускается на новый участок рельса, при этом эквивалентный воздушный зазор между поверхностью трения наконечника тормоза и дорожкой катания рельса становится переменным (сначала увеличивается до максимального для конкретной ступеньки, затем уменьшается до нормального для текущих условий пути). Вдоль пути на опоре 8 установлена площадка, по которой прокатывается путевой датчик 9, служащий для измерения скорости движения локомотива в момент проезда им ступеньки рельсового стыка. В движение электровоз приводился собственными тяговыми двигателями, скорость контролировалась скоростемером.

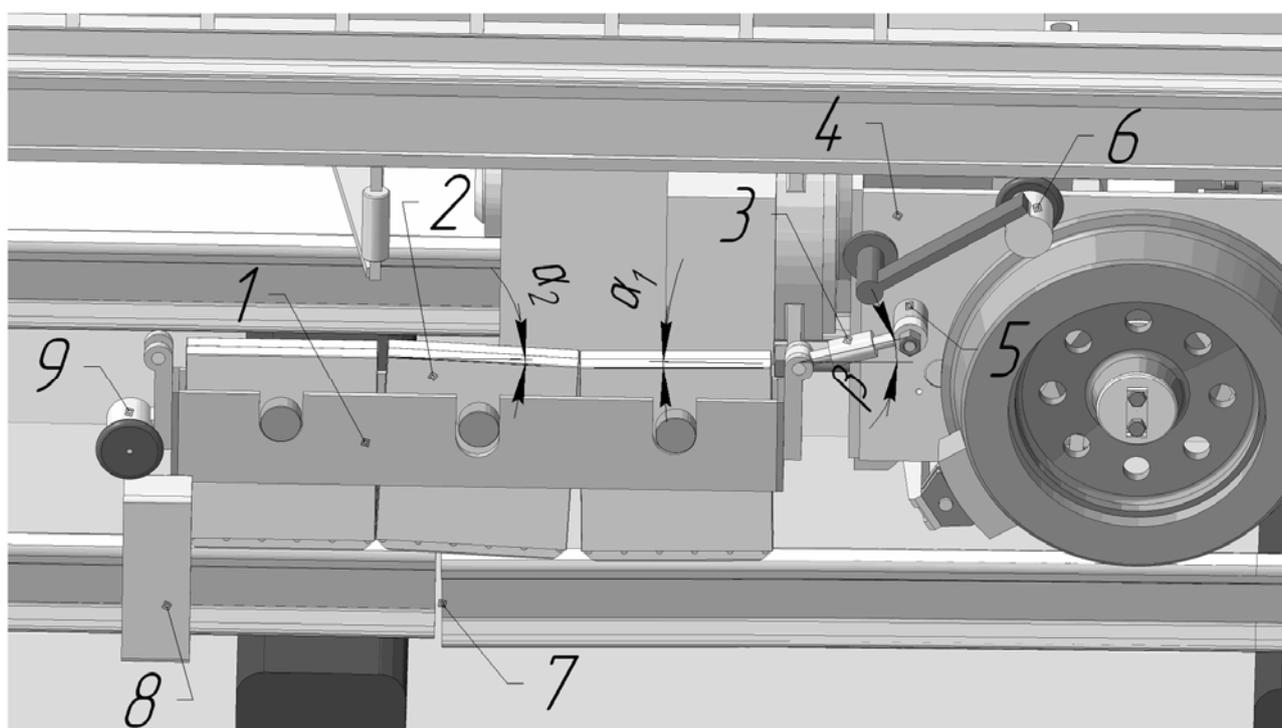


Рис. 3.2. Схема эксперимента по определению тормозной силы магниторельсового тормоза на ступеньке рельсового стыка

Эксперименты проводились на семи участках рельсового пути, с различной величиной ступеньки рельсового стыка (от 3 до 14 мм) и прогиба рельсовой нити. Исследовались магниторельсовые тормоза на постоянных магнитах одного типа (сплав неодим-железо-бор) однокорпусные длиной 0,25 м, 0,5 м и 1 м, а также составные трехсекционные тормоза с длиной секции 0,15 м, 0,25 м и 0,4 м с зазором между смежными секциями от 10 до 15 мм.

Сигналы от всех датчиков оцифровывались при помощи платы аналогово-цифрового преобразователя и записывались на жесткий диск мобильного промышленного компьютера в реальном масштабе времени. Затем данные обрабатывались (фильтровались, сглаживались, усреднялись) в интегрированной среде LabVIEW от компании National Instruments и по ним строились осцилло-

граммы. Кривая 1 (рис. 3.3) соответствует сигналу путевого датчика 6 (см. рис. 3.3), по которому определяется скорость движения локомотива. Кривая 2 – сигнал путевого датчика, обозначающего на пути место расположения ступеньки рельсового стыка, а 3 – показания датчика угла наклона динамометрической тяги, которые пересчитывались в косинус  $\beta$  и участвовали в расчетах в качестве коэффициента для определения действующего значения тормозной силы секционного магниторельсового тормоза  $\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 F_{m\ ijm}$ .

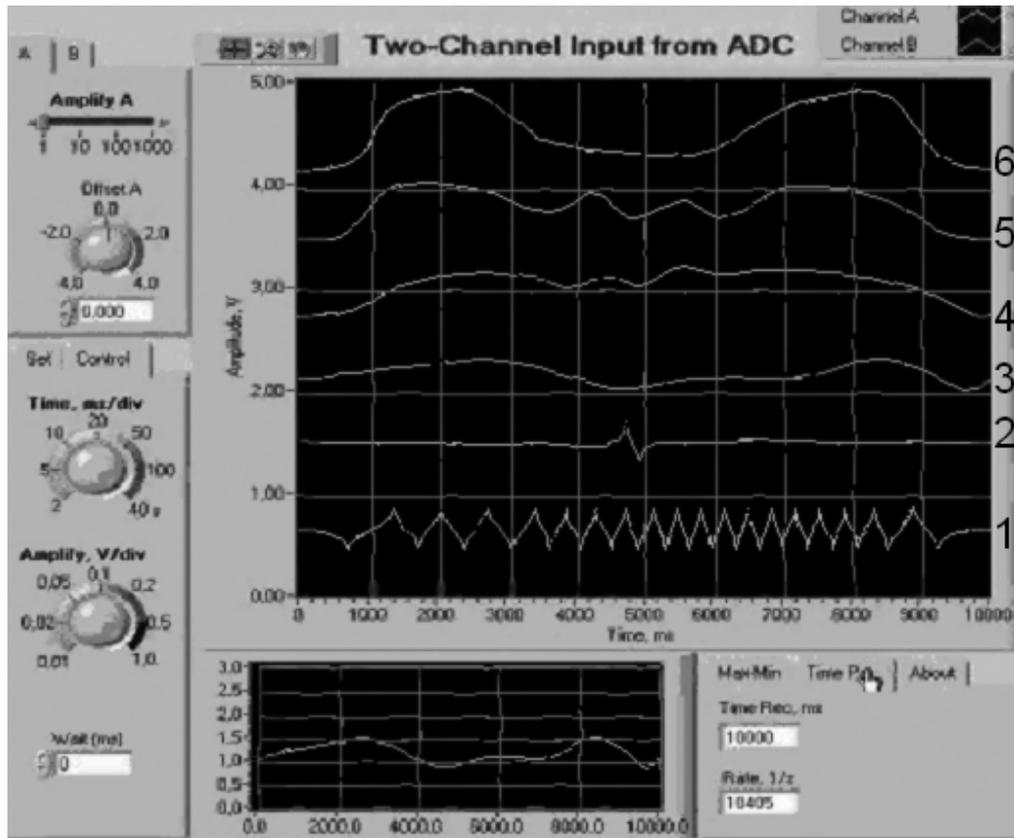


Рис. 3.3. Осциллограмма проезда ступеньки рельсового стыка магниторельсовым тормозом

Поскольку LabVIEW позволяет сохранять в памяти компьютера осциллограммы процессов, записанных в разное время, а затем одновременно выводить их на экран виртуального осциллографа, то на осциллограмме (см. рис. 3.3) приведены кривые тормозной силы, реализованной при проезде одной и той же ступеньки тремя магниторельсовыми тормозами различного вида и длины. Кривая 4 – сигнал динамометрической тяги при движении локомотива с секционным магниторельсовым тормозом, каждая секция которого равна 0,25 м. Кривая 5 – для тормоза той же конструкции, но с длиной секции, равной 0,4 м. Сигнал 6 соответствует однокорпусному тормозу длиной 1 м. Углы наклона первой  $\alpha_1$  и второй  $\alpha_2$  по ходу движения секций составного тормоза по отношению к дорожке катания левого на рис. 3.2 рельса (лежащего на шпале) определялись визуально по результатам ана-

лиза видео и фото съемки процесса деформирования рельсов под нагрузкой от силы веса электровоза в движении.

Для количественной оценки эффективности рельсового тормоза на постоянных магнитах зависимость  $\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 F_{m\ ijm} = F_m(v)$  представим в виде

$$\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 F_{m\ ijm} = F_0 \exp(-\phi v).$$

Используя метод наименьших квадратов, получим

$$\phi = \left( \frac{\sum_{\zeta=1}^{\varpi} v \ln F_{\zeta}}{\sum_{\zeta=1}^{\varpi} v^2} \right)^{-1},$$

Оценку эффективности секционного рельсового тормоза производили по среднеинтегральной мощности и тормозной силе. Коэффициент корреляции теоретических и экспериментальных зависимостей равен 0,96. Это подтверждает адекватность математической модели. Ошибка вычислений не превышает 10 %, что является допустимым для подобных расчетов.

Из анализа полученных осциллограмм можно сделать вывод, что при проезде однокорпусным магниторельсовым тормозом длиной 1 м на скорости 4 м/с ступеньки рельсового стыка высотой 14 мм развиваемая им тормозная сила значительно уменьшается и составляет только от 5 до 10 % от максимально возможной на ровном прямом участке пути. У составного магниторельсового тормоза падение реализуемой им тормозной силы существенно меньше, за счет того, что в любой момент времени только одна его секция проходит над ступенькой рельсового стыка. Поэтому в тех же условиях он развивает тормозную силу, составляющую от 60 до 70 % от максимально возможной.

На рис. 3.4 приведены зависимости удельной тормозной силы  $F_{my}$  рельсового тормоза от высоты ступеньки рельсового стыка при различных скоростях движения над ней. Кривая 1 соответствует скорости 2 м/с, кривая 2 – для скорости, равной 3 м/с, зависимость 3 – для 4 м/с. Сплошная линия соответствует составным трехсекционным магниторельсовым тормозам, а штриховая – однокорпусным такой же длины. Кривая 4 есть зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза к рельсу  $k_{o\ ijm}$ .

Эффект ослабления силы магнитного притяжения при проезде рельсовым тормозом ступеньки рельсового стыка или прогиба рельса возникает в связи с увеличением эквивалентного зазора между поверхностью трения наконечника магниторельсового тормоза и дорожкой катания рельса, что ухудшает проводимость магнитной системы тормоз-рельс.

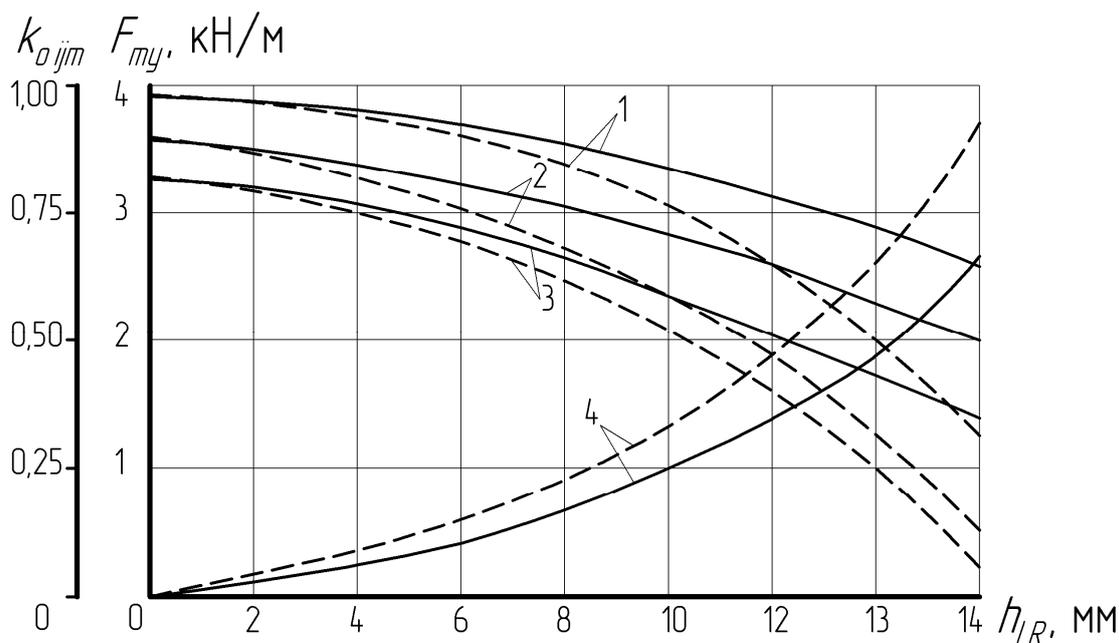


Рис. 3.4. Зависимость удельной тормозной силы от высоты ступеньки рельсового стыка при различной скорости движения локомотива

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о том, что составной магниторельсовый тормоз имеет преимущества при проезде ступеньки рельсового стыка. При прочих равных условиях относительное падение тормозной силы у трехсекционного тормоза с секцией длиной 250 мм на 50 % меньше, чем у однокорпусного рельсового тормоза длиной 750 мм.

Проезд прогиба рельсовой нити высотой от 1 до 3 мм составным магниторельсовым тормозом вообще не приводит к заметному снижению общей тормозной силы, в то время как длинный однокорпусный магниторельсовый тормоз теряет до 15 % реализуемой им тормозной силы.

### 3.2. Ослабление тормозной силы секции магниторельсового тормоза на единичных неровностях рельсовых путей

Тормозная сила магниторельсового тормоза определяется силой магнитного притяжения  $F_{\Pi ijm}$  секции тормоза к рельсу, а она, в свою очередь, зависит от площади контакта полюсных наконечников и рельсов, а также величины двух воздушных зазоров [55] в электромагнитной цепи «северный полюс магнита – магнитопровод секции тормоза – воздушный зазор – головка рельса – воздушный зазор – магнитопровод секции тормоза – южный полюс магнита».

Над короткими единичными неровностями рельсового пути, каковыми являются рельсовые стыки, между поверхностью дорожки катания рельса и полюсным наконечником секции магниторельсового тормоза возникают локальные ослабления силы магнитного притяжения. Поэтому тормозная сила шахтного локомотива постоянно колеблется почти от нуля до максимального ее значения на ровном прямом участке.

Между новыми рельсами и полюсными наконечниками тормозов нормальный зазор составляет примерно 0,22 мм, а между приработанными – 0,1 мм (0,15 мм по данным [75]). Расстояние между полюсными наконечниками секции равно 10 мм. На реально искривленных участках пути увеличиваются зазоры и уменьшаются площади контакта  $S_m$  тормозных наконечников с рельсами, поэтому соответственно уменьшаются силы магнитного притяжения, а значит и тормозные силы, считая магнитное поле в воздушном зазоре однородным. Увеличение зазора уменьшает силу притяжения обратно пропорционально квадрату зазора, а снижение  $S_m$  – уменьшает ее прямо пропорционально. При торможении локомотива на участках шахтного пути, имеющих кривизну профиля (перегибы), искривления в плане (повороты) или при проезде единичной неровности [56, 57], действующее значение тормозной силы секции магниторельсового тормоза определяют по усложненной формуле (2.13) как

$$F_{m\ ijm} = F_{0\text{пу}} l_m f_m k_{vm} k_{o\ ijm} k_{c\ ijm} k_{\phi\ ijm} k_{\partial\ ijm} k_u k_T, \quad (3.2)$$

где  $k_{c\ ijm}$  – коэффициент использования силы магнитного притяжения над единичной неровностью в виде ступеньки рельсового стыка (отношение силы притяжения тормоза над реальной единичной неровностью в виде ступеньки рельсового стыка к ее максимально возможной величине над прямым рельсом);

$k_{\phi\ ijm}$  – коэффициент использования силы магнитного притяжения над единичной неровностью в виде проседания концов рельсов на стыке (отношение силы притяжения тормоза над реальной единичной неровностью в виде проседания рельсов на стыке к ее максимально возможной величине над прямым рельсом);

$k_{\partial\ ijm}$  – коэффициент использования силы магнитного притяжения над единичной неровностью в виде локального прогиба рельсовой нити (отношение силы притяжения тормоза над реальной единичной неровностью в виде прогиба рельсовой нити к ее максимально возможной величине над прямым рельсом);

$k_u$  – коэффициент износа трущихся пар (тормозной колодки и рельса), определяет степень износа полюсных наконечников по мере эксплуатации;

Проезд ступеньки рельсового стыка секцией магниторельсового тормоза снижает силу магнитного притяжения наконечников тормоза к поверхности дорожки катания рельса [75, 78, 56], так как при этом между ними увеличивается эквивалентный зазор  $\Delta_{c\ ijm}$  по (3.1). Изменение тормозной силы над ступенькой рельсового стыка пути можно учесть с помощью коэффициента использования силы магнитного притяжения над такой единичной неровностью  $k_{c\ ijm}$ , определяемого как

$$k_{c\ ijm} = \frac{1}{k_{\Delta c}^2}, \quad (3.3)$$

где  $k_{\Delta c}$  – коэффициент увеличения эквивалентного зазора между поверхностями контакта наконечников и рельсов над ступенькой рельсового стыка. Определяют как отношение эквивалентного зазора между поверхностью трения плюсового наконечника секции тормоза и поверхностью дорожки катания рельса над ступенькой рельсового стыка при ее конкретной величине  $h_{LR}$  к такому же зазору над прямым (не искривленным) рельсом. Такой коэффициент над конкретным стыком находят методом вычислительного эксперимента [55], как это видно на рис. 3.5, в программе трехмерного моделирования КОМПАС. Над ступенькой стыка рельсов 1 размещают модель наконечников секции магниторельсового тормоза 2, а затем строят модель воздушных зазоров 3 между ними и поверхностями дорожек катания рельсов.

Определив с помощью программы объем зазора и площадь его контакта с наконечником, находят эквивалентный зазор между трущимися поверхностями тормоза и  $k_{\Delta c}$ . На рис. 3.6 приведена зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения над ступенькой рельсового стыка  $k_{c\ ijm}$  от величины этой ступеньки  $h_{LR}$ .

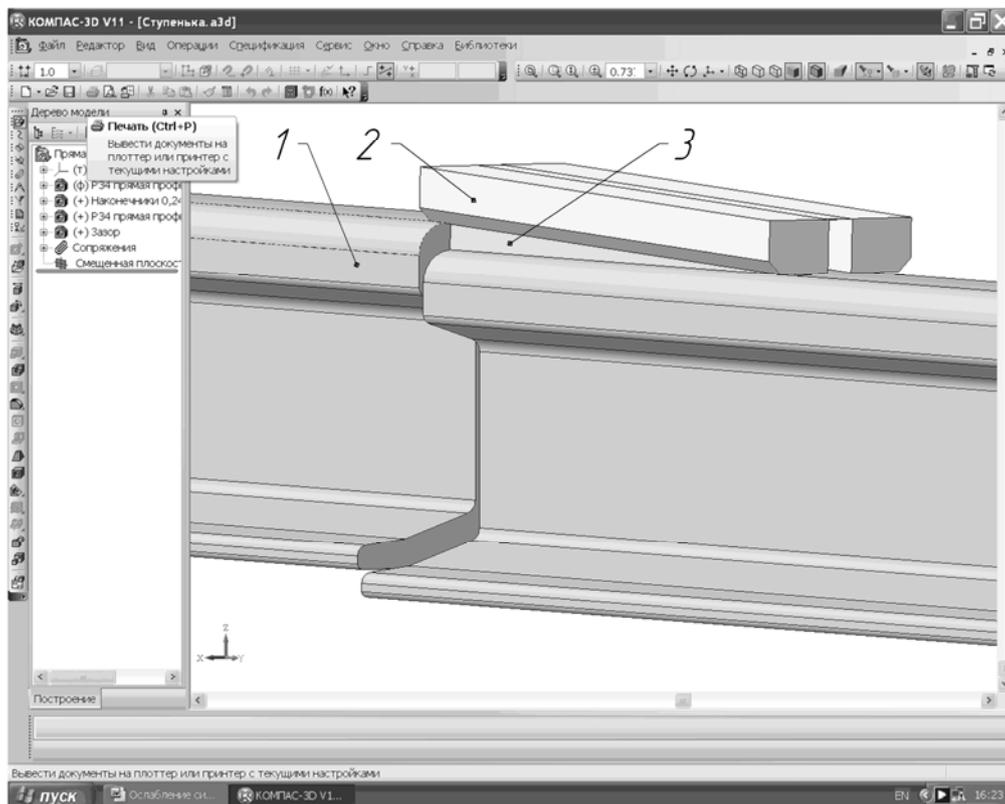


Рис. 3.5. Расчетная схема к определению эквивалентного зазора над ступенькой рельсового стыка

Как показали исследования, этот коэффициент не зависит от длины наконечника секции магниторельсового тормоза. Полученную табличную зависимость  $k_{c\ ijm} = f(h_{LR})$  аппроксимировали степенным полиномом

INTERPOLATINGPOLYNOMIAL в программе Wolfram Mathematica 7, который приведен ниже.

$$1.000000 - 2.22990 h_{LR} + 2.33233 h_{LR}^2 - 1.40237 h_{LR}^3 + 0.527412 h_{LR}^4 - 0.129398 h_{LR}^5 + 0.0210366 h_{LR}^6 - 0.00224711 h_{LR}^7 + 0.000151577 h_{LR}^8 - 5.85284 \times 10^{-6} h_{LR}^9 + 9.85745 \times 10^{-8} h_{LR}^{10}$$

При проезде секцией магниторельсового тормоза рельсового стыка с проседанием концов рельсов тормозная сила также снижается, поскольку силы магнитного притяжения наконечников тормоза к поверхности дорожки катания рельса уменьшаются за счет увеличения эквивалентного зазора между ними.

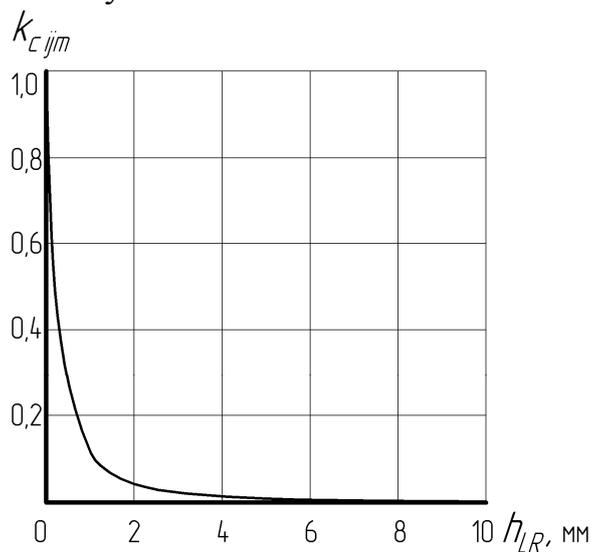


Рис. 3.6. Зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения над стыком от величины ступеньки рельсового стыка

Такое изменение сил над локальной неровностью пути можно учесть с помощью коэффициента использования силы магнитного притяжения над единичной неровностью в виде проседания концов рельсов на стыке  $k_{\phi ijm}$ , рассчитываемого по формуле

$$k_{\phi ijm} = \frac{1}{k_{\Delta\phi}^2}, \quad (3.4)$$

где  $k_{\Delta\phi}$  – коэффициент увеличения эквивалентного зазора между поверхностями контакта наконечников и рельсов над ступенькой рельсового стыка. Определяют как отношение эквивалентного зазора между поверхностью трения полюсного наконечника секции тормоза и поверхностью дорожки катания рельса над проседанием рельсов в профиле к такому же зазору над прямым (не искривленным) рельсом. Хотя концы рельсов искривляются по параболе, в первом приближении полуметровые концы рельсов можно считать изогнутыми по дуге радиусом  $R_{pc}$ . Этот радиус экспериментально находят для каждого кон-

кретного случая проседания стыков на участке шахтного рельсового пути по расчетной схеме, приведенной на рис. 3.7.

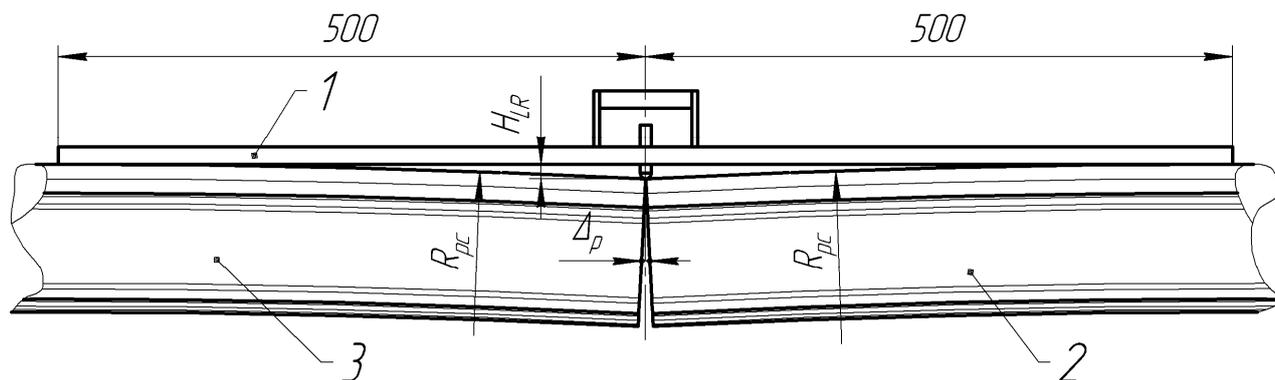


Рис. 3.7. Расчетная схема к определению радиуса изгиба концов рельсов на проседании рельсового стыка

Метровый измерительный шаблон 1 симметрично накладывают на стык рельсов 2 и 3, а затем измеряют глубину проседания стыка  $H_{LR}$  и зазор в среднем сечении между торцами соседних рельсов. Условно искривление конца рельса начинается на расстоянии 0,5 м от стыка.

Находят коэффициент  $k_{\Delta\phi}$  над конкретным стыком методом вычислительного эксперимента, как это видно на рис. 3.8, в программе трехмерного моделирования КОМПАС. Над стыком искривленных концов рельсов 1 размещают модель наконечников секции магниторельсового тормоза 2, а затем строят модели 3 и 4 воздушных зазоров между ними и поверхностями дорожек катания рельсов. Определив с помощью программы объем зазора и площадь его контакта с наконечником, находят эквивалентный зазор. Затем определяют коэффициент увеличения эквивалентного зазора  $k_{\Delta\phi}$  и коэффициент использования силы магнитного притяжения над единичной неровностью в виде проседания концов рельсов на стыке  $k_{\phi\ ijm}$ .

На рис. 3.9 показана зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения над проседанием концов рельсов на стыке  $k_{\phi\ ijm}$  от глубины проседания концов рельсов  $H_{LR}$  (см. рис. 3.9, а) и от радиуса изгиба концов рельсов в профиле  $R_{pc}$  (см. рис. 3.9, б) на исследуемом рельсовом стыке для секций магниторельсового тормоза с различной длиной контактирующих поверхностей тормозных наконечников  $l_m$ . Кривая 1 соответствует секции магниторельсового тормоза с длиной наконечника, равной 0,125 м, зависимость 2 – 0,25 м, кривая 3 для 0,5 м, кривая 4 для 0,75 м, а зависимость 5 – для наконечника длиной 1 м.

Функция  $k_{\phi\ ijm} = f(H_{LR})$  хорошо аппроксимируется степенными полиномами `InterpolatingPolynomial` в программе `Wolfram Mathematica 7`, приведенными ниже для  $l_m$  равных 0,125, 0,250, 0,500, 0,750, 1,000 м.

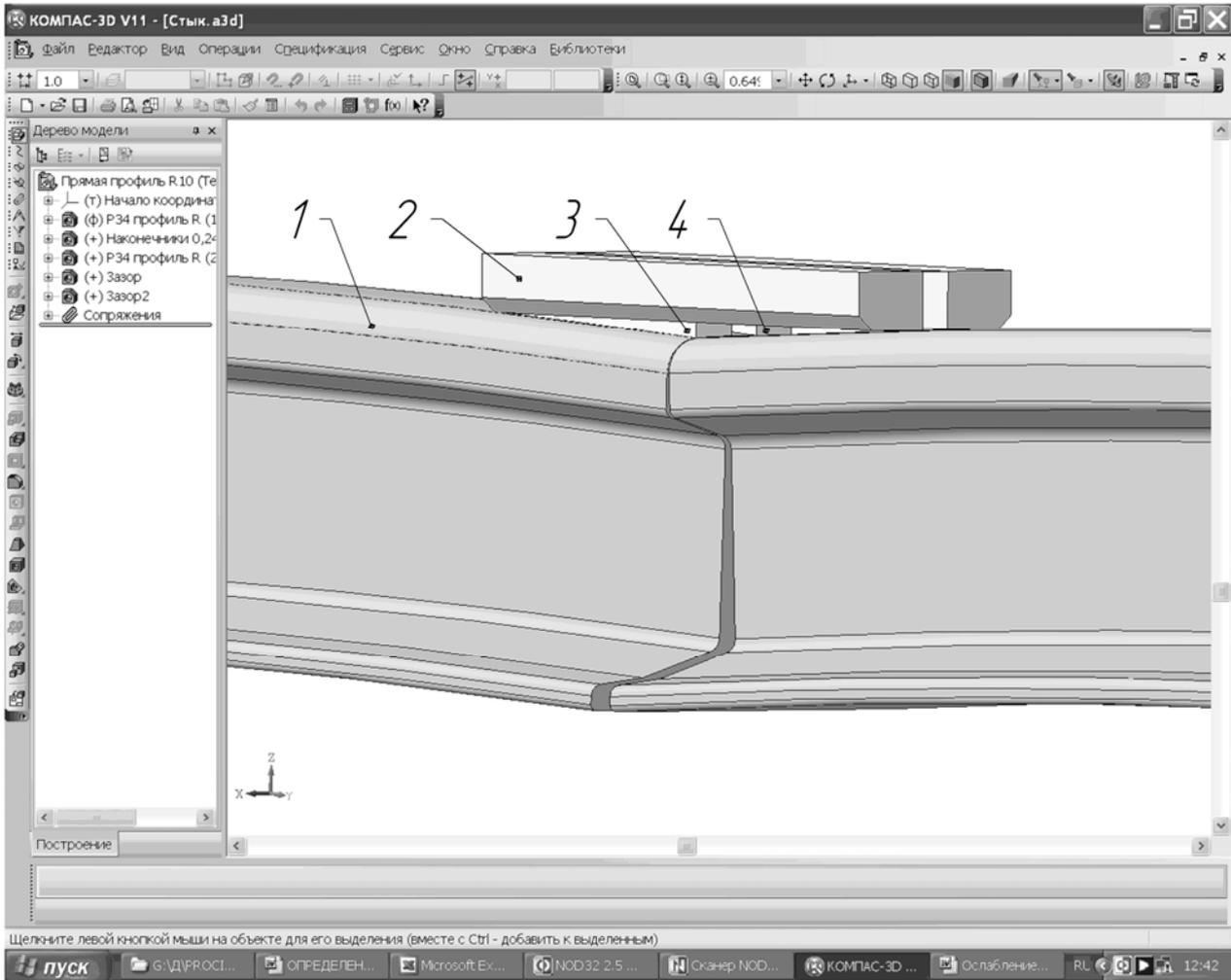


Рис. 3.8. Расчетная схема к определению эквивалентного зазора над проседанием рельсового стыка

$$1.16479 - 0.805523 H_{LR} + 0.303349 H_{LR}^2 - 0.0709160 H_{LR}^3 + 0.0105469 H_{LR}^4 - 0.000987759 H_{LR}^5 + 0.0000558717 H_{LR}^6 - 1.72772 \times 10^{-6} H_{LR}^7 + 2.22062 \times 10^{-8} H_{LR}^8$$

$$0.971410 - 0.978093 H_{LR} + 0.503635 H_{LR}^2 - 0.154443 H_{LR}^3 + 0.0294153 H_{LR}^4 - 0.00349402 H_{LR}^5 + 0.000250990 H_{LR}^6 - 9.95573 \times 10^{-6} H_{LR}^7 + 1.67155 \times 10^{-7} H_{LR}^8$$

$$0.690808 - 0.797716 H_{LR} + 0.447698 H_{LR}^2 - 0.145798 H_{LR}^3 + 0.0290970 H_{LR}^4 - 0.00359375 H_{LR}^5 + 0.000267012 H_{LR}^6 - 0.0000109081 H_{LR}^7 + 1.87921 \times 10^{-7} H_{LR}^8$$

$$-0.0965113 + 0.350990 H_{LR} - 0.265395 H_{LR}^2 + 0.0962197 H_{LR}^3 - 0.0198588 H_{LR}^4 + 0.00245545 H_{LR}^5 - 0.000180052 H_{LR}^6 + 7.21996 \times 10^{-6} H_{LR}^7 - 1.21953 \times 10^{-7} H_{LR}^8$$

$$0.489649 - 0.461817 H_{LR} + 0.221174 H_{LR}^2 - 0.0651445 H_{LR}^3 + 0.0124167 H_{LR}^4 - 0.00152541 H_{LR}^5 + 0.000115594 H_{LR}^6 - 4.87964 \times 10^{-6} H_{LR}^7 + 8.73414 \times 10^{-8} H_{LR}^8$$

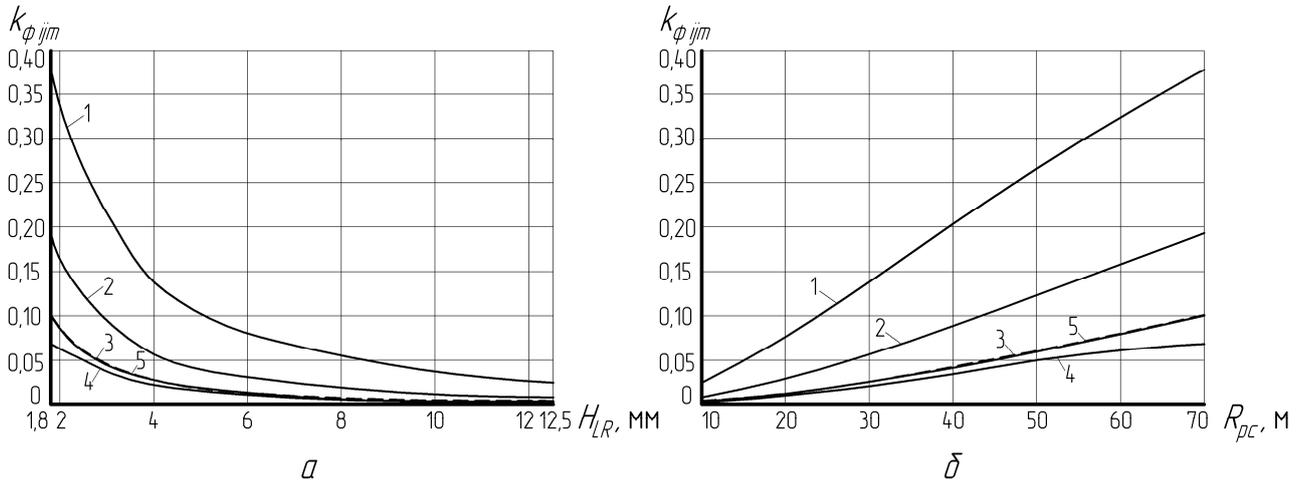


Рис. 3.9. Зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения над проседанием стыка от глубины проседания концов рельсов и от радиуса кривизны концов рельсов в плане:

$a$  – от глубины проседания концов рельсов;

$b$  – от радиуса кривизны концов рельсов в плане

Функцию  $k_{\phi ijm} = f(R_{cp})$  также можно аппроксимировать степенными полиномами, как это показано ниже для тех же условий.

$$\begin{aligned}
 & -0.0000647619 R_{cp} + 0.000339643 R_{cp}^2 - 9.83929 \times 10^{-6} R_{cp}^3 + \\
 & 1.67262 \times 10^{-7} R_{cp}^4 - 1.55952 \times 10^{-9} R_{cp}^5 + 5.95238 \times 10^{-12} R_{cp}^6 \\
 & -0.000415238 R_{cp} + 0.000171496 R_{cp}^2 - 6.47321 \times 10^{-6} R_{cp}^3 + \\
 & 1.69544 \times 10^{-7} R_{cp}^4 - 2.31548 \times 10^{-9} R_{cp}^5 + 1.21032 \times 10^{-11} R_{cp}^6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -1.38778 \times 10^{-17} - 0.000114524 R_{cp} + 0.0000800635 R_{cp}^2 - \\
 & 3.94940 \times 10^{-6} R_{cp}^3 + 1.26885 \times 10^{-7} R_{cp}^4 - 1.91071 \times 10^{-9} R_{cp}^5 + 1.05159 \times 10^{-11} R_{cp}^6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 0.000127381 R_{cp} + 0.0000148730 R_{cp}^2 + 2.94643 \times 10^{-7} R_{cp}^3 - \\
 & 5.85317 \times 10^{-9} R_{cp}^4 + 2.97619 \times 10^{-11} R_{cp}^5 - 1.98413 \times 10^{-13} R_{cp}^6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -0.000403810 R_{cp} + 0.0000992421 R_{cp}^2 - 3.59226 \times 10^{-6} R_{cp}^3 + \\
 & 7.86706 \times 10^{-8} R_{cp}^4 - 8.39286 \times 10^{-10} R_{cp}^5 + 3.37302 \times 10^{-12} R_{cp}^6
 \end{aligned}$$

Заметно, что кривые 3 и 5 практически совпадают. Это связано с тем, что при длине наконечника, большей, чем примерно 0,75 м, его концы ложатся на рельсы близко к касательной и соответственно площадь контактирующей поверхности на недеформированном участке увеличивается. Этот минимум отчетливо виден на рис. 3.10.

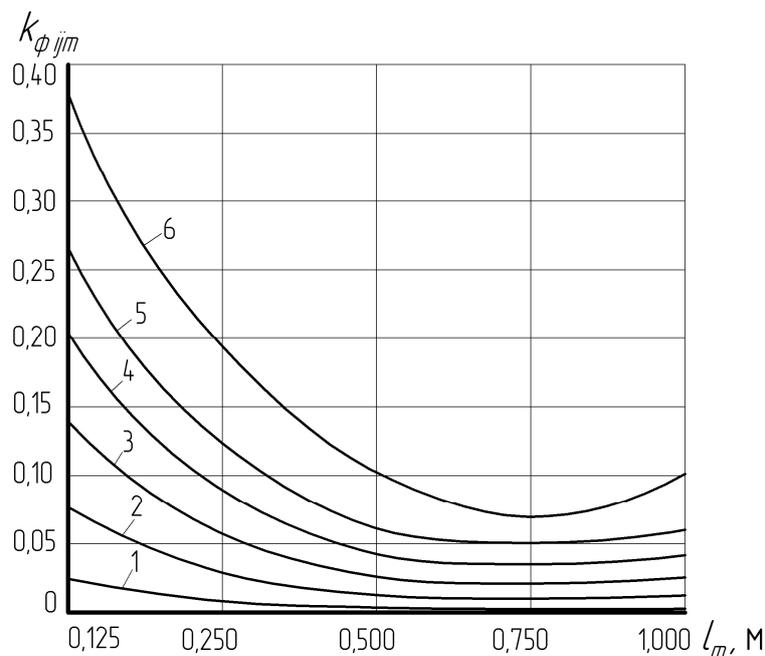


Рис. 3.10. Зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения от длины наконечников магниторельсового тормоза

Здесь представлена зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения  $k_{\phi ijm}$  над проседанием концов рельсов на стыке от длины рельсового наконечника  $l_m$  магниторельсового тормоза. Кривые от первой до шестой соответствуют радиусу изгиба концов рельсов в профиле  $R_{pc}$  величины, равной 10 , 20 , 30 , 40 , 50 , 70 м.

При наезде секции рельсового тормоза на единичное локальное несовершенство на рельсовом стыке шахтного пути, эквивалентный зазор между рельсом и тормозом практически ступенчато возрастает, так как их контактирующие поверхности частично отрываются друг от друга. Длина пути, на протяжении которого на секцию тормоза действует такая неровность, равна длине полюсного наконечника тормоза  $l_m$ , а время движения по неровности в зависимости от скорости локомотива  $v$  определяется как

$$t_c = \frac{l_m}{v} \text{ или } t_{\phi} = \frac{l_m}{v}.$$

Коэффициент использования силы магнитного притяжения над единичной неровностью в виде локального прогиба рельсовой нити  $k_{\Delta ijm}$  находят по формуле

$$k_{\Delta ijm} = \frac{1}{k_{\Delta \delta}^2}, \quad (3.5)$$

где  $k_{\Delta\partial}$  – коэффициент увеличения эквивалентного зазора между поверхностями контакта наконечников и рельсов над локальным прогибом рельсовой нити, определяют как отношение эквивалентного зазора между поверхностью трения полюсного наконечника секции тормоза и поверхностью дорожки катания рельса над локальным прогибом рельсовой нити в плане к такому же зазору над прямым (не искривленным) рельсом. Длина такого воздействия равна длине локального прогиба рельсовой нити  $l_{\partial}$ , а время в зависимости от скорости движения локомотива  $v$  определяется как  $t_{\partial} = \frac{l_{\partial}}{v}$ .

Находят коэффициент над конкретной неровностью методом вычислительного эксперимента, как и для изгиба рельса в профиле, но радиус кривизны локальных прогибов  $R_{\partial p}$  при этом значительно меньше, как это видно на рис. 3.11.

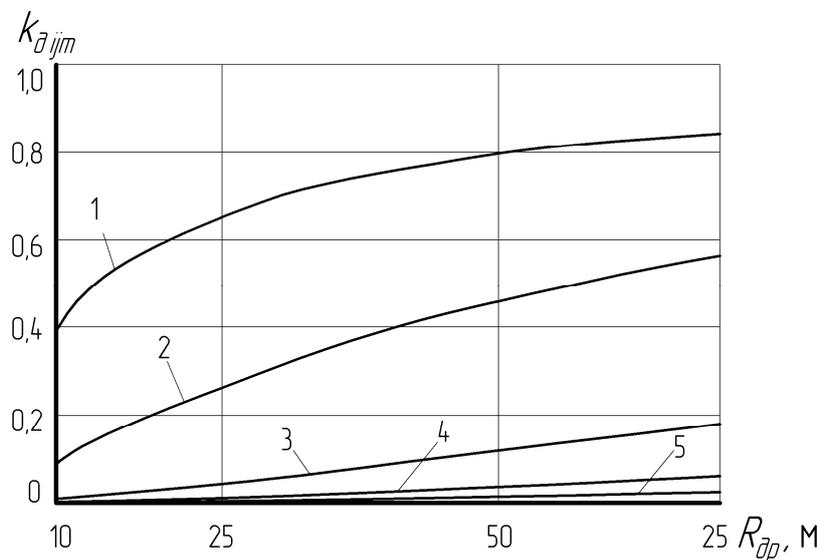


Рис. 3.11. Зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения от радиуса локального прогиба рельсовой нити

Полученные табличные зависимости  $k_{\partial ij m} = f(R_{\partial p})$  аппроксимировали степенными полиномами InterpolatingPolynomial в программе Wolfram Mathematica 7, которые приведены ниже при  $l_m$  равных 0,125, 0,250, 0,500, 0,750, 1,000 м.

$$\begin{aligned}
 &0.0530538 R_{\text{др}} - 0.00164354 R_{\text{др}}^2 + \\
 &0.0000281788 R_{\text{др}}^3 - 2.44539 \times 10^{-7} R_{\text{др}}^4 + 8.29420 \times 10^{-10} R_{\text{др}}^5 \\
 &0.00488814 R_{\text{др}} + 0.000524202 R_{\text{др}}^2 - \\
 &0.0000160439 R_{\text{др}}^3 + 1.81415 \times 10^{-7} R_{\text{др}}^4 - 7.17639 \times 10^{-10} R_{\text{др}}^5 \\
 &0.0000598852 R_{\text{др}} + 0.0000977931 R_{\text{др}}^2 - \\
 &1.45630 \times 10^{-6} R_{\text{др}}^3 + 9.84669 \times 10^{-9} R_{\text{др}}^4 - 2.48863 \times 10^{-11} R_{\text{др}}^5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -1.38778 \times 10^{-17} - 55.2774 R_{\text{др}} + 9.39718 R_{\text{др}}^2 - \\
& 0.464330 R_{\text{др}}^3 + 0.00818106 R_{\text{др}}^4 - 0.0000442219 R_{\text{др}}^5 \\
& -4.98832 \times 10^{-6} R_{\text{др}} + 7.65108 \times 10^{-6} R_{\text{др}}^2 - \\
& 6.91228 \times 10^{-8} R_{\text{др}}^3 + 7.03255 \times 10^{-10} R_{\text{др}}^4 - 3.36001 \times 10^{-12} R_{\text{др}}^5
\end{aligned}$$

Коэффициент  $k_u$  отражает образование нагортовки (наклепа) на полюсных наконечниках, видимой в поперечном сечении секции тормоза. С одной стороны увеличивается площадь контакта наконечника с рельсом, но с другой, – уменьшается зазор между полюсами, что приводит к шунтированию магнитного потока и ухудшает эффективность торможения. Кроме того, поверхности трения наконечников в продольном направлении приобретают кривизну, радиус которой зависит от длины секции тормоза, интенсивности и срока эксплуатации магниторельсовых тормозов. Этот коэффициент также определяют методом вычислительного эксперимента, моделируя форму и размеры полюсных наконечников на разных сроках их работы, используя экспериментальные данные реальной эксплуатации магниторельсовых тормозов.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что даже небольшая ступенька рельсового стыка высотой 1 мм уменьшает силу магнитного притяжения тормоза к рельсу на 88 %. А поскольку обычно ступеньки составляют от 3 до 7 мм, то тормозная сила секции магниторельсового тормоза при проезде такой неровности рельсового пути практически исчезает (не превышает 1 %) независимо от его длины.

На проседаниях рельсовых стыков сила магнитного притяжения также значительно снижается. Например, для секции тормоза длиной 0,25 м на стыке рельсов с радиусом изгиба концов в профиле, равном 30 м, она составляет только 6 % от максимально возможной на прямой, а у тормоза длиной 0,75 м она равна только 2 %.

К меньшим ослаблениям приводят локальные прогибы рельсовых нитей, но учитывать их необходимо, поскольку при радиусе локального прогиба, равном 40 м коэффициент использования силы магнитного притяжения секции тормоза длиной 0,25 м составляет 40 %. На том же участке для тормоза с длиной полюсных наконечников 0,75 м он равен всего 3 %.

Это еще раз подтверждает преимущество секционных рельсовых тормозов, у которых только одна из нескольких секций на рельсовом стыке теряет тормозную силу, над длинными однокорпусными.

Применяя аппроксимирующие зависимости для коэффициентов использования силы магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза к рельсу на ступеньках и проседаниях рельсовых стыков, а также локальных прогибах шахтного пути, для тормозов с различной длиной полюсных наконечников можно определять величину тормозной силы локомотива при известных значениях геометрических параметров рельсового пути.

### 3.3. Ослабление тормозной силы секции магниторельсового тормоза на длинных неровностях рельсовых путей

Как в статике при отсутствии движения, так и при скольжении электромагнитного рельсового тормоза с установившейся скоростью по рельсу на прямом горизонтальном участке пути [75] (без учета влияния вихревых токов в рельсе) силы магнитного притяжения равны между собой и определяются по формуле Максвелла как

$$F_{\Pi\ ijm} = 2 \frac{B_{\Delta}^2 S_m}{2\mu_0} = 2 \frac{\Phi_{\Delta}^2}{2\mu_0 S_m} = 2 \frac{(J w)^2}{2\mu_0 R_{\Delta}} = \frac{\mu_0 (J w)^2 S_m}{\Delta_o^2\ ijm}, \quad (3.6)$$

где  $B_{\Delta}$  – магнитная индукция секции магниторельсового тормоза в рабочем зазоре между поверхностью трения полюсных наконечников и дорожки катания рельса, Тл [23];

$\mu_0$  – магнитная постоянная, равна  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$\Phi_{\Delta}$  – магнитный поток секции магниторельсового тормоза в рабочем зазоре между поверхностью трения полюсных наконечников и дорожки катания рельса, Вб;

$J$ ,  $w$  – сила тока (А) и число витков электромагнитной катушки (шт.) соответственно, а их произведение есть намагничивающая сила, Н;

$R_{\Delta}$  – магнитное сопротивление цепи при определенном рабочем зазоре, Ом.

На реально искривленных участках пути увеличиваются зазоры  $\Delta_o\ ijm$  и уменьшаются площади контакта  $S_m$ , поэтому соответственно уменьшаются силы магнитного притяжения, а значит и тормозные силы. При торможении локомотива на участках шахтного пути, имеющих только кривизну профиля (перегибы) и искривления в плане (повороты) [53], действующее значение тормозной силы секции магниторельсового тормоза (считая магнитное поле в воздушном зазоре по (3.6) однородным) равно

$$F_{\Pi\ ijm} = F_{0\Pi} k_{o\ ijm}. \quad (3.7)$$

Поскольку участок рельса может быть одновременно искривлен в плане и в профиле, то коэффициент использования силы магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза к рельсу  $k_{o\ ijm}$  можно найти как

$$k_{o\ ijm} = \frac{k_{SR}}{k_{\Delta R}^2} \frac{1}{k_{\Delta Rp}^2}, \quad (3.8)$$

где  $k_{SR}$  – коэффициент уменьшения площади контактирующих поверхностей полюсных наконечников и рельсов на кривой в плане, определяют как отношение площади контакта полюсного наконечника секции тормоза с поверхностью

дорожки катания рельса над искривлением рельсового пути в плане к такой же площади над прямым (не искривленным) рельсом; над искривлением профиля пути независимо от радиуса его кривизны в профиле  $R_p$  площадь контактирующих поверхностей тормозных наконечников  $S_m$  остается неизменной;

$k_{\Delta R}$ ,  $k_{\Delta R_p}$  – коэффициенты увеличения эквивалентного зазора между поверхностями контакта наконечников и рельсов в плане и профиле, соответственно. Коэффициент  $k_{\Delta R}$  определяют как отношение эквивалентного зазора между поверхностью трения полюсного наконечника секции тормоза и поверхностью дорожки катания рельса над искривлением рельсового пути в плане к такому же зазору над прямым (не искривленным) рельсом. Аналогично находят  $k_{\Delta R_p}$  как отношение эквивалентного зазора между поверхностью трения полюсного наконечника секции тормоза и поверхностью дорожки катания рельса над искривлением рельсового пути в профиле к такому же зазору над прямым (не искривленным) рельсом.

Указанные коэффициенты находят методом вычислительного эксперимента [55], как это видно на рис. 3.12, в программе трехмерного моделирования КОМПАС.

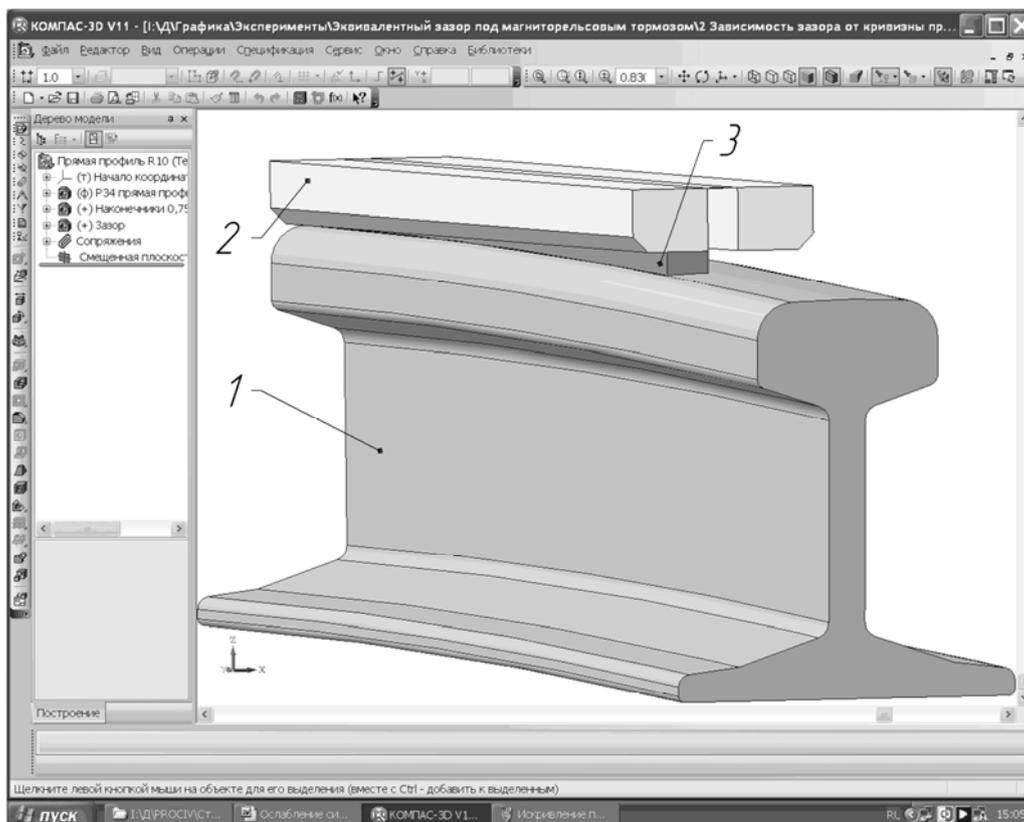


Рис. 3.12. Расчетная схема к определению эквивалентного зазора над искривлением рельса в профиле

Над искривленным в плане или профиле рельсом 1 размещают модель половины наконечников секции магниторельсового тормоза 2, а затем строят мо-

дель половины воздушных зазоров  $z$  между ними и поверхностями дорожек катания рельсов. Определив с помощью программы объем зазора и площадь его контакта с наконечником, находят эквивалентный зазор между трущимися поверхностями и коэффициенты  $k_{SR}$ ,  $k_{\Delta R}$ ,  $k_{\Delta R_p}$ , а затем вычисляют  $k_{o\ ijm}$  для конкретной неровности пути. При исследовании на искривлениях рельсов в профиле, измерения проводились и для положения тормоза в «яме» и на «бугре».

Результаты определения коэффициента использования силы магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза к рельсу в зависимости от величины радиуса кривизны в профиле и длины секции магниторельсового тормоза приведены на рис. 3.13 и 3.14 соответственно.

На рис. 3.13 сплошные кривые соответствуют установке тормоза на «бугре», а штриховые – в «яме». Зависимости с первой по пятую показывают изменение  $k_{o\ ijm}$  от радиуса перегиба рельса в профиле  $R_p$ , для полюсных наконечников длиной  $l_m$ , равной 0,125, 0,250, 0,500, 0,750 м и соответственно 1,000 м. Хорошо видно, что с увеличением длины тормозной секции на перегибе профиля пути  $k_{o\ ijm}$  резко падает, а значит и тормозная сила существенно уменьшается. На рис. 3.14 представлен трехмерный график зависимости  $k_{o\ ijm} = f(R_p, l_m)$ , демонстрирующий поверхность, на которой расположены точки возможных реализаций такой функции. Полученные табличные зависимости  $k_{o\ ijm} = f(R_p)$  аппроксимировали степенными полиномами `InterpolatingPolynomial` в программе `Wolfram Mathematica 7`, пример которых для тормозов различной длины (см. выше), расположенных на «бугре», приведен ниже.

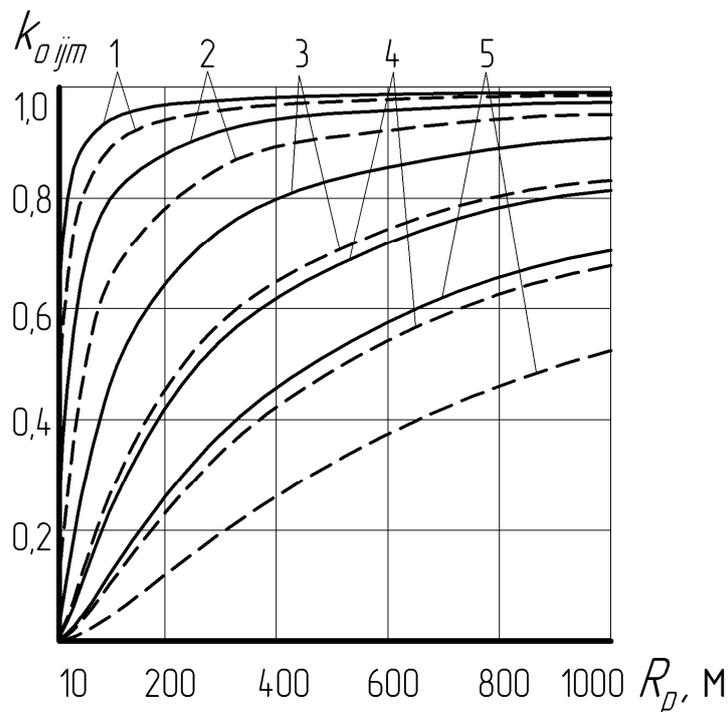


Рис. 3.13. Зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения от радиуса кривизны в профиле (по эквивалентному зазору)

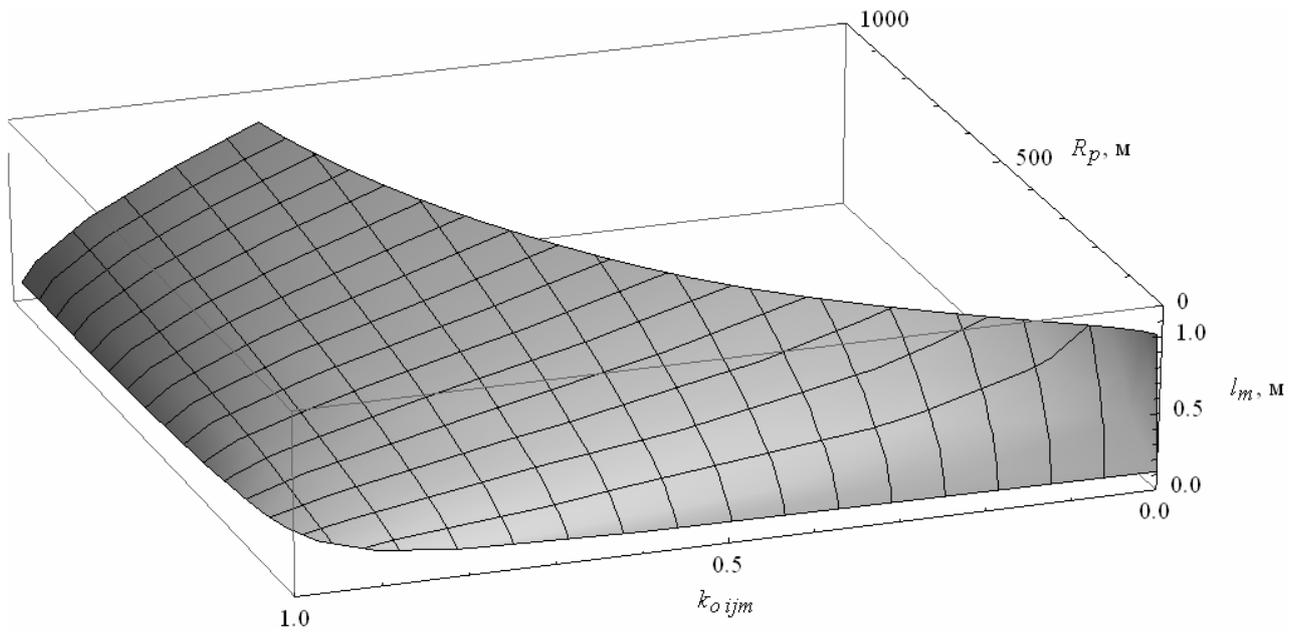


Рис. 3.14. Зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения от радиуса кривизны в профиле и длины поверхности контакта секции магниторельсового тормоза

С достаточной точностью они могут быть использованы для расчета ослабляющего влияния искривления рельсов в профиле при торможении локомотива, оснащенного магниторельсовыми тормозами с различной длиной их тормозных секций.

$$0.103243 R_p - 0.00609905 R_p^2 + 0.000215786 R_p^3 - 4.92287 \times 10^{-6} R_p^4 + 7.71657 \times 10^{-8} R_p^5 - \\ 8.72130 \times 10^{-10} R_p^6 + 7.36431 \times 10^{-12} R_p^7 - 4.76884 \times 10^{-14} R_p^8 + 2.41385 \times 10^{-16} R_p^9 - 9.68238 \times 10^{-19} R_p^{10} + \\ 3.10689 \times 10^{-21} R_p^{11} - 8.02151 \times 10^{-24} R_p^{12} + 1.67047 \times 10^{-26} R_p^{13} - 2.80349 \times 10^{-29} R_p^{14} + \\ 3.77470 \times 10^{-32} R_p^{15} - 4.04162 \times 10^{-35} R_p^{16} + 3.39159 \times 10^{-38} R_p^{17} - 2.18037 \times 10^{-41} R_p^{18} + \\ 1.03585 \times 10^{-44} R_p^{19} - 3.42409 \times 10^{-48} R_p^{20} + 7.02766 \times 10^{-52} R_p^{21} - 6.74038 \times 10^{-56} R_p^{22}$$

$$0.0192006 R_p + 0.000505334 R_p^2 - 0.0000418347 R_p^3 + 1.21885 \times 10^{-6} R_p^4 - 2.12555 \times 10^{-8} R_p^5 + \\ 2.52508 \times 10^{-10} R_p^6 - 2.17599 \times 10^{-12} R_p^7 + 1.41337 \times 10^{-14} R_p^8 - 7.09861 \times 10^{-17} R_p^9 + 2.80571 \times 10^{-19} R_p^{10} - \\ 8.83130 \times 10^{-22} R_p^{11} + 2.23021 \times 10^{-24} R_p^{12} - 4.53486 \times 10^{-27} R_p^{13} + 7.42409 \times 10^{-30} R_p^{14} - \\ 9.74712 \times 10^{-33} R_p^{15} + 1.01765 \times 10^{-35} R_p^{16} - 8.32958 \times 10^{-39} R_p^{17} + 5.22562 \times 10^{-42} R_p^{18} - \\ 2.42417 \times 10^{-45} R_p^{19} + 7.83033 \times 10^{-49} R_p^{20} - 1.57164 \times 10^{-52} R_p^{21} + 1.47532 \times 10^{-56} R_p^{22}$$

$$0.000116348 R_p + 0.000423314 R_p^2 - 0.0000159267 R_p^3 + 3.80477 \times 10^{-7} R_p^4 - 6.46448 \times 10^{-9} R_p^5 + \\ 8.04563 \times 10^{-11} R_p^6 - 7.49391 \times 10^{-13} R_p^7 + 5.32503 \times 10^{-15} R_p^8 - 2.93431 \times 10^{-17} R_p^9 + 1.27039 \times 10^{-19} R_p^{10} - \\ 4.36370 \times 10^{-22} R_p^{11} + 1.19698 \times 10^{-24} R_p^{12} - 2.63071 \times 10^{-27} R_p^{13} + 4.63228 \times 10^{-30} R_p^{14} - \\ 6.51082 \times 10^{-33} R_p^{15} + 7.24523 \times 10^{-36} R_p^{16} - 6.29481 \times 10^{-39} R_p^{17} + 4.17587 \times 10^{-42} R_p^{18} - \\ 2.04120 \times 10^{-45} R_p^{19} + 6.92465 \times 10^{-49} R_p^{20} - 1.45529 \times 10^{-52} R_p^{21} + 1.42639 \times 10^{-56} R_p^{22}$$

$$\begin{aligned}
& -0.000298843 R_p + 0.000153234 R_p^2 - 6.49819 \times 10^{-6} R_p^3 + 2.03474 \times 10^{-7} R_p^4 - 4.26719 \times 10^{-9} R_p^5 + \\
& 6.10099 \times 10^{-11} R_p^6 - 6.21610 \times 10^{-13} R_p^7 + 4.68798 \times 10^{-15} R_p^8 - 2.69209 \times 10^{-17} R_p^9 + 1.20127 \times 10^{-19} R_p^{10} - \\
& 4.22426 \times 10^{-22} R_p^{11} + 1.18136 \times 10^{-24} R_p^{12} - 2.64031 \times 10^{-27} R_p^{13} + 4.72025 \times 10^{-30} R_p^{14} - \\
& 6.72890 \times 10^{-33} R_p^{15} + 7.58923 \times 10^{-36} R_p^{16} - 6.67958 \times 10^{-39} R_p^{17} + 4.48710 \times 10^{-42} R_p^{18} - \\
& 2.22030 \times 10^{-45} R_p^{19} + 7.62246 \times 10^{-49} R_p^{20} - 1.62062 \times 10^{-52} R_p^{21} + 1.60647 \times 10^{-56} R_p^{22}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -0.000307843 R_p + 0.0000910331 R_p^2 - 4.96589 \times 10^{-6} R_p^3 + 1.78843 \times 10^{-7} R_p^4 - 4.01547 \times 10^{-9} R_p^5 + \\
& 5.99733 \times 10^{-11} R_p^6 - 6.31604 \times 10^{-13} R_p^7 + 4.89177 \times 10^{-15} R_p^8 - 2.87067 \times 10^{-17} R_p^9 + 1.30371 \times 10^{-19} R_p^{10} - \\
& 4.65004 \times 10^{-22} R_p^{11} + 1.31521 \times 10^{-24} R_p^{12} - 2.96561 \times 10^{-27} R_p^{13} + 5.33795 \times 10^{-30} R_p^{14} - \\
& 7.64803 \times 10^{-33} R_p^{15} + 8.65693 \times 10^{-36} R_p^{16} - 7.63738 \times 10^{-39} R_p^{17} + 5.13743 \times 10^{-42} R_p^{18} - \\
& 2.54335 \times 10^{-45} R_p^{19} + 8.72969 \times 10^{-49} R_p^{20} - 1.85457 \times 10^{-52} R_p^{21} + 1.83607 \times 10^{-56} R_p^{22}
\end{aligned}$$

На рис. 3.15, *а* показана зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения на переломе профиля от длины полюсных наконечников магниторельсового тормоза в случае размещения их на «бугре», а на рис. 3.15, *б* – в «яме». Кривые с первой по седьмую соответствуют радиусам кривизны пути в профиле  $R_p$ , равном 10, 25, 50, 100, 300, 600 м, и 1000 м.

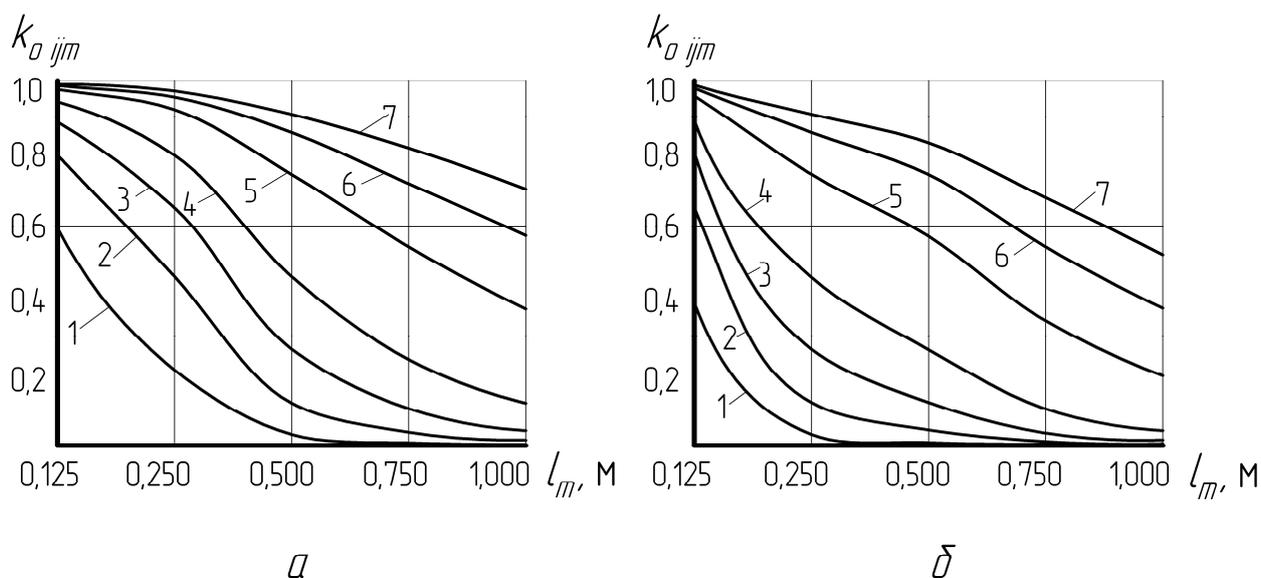


Рис. 3.15. Зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения от длины секции магниторельсового тормоза на изгибе профиля (по эквивалентному зазору):  
*а* – на «бугре»; *б* – в «яме»

Результаты определения коэффициента использования силы магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза к рельсу в зависимости от величины радиуса кривизны в плане  $R$  и от длины секции такого тормоза  $l_m$  (по эквивалентному зазору) приведены на рис. 3.16. На рис. 3.16, *а* зависимости с первой по пятую показывают изменение  $k_o ijm$  от радиуса изгиба рельса в плане, на котором размещен тормоз, для полюсных наконечников длиной 0,125, 0,500, 0,750,

1,000 м. На рис. 3.16, б показана зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения от длины полюсных наконечников тормоза на повороте (в плане). Кривые с первой по седьмую соответствуют радиусам кривизны пути в плане  $R$ , равным 10, 25, 50, 100, 300, 600 м, и 1000 м.

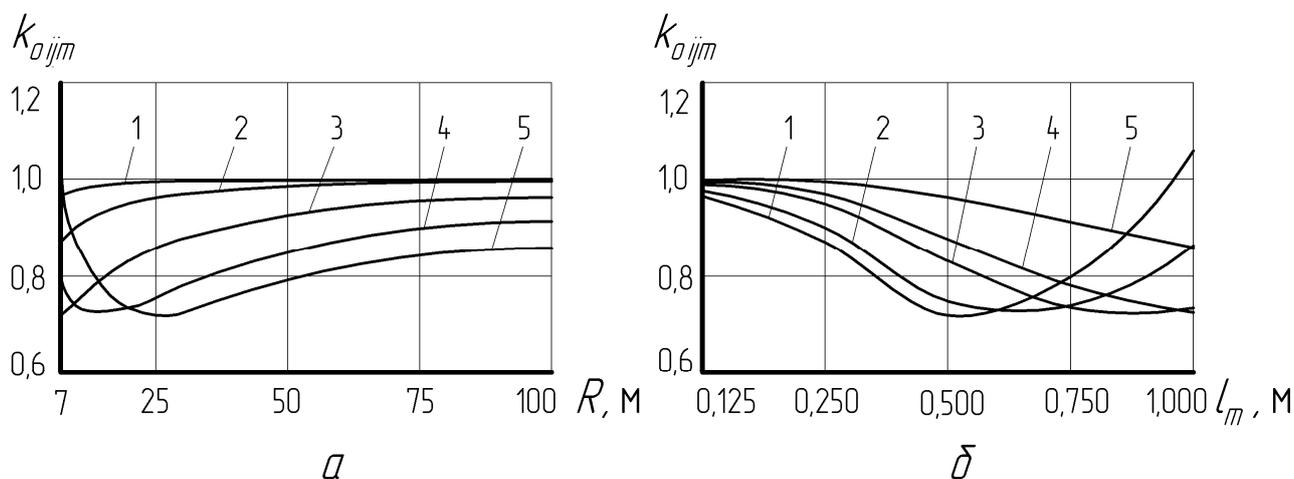


Рис. 3.16. Зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения от радиуса кривизны в плане и длины секции магниторельсового тормоза (по эквивалентному зазору):

$a$  – от радиуса кривизны в плане;

$б$  – от длины секции магниторельсового тормоза

Видно, что с увеличением длины тормозной секции на повороте пути коэффициент  $k_{oijm}$ , а значит и тормозная сила, существенно уменьшаются, однако для сравнительно длинных секций (0,75 м и 1,00 м) на кривых малого радиуса коэффициент использования силы магнитного притяжения резко возрастает. Это связано с тем, что на кривой малого радиуса длинный тормоз внутренним наконечником контактирует с поверхностью дорожки катания рельса по ее средней части. При этом наконечники приближаются к вершине дорожки катания рельса так, что эквивалентный зазор уменьшается, приближаясь к минимально возможному на прямой.

На рис. 3.17, а зависимости с первой по пятую показывают изменение  $k_{oijm}$  от радиуса кривизны в плане за счет уменьшения площади контакта полюсных наконечников секции магниторельсового тормоза и дорожки катания рельса при искривлении рельса в плане (для полюсных наконечников той же длины, что и в выше описанных случаях). На рис. 3.17, б показана зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения от длины полюсных наконечников магниторельсового тормоза в плане. Кривые с первой по пятую соответствуют радиусам кривизны пути в профиле 10, 25, 50, 100, 300, 600 м, и 1000 м.

Результирующие зависимости, учитывающие прямо пропорциональное влияние изменения площади контакта контактирующих поверхностей тормоза и рельса, а также обратно пропорциональное во второй степени влияние измене-

ния эквивалентного зазора между теми же поверхностями, приведены на рис. 3.18. Здесь приняты те же обозначения, что и на предыдущем рисунке.

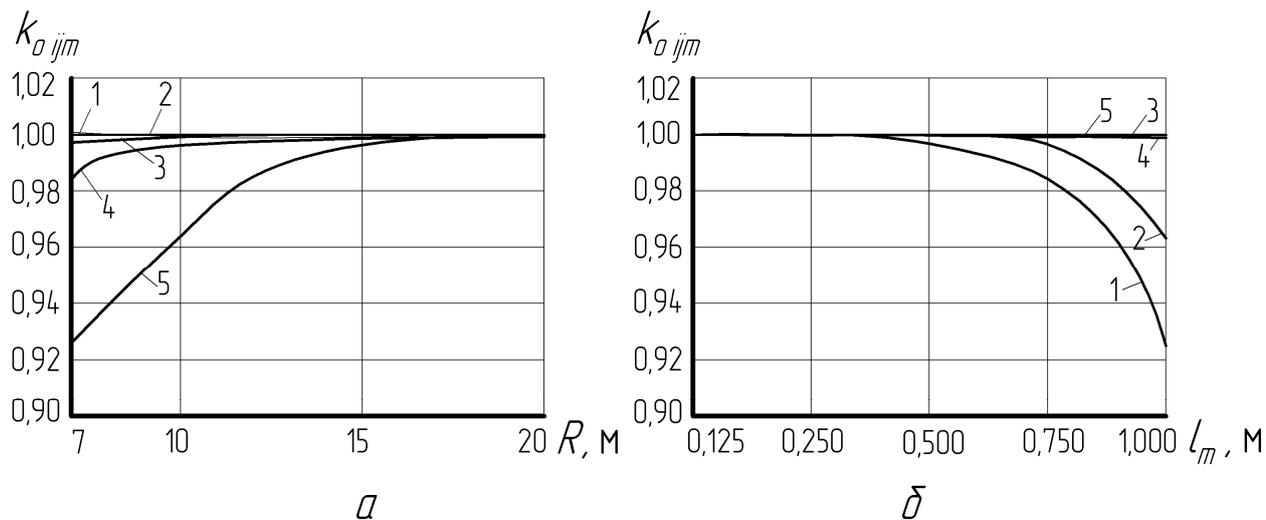


Рис. 3.17. Зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения от радиуса кривизны в плане и длины секции магниторельсового тормоза (по площади контакта):

$a$  – от радиуса кривизны в плане;

$б$  – от длины секции магниторельсового тормоза

Функция  $k_{o\ ijm} = f(R)$  хорошо аппроксимируется степенными полиномами `InterpolatingPolynomial` в программе `Wolfram Mathematica 7`, приведенными ниже для  $l_m$  0,125, 0,250, 0,500, 0,750, 1,000 м.

$$0.924074 + 0.00896679 R - 0.000519263 R^2 + 0.0000195767 R^3 - 5.27873 \times 10^{-7} R^4 + \\ 1.00407 \times 10^{-8} R^5 - 1.27834 \times 10^{-10} R^6 + 1.01912 \times 10^{-12} R^7 - 4.56182 \times 10^{-15} R^8 + 8.71580 \times 10^{-18} R^9 \\ 0.362112 R - 0.0641250 R^2 + 0.00653593 R^3 - 0.000422996 R^4 + 0.0000184699 R^5 - \\ 5.64367 \times 10^{-7} R^6 + 1.23058 \times 10^{-8} R^7 - 1.92587 \times 10^{-10} R^8 + 2.14668 \times 10^{-12} R^9 - \\ 1.66302 \times 10^{-14} R^{10} + 8.50727 \times 10^{-17} R^{11} - 2.58309 \times 10^{-19} R^{12} + 3.52462 \times 10^{-22} R^{13}$$

$$0.664387 + 0.00197664 R + 0.00123533 R^2 - 0.0000821528 R^3 + 2.54987 \times 10^{-6} R^4 - \\ 4.46177 \times 10^{-8} R^5 + 4.54561 \times 10^{-10} R^6 - 2.57608 \times 10^{-12} R^7 + 6.88041 \times 10^{-15} R^8 - 4.66690 \times 10^{-18} R^9$$

$$1.22529 - 0.115849 R + 0.0105397 R^2 - 0.000514379 R^3 + 0.0000155356 R^4 - \\ 3.02740 \times 10^{-7} R^5 + 3.81190 \times 10^{-9} R^6 - 2.99454 \times 10^{-11} R^7 + 1.33369 \times 10^{-13} R^8 - 2.56961 \times 10^{-16} R^9 \\ 2.30202 - 0.373950 R + 0.0391188 R^2 - 0.00229771 R^3 + 0.0000819982 R^4 - \\ 1.83344 \times 10^{-6} R^5 + 2.57687 \times 10^{-8} R^6 - 2.20838 \times 10^{-10} R^7 + 1.05361 \times 10^{-12} R^8 - 2.14385 \times 10^{-15} R^9$$

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что с увеличением длины тормозной секции на изгибе пути площадь контакта полюсных наконечников и рельса  $S_m$ , а значит и тормозная сила, уменьшаются. Имеющий место рост  $k_{o\ ijm}$  для длинных секций (более 0,5 м) на кривых в плане малого радиуса (менее 10 м) на практике невозможно использовать, поскольку тогда

конструктивно локомотив должен иметь большую жесткую базу, но быть в состоянии перемещаться по кривой малого радиуса. К тому же, в кривых малого радиуса силы сопротивления движению настолько велики, что в использовании тормозов нет необходимости.

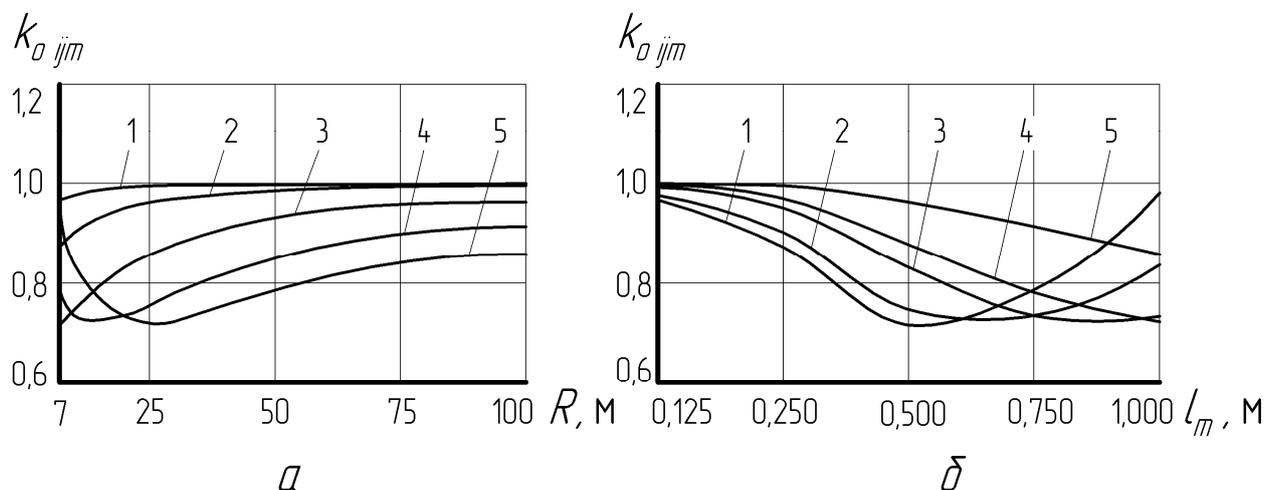


Рис. 3.18. Зависимость коэффициента использования силы магнитного притяжения от радиуса кривизны в плане и длины секции магниторельсового тормоза (по эквивалентному зазору и площади контакта):

$a$  – от радиуса кривизны в плане;

$b$  – от длины секции магниторельсового тормоза

На криволинейных в плане и профиле участках шахтного пути сила магнитного притяжения новых магниторельсового тормоза и рельса, а значит и тормозная сила, существенно уменьшаются. Наиболее существенное влияние на уменьшение силы магнитного притяжения полюсного наконечника к рельсу на поворотах оказывает увеличение эквивалентного зазора между ними, например, для секции длиной 0,125 м коэффициент использования силы магнитного притяжения равен 0,95. На вершине перегиба профиля радиусом 150 м этот коэффициент снижается до 0,85, а на пути, имеющем искривление одновременно двух этих видов, он составит соответственно 0,83. Для тормоза длиной 0,75 м на том же участке пути сила снижается уже на 75 %. Такие изменения могут быть спрогнозированы на реальных участках шахтного пути и должны быть учтены коэффициентами использования силы магнитного притяжения секции тормоза к рельсу.

Применяя аппроксимирующие зависимости для коэффициентов использования силы магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза к рельсу на поворотах и перегибах шахтного пути для тормозов с различной длиной полюсных наконечников, можно определять величину тормозной силы локомотива при известных значениях геометрических параметров рельсового пути.

### 3.4. Моделирование торможения шахтного поезда магниторельсовыми и гравитационными тормозами

При торможении шахтного шарнирно-сочлененного локомотива, оборудованного секционными магниторельсовыми тормозами, возможно ступенчатое регулирование общей тормозной силы. Максимальное ее значение, необходимое для экстренной остановки поезда, возникает при включении всех 12 секций магниторельсовых тормозов. Используя динамическую модель торможения шахтного поезда рельсовыми тормозами, приведенную в п. 4.1 [61], определим максимальный уклон пути, на котором шахтный поезд с семью груженными вагонетками типа ВГЗ,3 остановится на допустимом тормозном пути в 40 м [87]. На рис. 3.19 приведены характеристические графики параметров торможения такого состава всеми магниторельсовыми тормозами на прямом участке пути с уклоном 19 ‰. Здесь время опускания первой секции тормоза (холостой ход)  $t_{xm}$  равнялось 1,5 с, а для каждой последующей  $t_{xx}$  составляло 0,27 с (гидропривод).

По мере уменьшения скорости поезда, сила магнитного притяжения секции магниторельсового тормоза возрастала (см. рис. 3.19, а) с 14 000 до 18 000 Н, поскольку снижалось размагничивающее влияние краевого эффекта и увеличивался коэффициент трения скольжения полусных наконечников из-за зачистки дорожек катания рельсов, как это описано в пп. 4.3 и 4.5. Поэтому и тормозная сила одной секции магниторельсового тормоза увеличивалась с 950 до 1 550 Н. Скорость продольного движения тормозной секции (см. рис. 3.19, в) изменялась с большими колебаниями, чем скорость тяговой секции локомотива (см. рис. 3.19, ж), поскольку тормозная секция установлена на раме локомотива через резинометаллические шарниры. Нормальные реакции рельсов под колесами локомотива (см. рис. 3.19, з) изменялись за счет перераспределения силы веса локомотива на уклоне, а также продольных тормозных замедлений и силы от состава вагонеток на сцепке второй по ходу движения тяговой секции. Кроме того возникают дополнительные вертикальные пульсации  $N_{inj}$ , обусловленные догружающим эффектом от действия сил магнитного притяжения магниторельсовых тормозов к рельсам [22]. При этом тормозная секция испытывает значительное знакопеременное продольное ускорение (см. рис. 3.19, д), превышающее в начале торможения  $\pm 2g$ . В отличие от торможения устройствами, реализующими тормозную силу в точке контакта колеса и рельса, при торможении рельсовыми тормозами скорость локомотива снижается нелинейно (см. рис. 3.19, ж), поскольку ускорение (замедление) тяговой секции локомотива (см. рис. 3.19, з) возрастает по мере остановки поезда.

В результате действительный тормозной путь составил 39,687 м, а время торможения – 22,944 с.

При движении того же поезда по уклону, большему на 0,001 (т.е. 20 ‰), его остановка на нормативном тормозном пути становится невозможной, как это видно из рис. 3.20. В этом случае поезд остановится только через 25,171 с и 44,284 м.

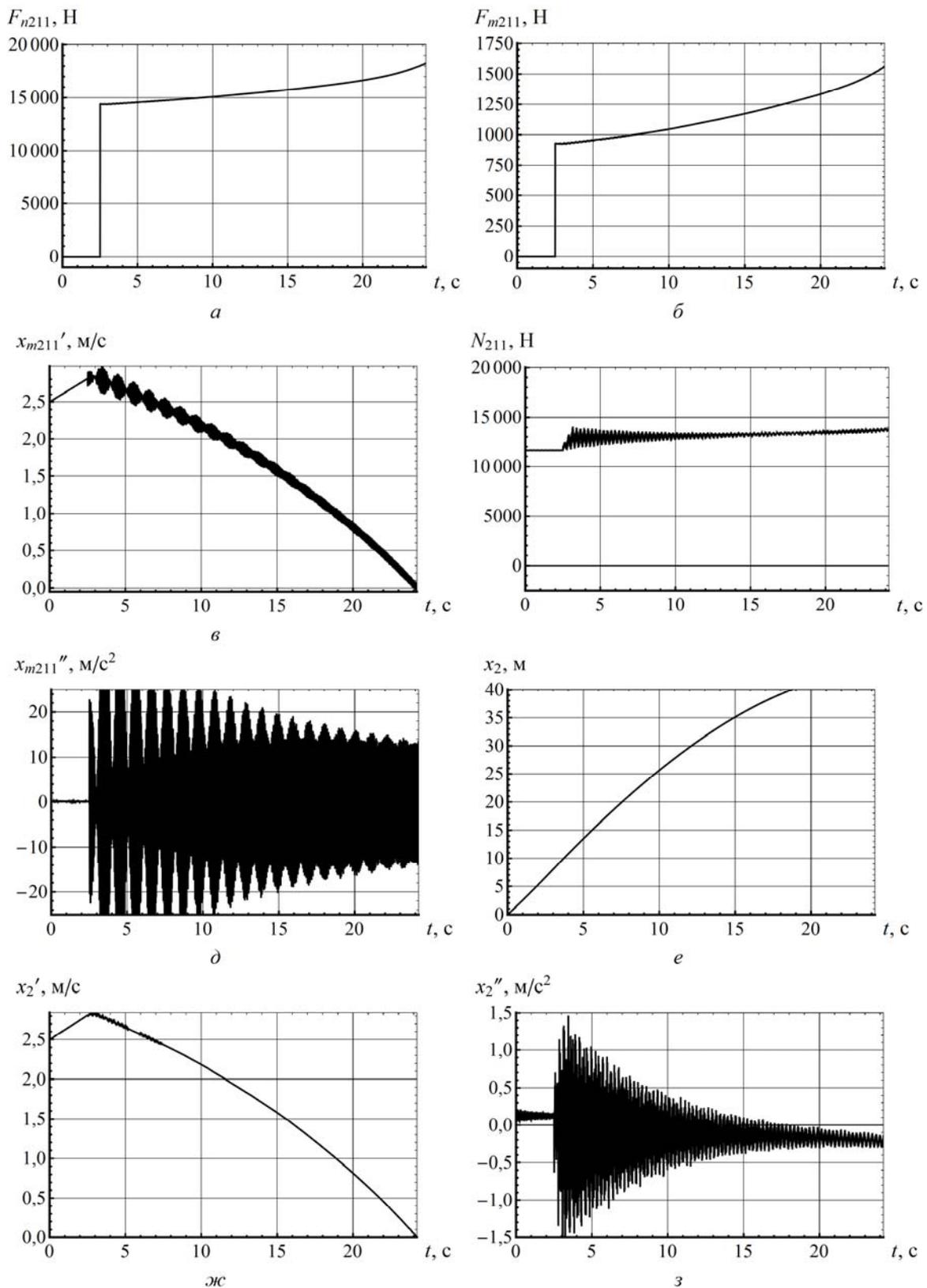


Рис. 3.19. Графики параметров торможения от времени всеми магниторельсовыми тормозами на уклоне 19 %:

- $a$  – сила магнитного притяжения;       $\bar{b}$  – тормозная сила;  
 $v$  – скорость тормозной секции;       $z$  – реакция рельса под колесом;  
 $d$  – ускорение тормозной секции;       $e$  – перемещение тяговой секции;  
 $ж$  – скорость тяговой секции;       $z$  – ускорение тяговой секции

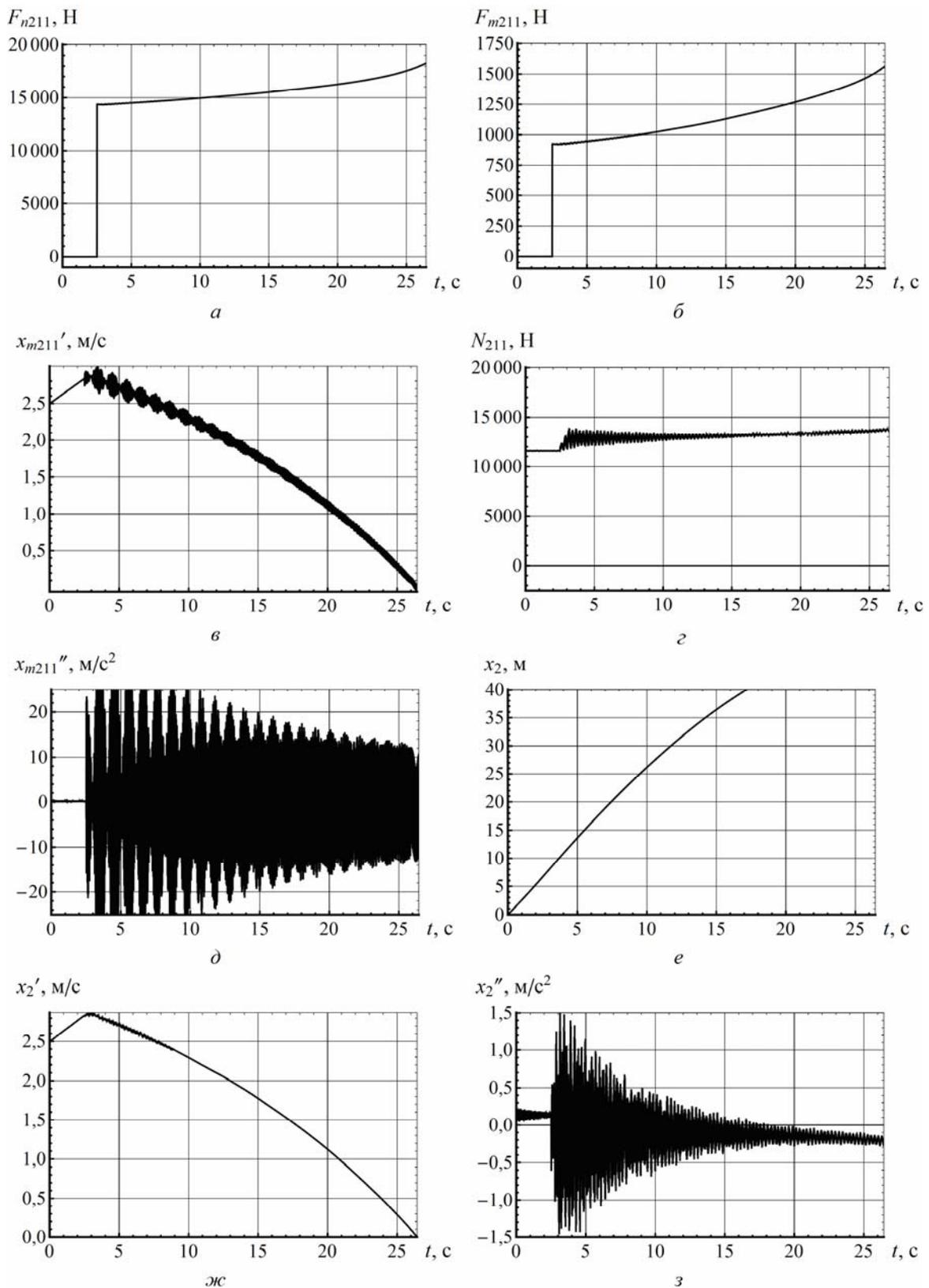


Рис. 3.20. Графики параметров торможения от времени всеми магниторельсовыми тормозами на уклоне 20 %:

- $a$  – сила магнитного притяжения;       $б$  – тормозная сила;  
 $в$  – скорость тормозной секции;       $г$  – реакция рельса под колесом;  
 $д$  – ускорение тормозной секции;       $е$  – перемещение тяговой секции;  
 $ж$  – скорость тяговой секции;       $з$  – ускорение тяговой секции

При включении части тормозных секций магниторельсовых тормозов, например, всех секций только на одной тяговой секции локомотива, указанный выше поезд уже не сможет остановиться на уклоне 19 %, его скорость будет возрастать до возникновения аварийной ситуации, связанной со сходом состава с рельсов, как это видно из рис. 3.21. Сила магнитного притяжения (см. рис. 3.21, *а*) и тормозная сила секции тормоза (см. рис. 3.21, *б*) снижаются, поскольку скорость поезда (см. рис. 3.21, *ж*) возрастает, не смотря на значительную работу сил трения секций магниторельсовых тормозов.

При торможении гравитационными рельсовыми тормозами часть силы веса локомотива с его колес переносится на тормозные колодки гравитационного тормоза, взаимодействующие с дорожками катания рельсов. Такое изменение выполняется в соответствии со значением коэффициента перераспределения силы веса локомотива между колесами и гравитационными тормозами  $k_{g\ ij}$ . Текущее значение этого коэффициента отдельно для каждой тяговой секции выбирает машинист локомотива. Перераспределение может быть сделано плавно за счет использования подрессоренной тормозной колодки [59] гравитационного рельсового тормоза. Опуская раму тяговой секции с помощью гидроцилиндров вертикальной подвески, машинист выбирает оптимальное ее положение для создания нужной тормозной силы.

Естественно, что полностью разгрузить колеса локомотива невозможно, иначе при наезде на криволинейный в плане рельс или локальные несовершенства пути может произойти всползание реборды колеса на рельс и, как следствие, сход поезда с рельсов. Поэтому в зависимости от дорожной обстановки следует выбирать безопасное значение  $k_{g\ ij}$ . Для движения по прямому, имеющему уклон участку пути, безопасным можно считать коэффициент перераспределения силы веса локомотива, равный 0,1, то есть 90 % силы веса локомотива переносится на гравитационные тормоза, как это показано на рис. 3.22 для уклона пути 13 %. При этом время опускания тормозной колодки до первого касания с рельсом (холостой ход)  $t_{xg}$  равнялось 1,5 с, а затем еще в течение времени  $t_{gc}$  – перераспределения силы веса локомотива между колесами локомотива и гравитационными рельсовыми тормозами, составляющего до 1,5 с (в зависимости от  $k_{g\ ij}$ ), машинист выбирал нужную тормозную силу плавно (линейно) опуская раму тяговой секции локомотива для задания значения  $k_{g\ ij}$  (см. рис. 3.22, *а*).

После касания тормозной колодки о рельс, тормозная сила гравитационного тормоза (см. рис. 3.22, *б*) линейно возрастала до некоторого значения (2 000 Н), соответствующего коэффициенту трения скольжения при скорости примерно 2,6 м/с, а затем увеличивалась до 2 600 Н, поскольку скорость продолжала падать. В это время вертикальная реакция рельса под колесами (см. рис. 3.22, *в*) снижалась пропорционально изменениям  $k_{g\ ij}$ , и даже приближалась к нулю на колесах второй по ходу движения колесной пары второй тяговой секции  $N_{221}$ ,  $N_{222}$ , как это видно на рис. 3.23. Остановка поезда произошла через 27,100 с, а действительный тормозной путь составил 38,829 м.

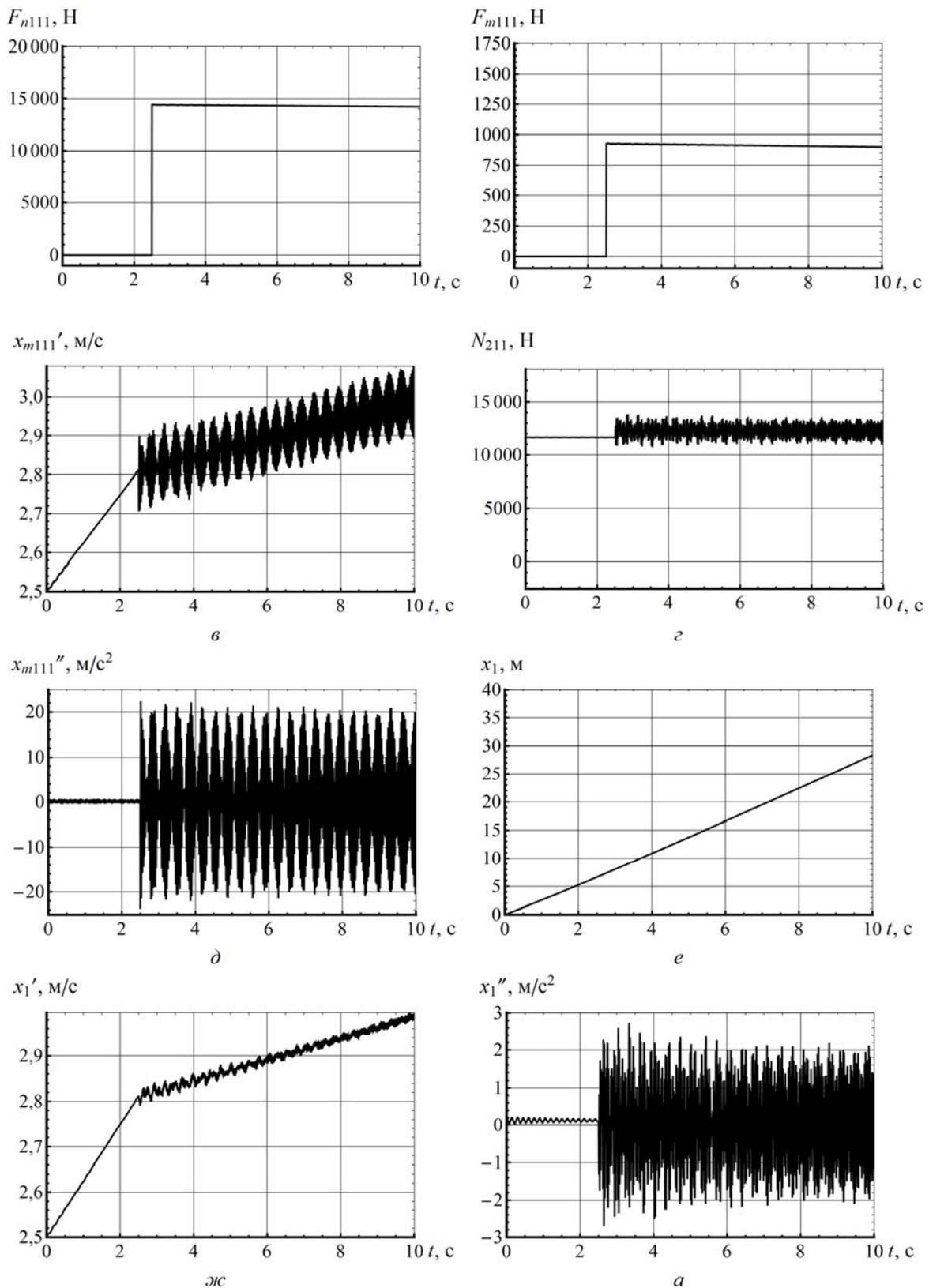


Рис. 3.21. Графики параметров торможения от времени половиной магниторельсовых тормозов на уклоне 19 ‰:  
*a* – сила магнитного притяжения; *б* – тормозная сила;  
*в* – скорость тормозной секции; *г* – реакция рельса под колесом;  
*д* – ускорение тормозной секции; *е* – перемещение тяговой секции;  
*ж* – скорость тяговой секции; *з* – ускорение тяговой секции

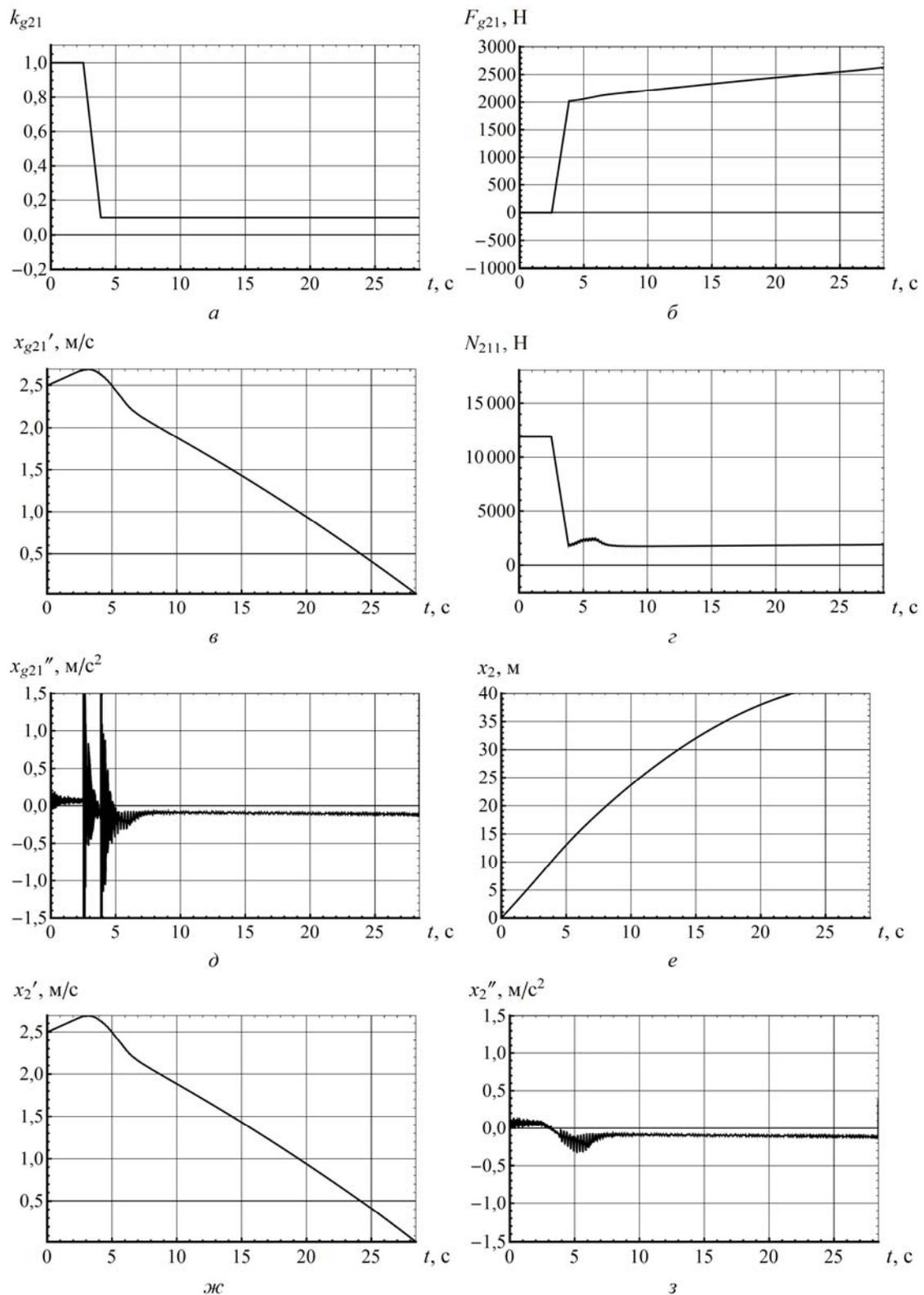


Рис. 3.22. Графики параметров торможения от времени гравитационными рельсовыми тормозами на уклоне 13 ‰ при коэффициенте перераспределения силы веса локомотива, равном 0,1:

- a* – коэффициент перераспределения;    *б* – тормозная сила;
- в* – скорость тормозной секции;        *г* – реакция рельса под колесом;
- д* – ускорение тормозной секции;       *е* – перемещение тяговой секции;
- ж* – скорость тяговой секции;            *з* – ускорение тяговой секции

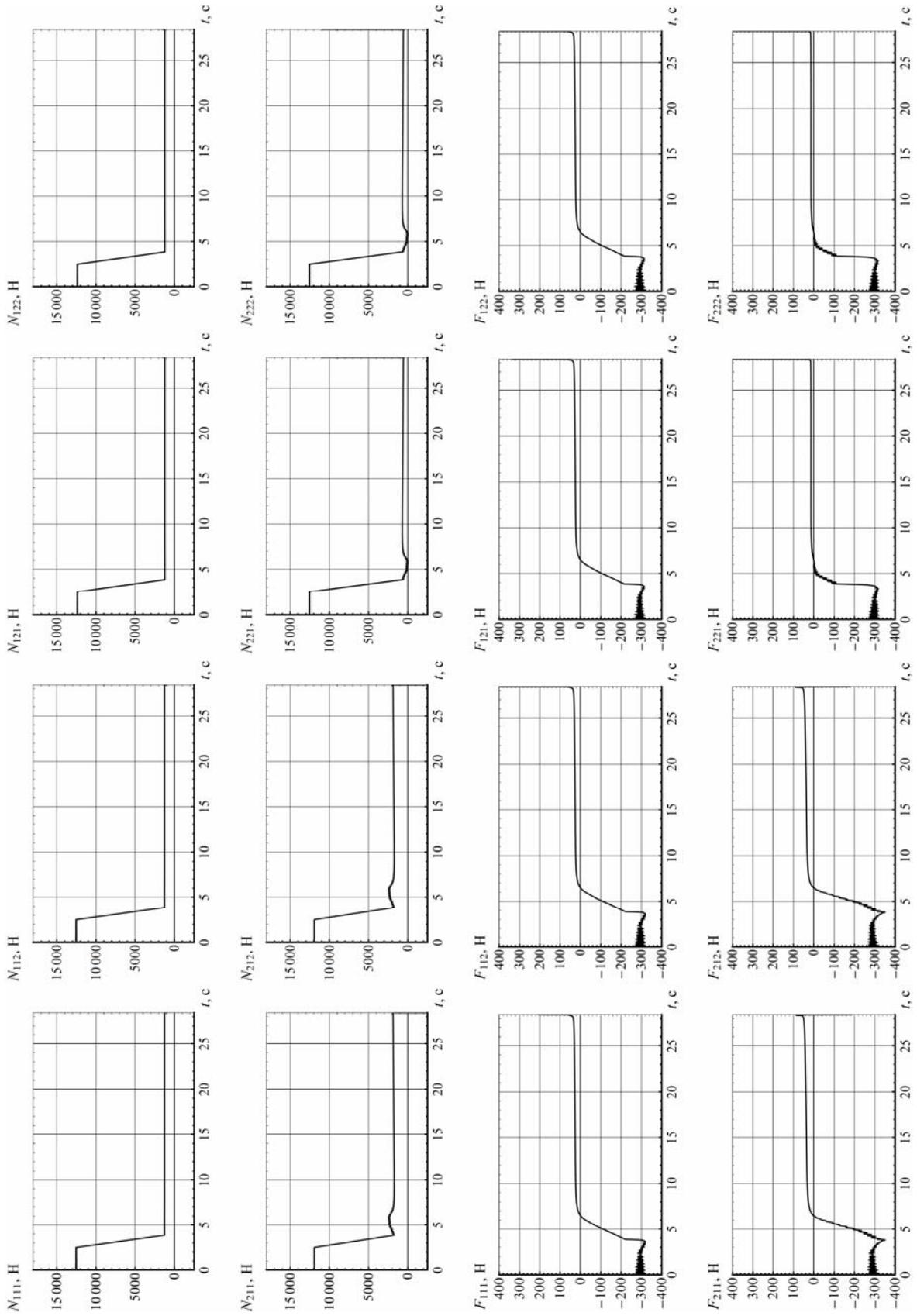


Рис. 3.23. Графики нормальных реакций рельсов и тормозных сил на колесах локомотива от времени при торможении гравитационными рельсовыми тормозами на уклоне 13 ‰ и коэффициенте перераспределения, равном 0,1

Следует отметить, что при снижении нагрузки на колеса в точках их контакта с рельсами происходят процессы, не свойственные режиму торможения. Из-за накопленной ротором приводного двигателя, элементами трансмиссии и колесными парами кинетической энергии появляется тяговый режим, – локомотив останавливается рельсовыми тормозами, но колеса некоторое время, приобретая отрицательное относительное скольжение, развивают силу тяги (отрицательную тормозную силу на рис. 3.23).

И лишь спустя примерно 5...7 с на колесах вновь начинают реализовываться силы торможения, характерные режиму «выбега».

При остановке такого же поезда на участке пути с уклоном 14 ‰ тормозной путь превысит допустимое значение и составит 43,374 м.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод, что реализуемый рельсовыми тормозами коэффициент трения скольжения в рабочем диапазоне скоростей движения шахтных поездов существенно ниже, чем коэффициент сцепления колеса и рельса.

При использовании в качестве материала полюсных наконечников стали марки Ст.3кп с максимально возможным коэффициентом трения покоя по стали  $\psi_{zm}$ , равным 0,25, действующее значение коэффициента трения скольжения  $f_m$  находится в пределах от 0,065 до 0,085. Для максимально возможного коэффициента трения покоя по стали тормозной колодки гравитационного рельсового тормоза из серого чугуна  $\psi_{zg}$ , равного 0,35, значение трения скольжения составляет уже от 0,09 до 0,12. Это видно на рис. 3.24, *а* и *б*. На рис. 3.24, *в* и *г* приведены те же графики, но для полюсных наконечников из первичного железа с максимально возможным коэффициентом трения покоя по стали  $\psi_{zm}$ , равным 0,35, и максимально возможного коэффициента трения покоя по стали тормозной колодки гравитационного рельсового тормоза из композитного материала  $\psi_{zg}$ , равного 0,55. Здесь коэффициент зачистки  $k_{mg}$  дорожки катания рельса равен 1,1).

Ни магниторельсовый, ни гравитационный рельсовый тормоз в отдельности не способны остановить шахтный поезд с семью гружеными вагонетками на уклоне 50 ‰, это возможно только при параллельном использовании тормозов, реализующих тормозную силу в точке контакта колеса и рельса. И только на стоянке, когда коэффициент трения скольжения близок по значению к коэффициенту трения покоя, возможно гарантированное удержание состава груженых вагонеток на таком спуске пути рельсовыми тормозами.

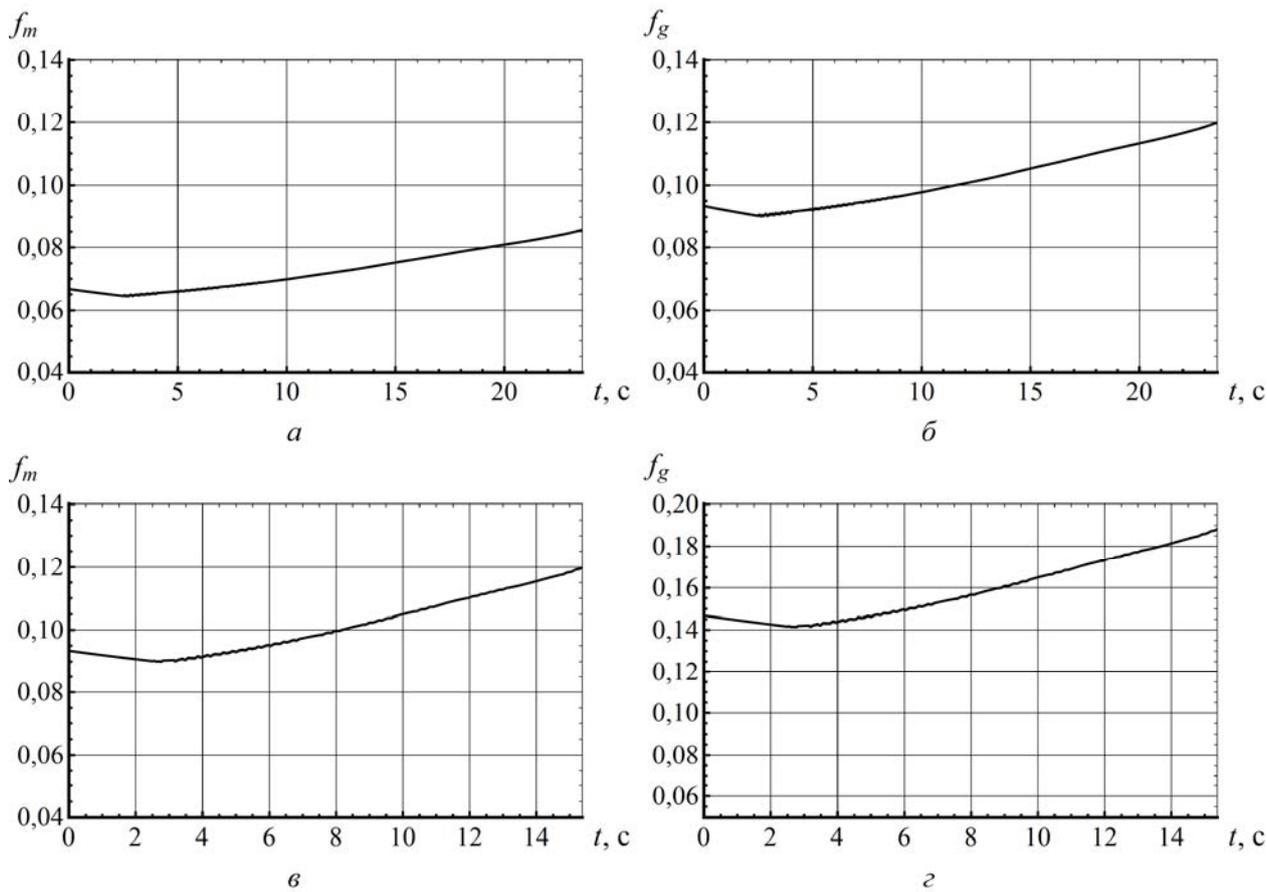


Рис. 3.24. Изменение коэффициентов трения скольжения при торможении:  
 а – для магниторельсовых тормозов при  $\psi_{zm}$ , равном 0,25;  
 б – для гравитационных рельсовых при  $\psi_{zg}$ , равном 0,35;  
 в – для магниторельсовых тормозов при  $\psi_{zm}$ , равном 0,35;  
 з – для гравитационных рельсовых при  $\psi_{zg}$ , равном 0,55

## РАЗДЕЛ 4

### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННОГО ЛОКОМОТИВА

#### 4.1. Секционный магниторельсовый тормоз

Для безопасной эксплуатации высокопроизводительного шахтного рельсового транспорта требуется создание шахтных локомотивов, обеспечивающих повышенные тягово-тормозные характеристики и высокую устойчивость против схода с рельсового пути при торможении. Интенсивность вибраций и ударов на ходовую часть локомотива, опасность схода с рельсов и воздействие на путь возрастают с увеличением массы локомотива и скорости движения. Включенный рельсовый тормоз накладывает дополнительные возмущения на параметры движения локомотива. Вместе с уже хорошо опробованным электромагнитным рельсовым тормозом используется магниторельсовый на постоянных магнитах [49].

Создание тормозных устройств, обладающих оптимальными размерами и высокой тормозной эффективностью для обеспечения безопасности движения шахтных шарнирно-сочлененных локомотивов, является актуальной научно-технической задачей, решение которой возможно при использовании теоретико-экспериментального подхода к проектированию современных шарнирно-сочлененных шахтных локомотивов.

Теоретические и экспериментальные исследования секционного магниторельсового тормоза шахтного шарнирно-сочлененного локомотива Э10 позволили сделать вывод о его высокой эффективности при движении не только на прямых, но и криволинейных участках рельсового пути [55].

Благодаря оригинальной конструкции механизма подвешивания, приведенной на рис. 4.1, секции магниторельсового тормоза способны самоустанавливаться на дорожках катания рельсов при движении по реальному шахтному пути с несовершенствами профиля, а также поворачиваться по рельсу на криволинейных участках с несовершенствами в плане [42].

Магниторельсовая тормозная система шахтного локомотива состоит из, трех магниторельсовых секций 1, вывешенных в коробчатой рамке 2 на поперечных осях 3. Рамка через кронштейны 4 и серьги 5 шарнирно подвешена на двух коромыслах 6. Противоположные плечи указанных коромысел шарнирно соединены со штоками 7 гидроцилиндров 8 подъема-опускания рамки 1. Корпуса гидроцилиндров шарнирно скреплены между собой при помощи пальца 9, который, как и оси 10, вокруг которых поворачиваются коромысла 6, жестко зафиксированы на поворотной панели 11.

Магниторельсовые секции установлены с возможностью вертикального перемещения в пазах рамки 2, горизонтального – между передней и задней стенками рамки (за счет имеющихся там зазоров) и поворота вокруг поперечных осей

3 (за счет зазора между соседними секциями в рамке). При этом средняя секция установлена ниже остальных (ближе к поверхности катания рельсов).

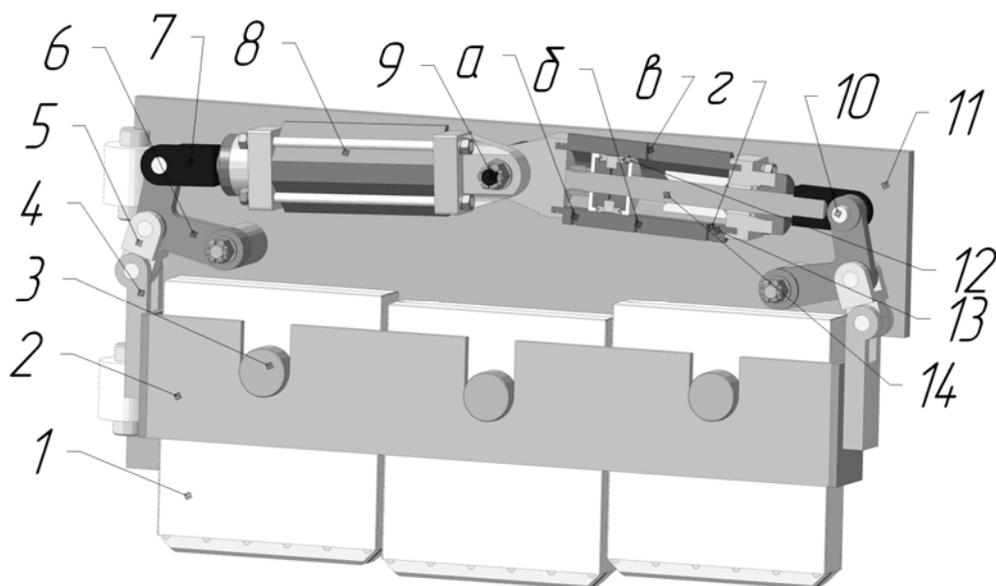


Рис. 4.1. Подвеска магниторельсового тормоза

Ее вертикальный паз в коробчатой рамке длиннее пазов других секций. Между ее поверхностью трения и поверхностью трения соседней секции (левой на рис. 4.1) имеется расстояние, равное примерно 10 мм, а между первой и третьей (правой на рис. 4.1) – 20 мм. Это обеспечивает поочередное опускание всех секций магниторельсового тормоза на поверхность катания рельса.

Гидроцилиндр имеет составной поршень 12 (включающий комплект необходимых уплотнений), гильзу 13 и шток 14. В гильзе расположены отверстия *a*, *б*, *в*, *г* для подачи и слива рабочей жидкости. Управление гидроцилиндром осуществляется посредством золотника в кабине машиниста. Когда торможение не требуется, золотник находится в нормальном положении «выключено» и рабочая жидкость от насоса маслостанции поступает в штоковую полость гидроцилиндра через отверстие *г*, а из поршневой полости через отверстие *a* жидкость вытесняется на слив. Остальные отверстия перекрыты, коробчатая рамка с секциями магниторельсового тормоза поднята в крайнее верхнее положение.

Когда необходимо включить тормоз на первую позицию торможения, золотник переводят в положение I и рабочая жидкость от насоса подается в полость *a*, а из отверстия *б* она уходит на слив. Остальные отверстия перекрыты. Поршень со штоком перемещается до тех пор, пока он не перекроет отверстие *б*, а коробчатая рамка 2 при этом опустится до гарантированного контакта поверхности трения средней секции магниторельсового тормоза с поверхностью катания рельса. Начнется торможение шахтного локомотива. Переключение золотника в положение II откроет на слив отверстие *в* гидроцилиндра, его поршень со штоком продолжит движение до тех пор, пока поршень не перекроет отверстие *в*, а коробчатая рамка опустится вниз в положение, в котором уже две секции магниторельсового тормоза будут создавать локомотиву тормозное уси-

лие. В случае если потребуется увеличить тормозную силу, золотник переводят в положение III, отверстие *z* открывается на слив и поршень со штоком перемещается в крайнее выдвинутое положение. Коробчатая рамка опустится в крайнее нижнее положение до гарантированного контакта всех трех секций с поверхностью катания рельса.

Таким образом, появляется возможность ступенчатого регулирования тормозной силы магниторельсового тормоза. Поскольку на локомотиве Э10 имеется 12 секций такого тормоза, то при симметричном их использовании (одновременное включение левых и правых одноименных секций) возможны шесть ступеней торможения.

#### 4.2. Повышение тормозной силы, реализуемой магниторельсовым тормозом на криволинейных участках пути

Поскольку секции магниторельсового тормоза в локомотиве Э10 размещены вне жесткой базы, то на поворотах пути их тормозная сила может существенно снижаться из-за того, что площадь контакта полюсных наконечников тормоза с головкой рельса уменьшается. На кривых малого радиуса секции тормоза могут вообще не попадать на дорожки катания рельсов. Для исключения таких проблем разработан механизм пассивного поворота подвески секций магниторельсового тормоза [42].

Поворотные пластины 11 с размещенными на них секциями магниторельсовых тормозов 1 установлены вне колесной базы на рамах тяговых секций 15 шахтного шарнирно-сочлененного локомотива (рис. 4.2).

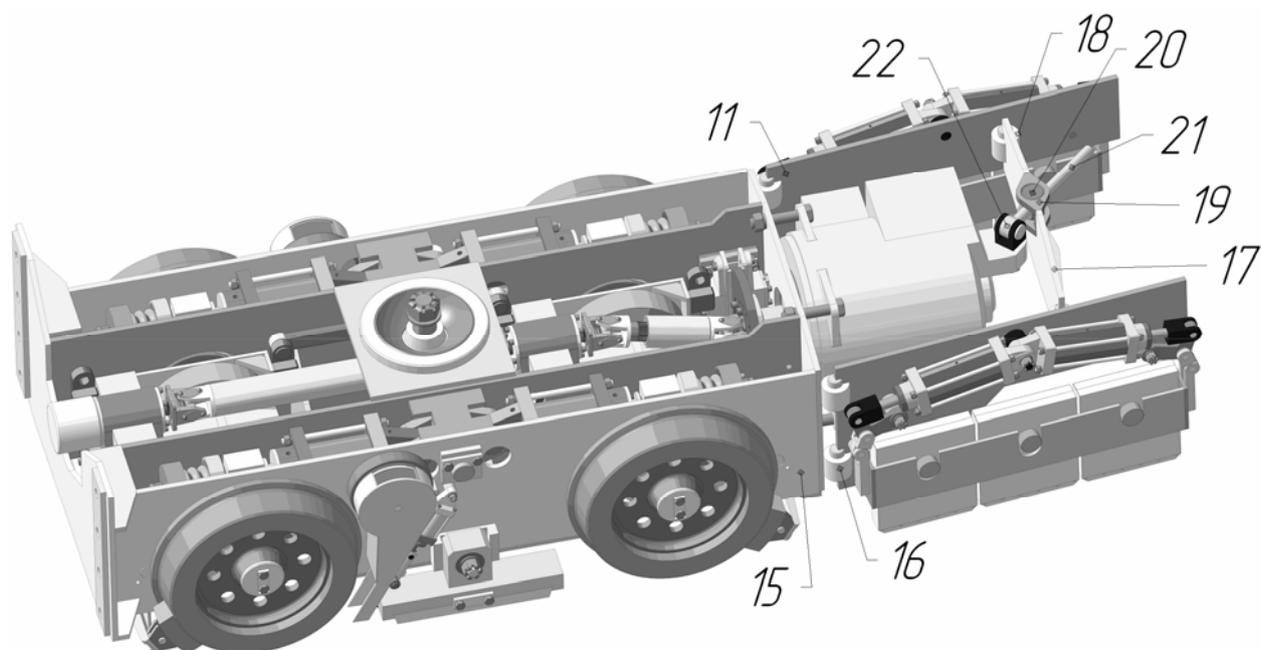


Рис. 4.2. Поворотный механизм подвески магниторельсового тормоза

Поворотная пластина 11 прикреплена к раме приводной тележки локомотива через два цилиндрических шарнира 16 и имеет возможность поворота вокруг верти-

кальной оси. Поперечная связь 17 при помощи цилиндрических шарниров 18 соединяет правую и левую поворотные пластины одной приводной тележки. В середине поперечной связи 17 закреплен корпус цилиндрического шарнира 19, в который вставлен в элемент 20, представляющий собой цилиндр с продольным пазом, ширина которого равна диаметру рычага 21, закрепленного одним концом на раме тележки при помощи двойного цилиндрического шарнира 22. Противоположный конец рычага 21 (рис. 4.3) проходит сквозь цилиндр 23 с продольным пазом (подобный элементу 20), установленный в корпусе цилиндрического шарнира 24, закрепленного под рамой средней секции 25 шахтного локомотива.

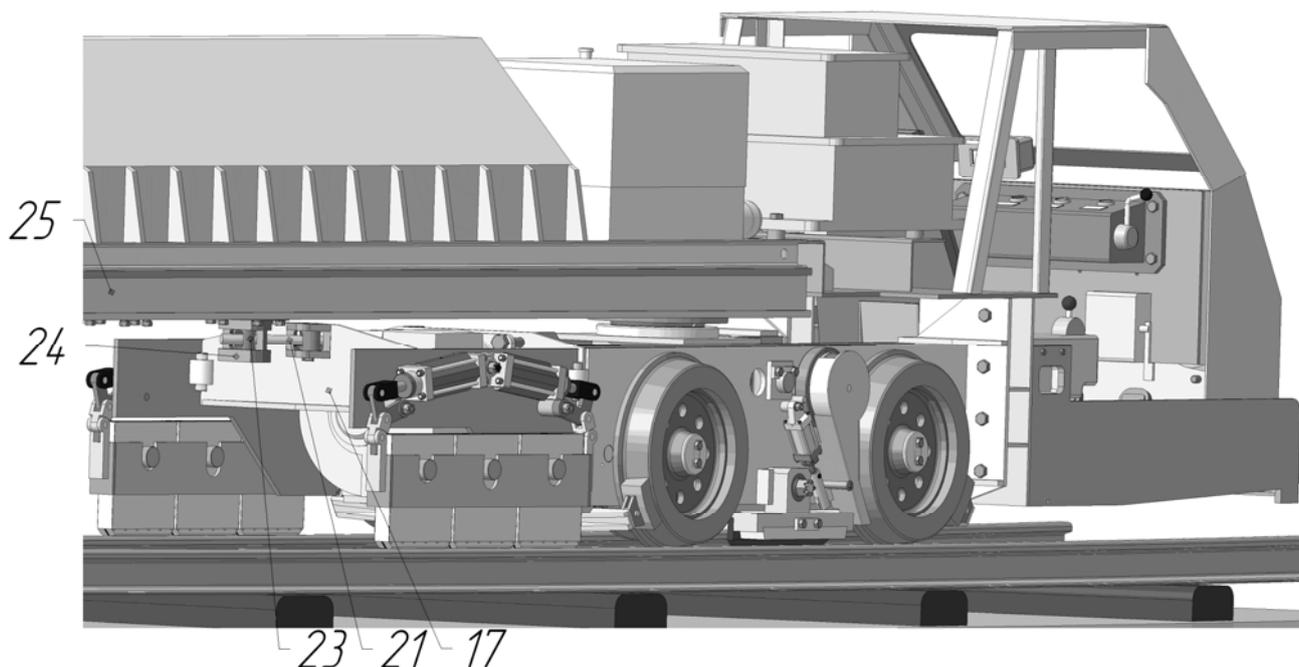


Рис. 4.3. Размещение магниторельсового тормоза на локомотиве

Такая конструкция позволяет уверенно проходить криволинейные участки рельсового пути за счет установки средней секции по хорде кривой, как это показано на рис. 4.4 (*а* – без механизма поворота магниторельсовых тормозов; *б* – с механизмом). Поворот пластин с размещенными на них секциями магниторельсовых тормозов происходит за счет взаимодействия набегавшего колеса первой по ходу движения приводной тележки локомотива с рельсом, что приводит к взаимному развороту осей тележек 1 и 2 по отношению к оси средней секции 3.

Структурная схема пространственного механизма поворота магниторельсовых тормозов показана на рис. 4.5. Степень подвижности механизма по формуле Чебышева равна

$$W_{\text{пр}} = 6n_m - (5p_V + 4p_{IV} + 3p_{III} + 2p_{II} + p_I), \quad (4.1)$$

где  $n_m$  – число звеньев в механизме, на рис. 4.5 обозначено в кружочках;

$p_I \dots p_V$  – число кинематических пар соответствующего класса (с первого по пятый), на рис. 4.5 пары обозначены заглавными латинскими буквами.

Найдем степень подвижности механизма поворота из (4.1) как

$$W_{\text{пр}} = 6 \cdot 15 - (5 \cdot 12 + 4 \cdot 3 + 3 \cdot 1 + 2 \cdot 6 + 1 \cdot 2) = 1.$$

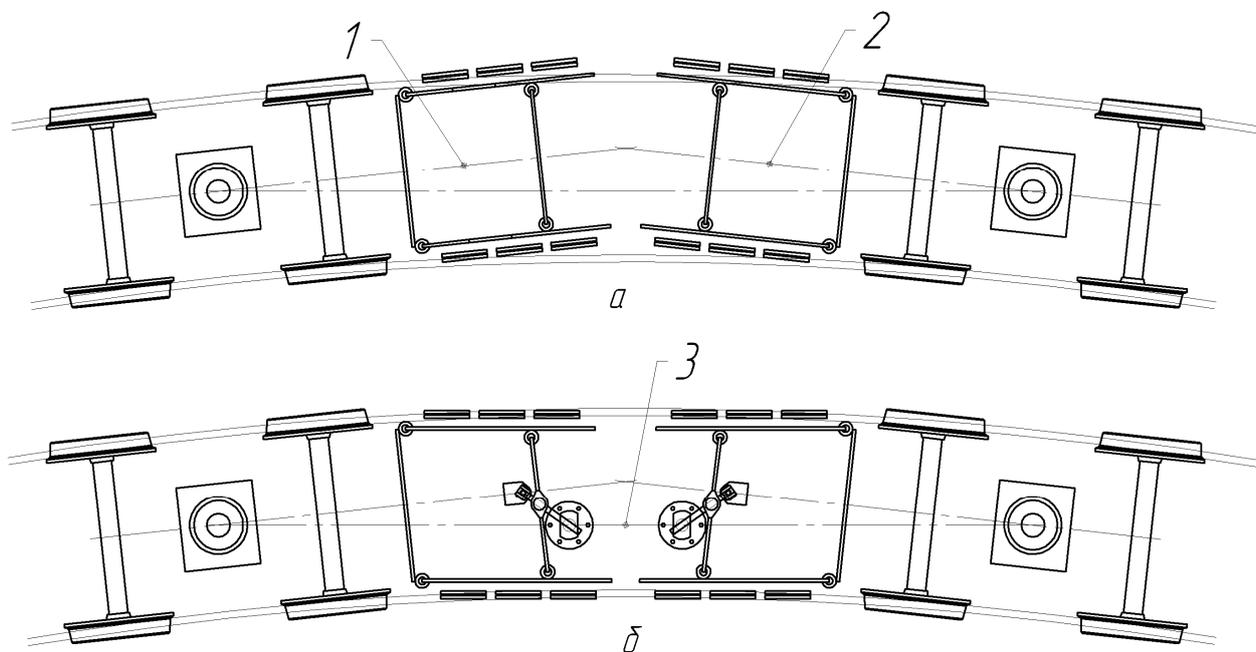


Рис. 4.4. Установка шарнирно-сочлененного локомотива на кривой

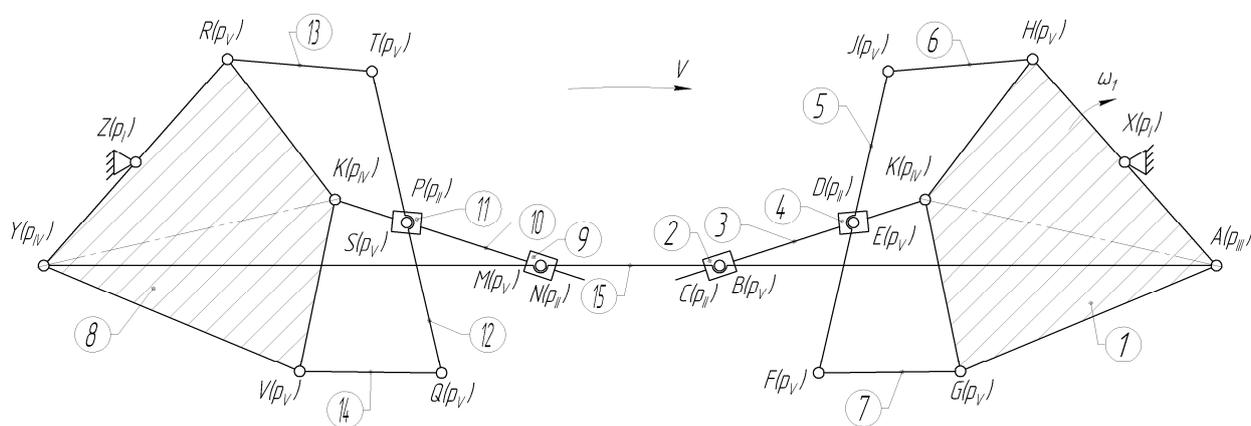


Рис. 4.5. Структурная схема механизма поворота магниторельсовых тормозов

Таким образом, впервые создана конструкция подвески секционного магниторельсового тормоза вне жесткой базы шахтного локомотива с автоматическим расположением его секций на криволинейном участке пути в положение, наиболее близкое к дорожкам катания рельсовых нитей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии приведены результаты научно-исследовательской работы, в которой на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований определены закономерности изменения длины тормозного пути шахтного поезда при торможении рельсовыми тормозами шарнирно-сочлененного локомотива от величин реальных искривлений и несовершенств шахтного рельсового пути в плане и профиле, а также предложены новые технические решения по совершенствованию тормозной системы такого локомотива. Это обеспечивает уменьшение тормозного пути шахтного поезда, его безопасную остановку и стоянку на продольных уклонах пути величиной до 50 ‰.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации.

1. Обзор и анализ современных литературных источников показывает, что специфические условия транспортирования составов груженных вагонеток не позволяют в полной мере использовать предусмотренные техническими характеристиками шахтных локомотивов скорости движения из-за ограниченных возможностей тормозных средств на тяжелых затяжных спусках (до 50 ‰). Исследования по определению коэффициента трения скольжения рельсовых тормозов проводились без учета особенностей процесса взаимодействия их тормозных колодок с рельсом при наличии промежуточной среды. Не в полной мере учитывались искривления рельсовой колеи в плане и профиле, а также длинные и короткие, систематические и локальные несовершенства пути. Тепловой режим гравитационного рельсового тормоза шахтного локомотива, особенно с учетом использования его в качестве служебного тормоза, в настоящее время изучен недостаточно.

2. Обоснованы и составлены уточненные расчетные схемы торможения шахтного шарнирно-сочлененного локомотива с составом вагонеток магнито-рельсовым и гравитационным тормозами.

3. Разработана и апробирована динамическая модель торможения шахтного шарнирно-сочлененного локомотива с составом вагонеток рельсовыми тормозами на реальном рельсовом пути с систематическими и локальными, а также длинными и короткими несовершенствами.

4. Разработана методика тестирования динамической модели торможения шахтного поезда для проверки адекватности ее положением классической механики.

5. Разработана методика определения рациональных параметров секционного рельсового тормоза шахтного локомотива.

6. Разработана методика учета влияния несовершенств реального шахтного пути на режим торможения локомотива рельсовыми тормозами.

7. Научное обоснование новых технических решений подрессоренного гравитационного тормоза, динамической песочницы барабанного типа, секционного магнито-рельсового тормоза с механизмом его поворота на кривых подтверждает целесообразность их использования в конструкции шахтных шарнирно-сочлененных локомотивов.

8. Следует устанавливать на шахтных локомотивах секционные рельсовые тормоза на постоянных магнитах с поперечным замыканием магнитного потока. Это позволяет улучшать эффективность торможения за счет более устойчивого размещения секций тормоза на поверхности катания рельса. Рациональной следует считать длину секции такого тормоза от 150 до 300 мм с расстоянием между соседними секциями, равным от 10 до 15 мм. Такой тормоз реализует силу торможения на 20 % большую, чем цельный тормоз той же длины. Секционный магниторельсовый тормоз имеет преимущества при проезде ступеньки рельсового стыка по сравнению с однокорпусным.

9. Следует использовать подрессоренный гравитационный тормоз в качестве аварийного и стояночного. По условию температурной устойчивости материала стальной колодки гравитационного рельсового тормоза ее толщина может быть не более 50 мм. Эффективной для служебного торможения может быть комбинация секционного магниторельсового тормоза, который будет ступенчато (с некоторыми рывками) увеличивать тормозную силу по мере опускания новых секций, и подпружиненного гравитационного, который сгладит эти рывки. Наличие магниторельсового и гравитационного тормозов на тяжелых шарнирно-сочлененных локомотивах следует считать обязательным.

10. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при разработке методик определения действительного времени торможения и тормозного пути шахтного поезда с шарнирно-сочлененным локомотивом, выбора рациональных параметров секционного магниторельсового тормоза и проверки адекватности динамических моделей движения положениям классической механика, внедренных в ГАО Институт «Днепрогипрошахт», ГП «ГИП «Кривбасспроект», ГП НИТИ, ГП «Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», ГП Институт машин и систем, АО «Ново-краматорский машиностроительный завод», а так же на Дружковском машиностроительном заводе и в учебный процесс ГВУЗ «НГУ».

11. Шахтные испытания экспериментального образца шарнирно-сочлененного локомотива Э10, оборудованного колесно-колодочным, дисковым осевым и трансмиссионным тормозами, а также магниторельсовым и гравитационными рельсовыми тормозами, разработанного в ГВУЗ «НГУ» и изготовленного ХК «Лугансктепловоз», показали, что при прочих равных условиях его тормозной путь на 50 % короче, чем тормозной путь локомотивов АРВ10ГЭ или К10, оборудованных только колесно-колодочным тормозом. Ожидаемый годовой экономический эффект от использования одного модернизированного электровоза Э10 в условиях шахты «Самарская» ДТЭК «Павлоградуголь» в ценах 2010 г. составляет 86 000 грн.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. с. 1606356 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 39/00. Устройство для подачи песка к колесам транспортного средства / В. В. Процив, В. В. Мишин, А. И. Лебедев, В. А. Салов (СССР). – № 4387694/27-11; заявл. 01.03.88 ; опубл. 15.11.90, Бюл. № 42.
2. Абрамов А. П. Анализ параметров рельсовых тормозов подвижного состава / А. П. Абрамов, В. Д. Елманов ; Кузбас. политехн. ин-т. – Кемерово, 1983. – 12 с. – Деп. в ВНИИТЕИтяжмаш, 1984. – № 1221. – Т. Д84.
3. Абрамов А. П. Исследования и создание рельсовых тормозов на постоянных магнитах для рудничных локомотивов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.05.06 «Горные машины» / А. П. Абрамов. – Кемерово, 1986. – 17 с.
4. Абрамов А. П. К вопросу увеличения производительности локомотивной откатки / А. П. Абрамов, В. Д. Елманов // Механизация очистных и проходческих работ : сб. науч. тр. Кузбас. политехн. ин-та. – Кемерово, 1985. – С. 97 – 99.
5. Абрамов А. П. Магнитное сопротивление рельса / А. П. Абрамов // Механизация горных работ : сб. науч. тр. Кузбас. политехн. ин-та. – Кемерово, 1984. – С. 155 – 159.
6. Абрамов А. П. Перспективы развития рельсового тормоза для рудничного подвижного состава / А. П. Абрамов // Механизация и автоматизация ручных и трудоемких операций в промышленности Кузбасса : тез. докл. науч. практ. конф. молодых ученых и специалистов, посвященной 60-летию образования СССР. – Кемерово, 1982. – С. 119 – 121.
7. Абрамов А. П. Определение усилия управления РМТ / А. П. Абрамов, В. Д. Елманов ; Кузбас. политехн. ин-т. – Кемерово, 1981. – 7 с. – Деп. в ЦНИИТЭИтяжмаш, 1982. – № 994. – Т. Д82.
8. Абрамов А. П. Стенд для испытания магнитных систем рельсовых тормозов на базе машины МУП-50 / А. П. Абрамов, В. Д. Елманов // Информационный листок / Кемеровский ЦНТИ. – Кемерово, 1982. – № 236 – 82. – 3 с.
9. Ауза В. Я. Влияние вихревых токов феррорельса на стационарное движение электромагнита / В. Я. Ауза, Н. Н. Устинов // Высокоскоростной наземный транспорт. – Новочеркасск: НПИ, 1979. – 176 с.
10. Балабан Н. П. Исследование способов и средств увеличения тормозной силы рудничных поездов при откатке контактными электровозами : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.05.06 «Горные машины» / Н. П. Балабан. – Д., 1980. – 20 с.
11. Балон Л. В. Исследование величины тормозной силы электромагнитного рельсового тормоза на различных участках пути / Л. В. Балон // Труды РИИЖТ. – Ростов-на-Дону, 1974. – Вып. 104. – С. 93 – 100.
12. Балон Л. В. Коэффициент трения рельсового электромагнитного тормоза / Л. В. Балон // Труды РИИЖТ. – Ростов-на-Дону, 1968. – Вып. 77. – С. 110 – 115.
13. Балон Л. В. Новые виды тормозов на маневровых локомотивах / Л. В. Балон, В. Б. Шашкин // Труды РИИЖТ, 1976. – Вып. 131. – С. 30 – 35.

14. Балон Л. В. Исследование электромагнитного рельсового тормоза: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.22.07 «Подвижной состав и тяга поездов» / Л. В. Балон. – Ростов-на-Дону, 1966. – 22 с.
15. Балон Л. В. Электромагнитные рельсовые тормоза / Л. В. Балон. – М.: Транспорт, 1979. – 104 с.
16. Бесценная О. В. Время подготовки при одновременном действии магниторельсовых и дисковых тормозов / О. В. Бесценная, В. Д. Фокин // Вестник НИИЖТ – М., 1963. – № 3. – С. 46 – 55.
17. Бесценная О. В. Исследование магниторельсовых тормозов для высокоскоростных поездов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.22.07 «Подвижной состав и тяга поездов» / О. В. Бесценная. – М., 1969. – 20 с.
18. Бондаревский Д. И. Трамвайные вагоны РВ3-6М2 и КТМ-5М3 / Д. И. Бондаревский, М. С. Черток, А. А. Пономарев. – М.: Транспорт, 1975. – 256 с.
19. Быков Б. К. Натурные испытания фрикционного материала для магниторельсового тормоза / Б. К. Быков, Э. Д. Браун. Труды МИИТ: сб. «Исследования электроснабжения, конструкции и регулирования тормозных устройств». – М., 1968. – Вып. 315. – С. 67 – 71.
20. Гарг В. К. Динамика подвижного состава / В. К. Гарг, Р. В. Дукипатти ; пер. с англ. под ред. Н.А. Панькина. – М.: Транспорт, 1988. – 391 с.
21. Говоруха В. В. Метод расчета элементов шахтного рельсового пути с учетом переменных характеристик поперечных сечений и свойств упругости основания / В. В. Говоруха // Машины для предприятий горной промышленности ; сб. науч. тр. – К.: Наук. думка, 1986. – С. 59 – 69.
22. Деклараційний патент на корисну модель № 7062 Україна, 7В61С 15/04. Пристрій для збільшення навантаження на осі рейкового транспортного засобу / О. В. Новицький, І. О. Таран, В. В. Проців (Україна) ; заявник і патентовласник Національний гірничий університет. – № 2004 0605140; заявл. 29.06.2004 ; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6.
23. Дорожкин В. Н. Повышение надежности и эффективности магниторельсовых тормозов шахтных локомотивов : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.05.06 «Горные машины» / В. Н. Дорожкин. – Д., 1990. – 190 с.
24. Дьяконов В. П. Mathematica 5/6/7. Полное руководство / В. П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 624 с.: ил.
25. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган : пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
26. Зиль В. В. Обоснование рациональных параметров и разработка подвески электромагнитных рельсовых тормозов рудничных аккумуляторных электровозов : автореф. дис. на соискание учен. степ. канд. техн. наук: спец. 05.05.06 «Горные машины» / В. В. Зиль. – Д., 1986. – 17 с.
27. Иноземцев В. Г. Тепловые расчеты при проектировании и эксплуатации тормозов / В. Г. Иноземцев. – М.: Транспорт, 1966. – 26 с.

28. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
29. Карминский Д. Э. Исследование температурного режима бандажа и колодок при торможении / Д. Э. Карминский, В. И. Хрулев, В. А. Белаш // Вопросы теории и конструкции локомотивов. – Ростов-на-Дону: РИИЖТ, 1965. – С. 54 – 63.
30. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения / Г. М. Кондратьев. – М.: Машгиз, 1957. – 44 с.
31. Крагельский И. В. Коэффициенты трения / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. – М.: Машиностроение, 1962. – 220 с.
32. Лазарян В. А. Устойчивость движения рельсовых экипажей / В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко. – К.: Наук. думка, 1972. – 200 с.
33. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
34. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
35. Мишин В. В. Математическая модель шахтного секционного локомотива в кривой / В. В. Мишин, О. Б. Зайцева // Известия вузов: Горный журнал. – 1992. – № 4. – С. 71 – 74.
36. Новицкий А. В. Исследование влияния характеристик колебательного процесса фрикционной пары на коэффициент трения / А. В. Новицкий, И. А. Таран // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 10. – С. 59 – 63.
37. Новицкий А. В. Математическая модель процесса взаимодействия рельсового магнитного тормоза с рельсом / А. В. Новицкий // Збірник наукових праць НГУ. – 2005. – № 21. – С. 113 – 119.
38. Новицкий А. В. Тепловой режим рельсового тормоза шахтного локомотива / А. В. Новицкий // Матеріали міжнародної конференції «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості – 2004». – Кривий Ріг: Криворізький технічний університет, 2004. – Т. 2. – С. 135 – 140.
39. Новицкий А. В. Экспериментальное исследование коэффициента трения рельсового магнитного тормоза / А. В. Новицкий, А. Н. Коптовец // Вісник СУНУ ім. В. Даля: науковий журнал. – 2006. – № 7 (101). – С. 95 – 99.
40. Основы построения и технические решения семейства секционных шахтных локомотивов / В. В. Мишин, А. И. Лебедев, В. В. Процив и др. // Известия Днепропетровского горного института. – М.: Недра, 1990. – С. 187 – 195.
41. Пат. № 55969 Україна, В61С 13/00. Шахтний локомотив / В. В. Процив, О. Ф. Бринза, В. Г. Нагорна, А. О. Сердюк, Е. М. Шляхов (Україна); заявник і патентовласник Національний гірничий університет. – № 2002 086506; заявл. 05.08.2002; опубл. 15.04.2003, Бюл. № 4.
42. Пат. № 89445 Україна, В61Н 7/00. Магніторейкова гальмівна система шахтного локомотива (варіанти) / В. В. Процив (Україна); заявник і патентовласник В. В. Процив – № а 2008 06382; заявл. 13.05.2008; опубл. 25.01.2010, Бюл. № 2.

43. Поляков Н. С. Допуски по уширению колеи в прямых участках шахтного рельсового пути / Н. С. Поляков, В. В. Говоруха, Е. Е. Новиков // Уголь, 1969. – № 10, – С. 54 – 55.
44. Постоянные магниты: справочник ; под ред. Ю. М. Пятина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 460 с.
45. Правила безпеки у вугільних шахтах. НПАОП 10.0-1.01-10. – К.: Ред. журн. «Охорона праці», 2010. – 430 с.
46. Процив В. В. Влияние потерь энергии при взаимодействии колеса и рельса на КПД электровоза / В. В. Процив // Горн. электромеханика и автоматика : респ. межвед. научн.-техн. сб. – 1988. – Вып. 53. – С. 64 – 70.
47. Процив В. В. Моделирование торможения шахтного поезда на заданном участке пути: монография / В. В. Процив. – Д.: Национальный горный университет, 2011. – 208 с.
48. Процив В. В. Определение динамических характеристик ходовой части шахтного локомотива с рельсовым тормозом в переходных режимах / В. В. Процив // Разработка рудных месторождений. – 2004. – Вып. 86. – С. 128 – 130.
49. Процив В. В. Определение распределения температур в гравитационном рельсовом тормозе шахтного локомотива / В. В. Процив // Збірник наукових праць НГУ. – 2005. – № 21. – С. 151 – 155.
50. Процив В. В. Оптимизация параметров тормозной системы и ходовой части шахтного локомотива для повышения безопасности движения / В. В. Процив // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2005». – Д.: Національний гірничий університет, 2005. – Т. 3. – С. 264 – 268.
51. Процив В. В. Устойчивость движения локомотива на закруглениях шахтных рельсовых путей / В. В. Процив // Известия вузов: Горный журнал. – 1992. – № 7. – С. 64 – 69.
52. Процив В. В. Реализация силы тяги шахтным локомотивом на кривой и выбор параметров системы подвешивания ходовой части: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.06 «Горные машины» / В. В. Процив. – Д., 1990. – 204 с.
53. Процив В. В. Визначення гальмівної сили магніторейкового гальма на довгих нерівностях рейкової колії / В. В. Процив // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2009. – № 2 (21). – С. 76 – 80.
54. Процив В. В. Визначення динамічних характеристик ходової частини шахтного локомотива з рейковим гальмом у перехідних режимах / В. В. Процив // Матеріали міжнародної конференції «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості – 2005». – Кривий Ріг: Криворізький технічний університет, 2004. – Т. 2. – С. 109 – 112.
55. Процив В. В. Визначення раціональної довжини секції складового рейкового магнітного гальма / В. В. Процив // Збірник наукових праць НГУ. – 2008. – № 30. – С. 102 – 111.
56. Процив В. В. Вплив локальних нерівностей колії на гальмування пристроями з обмеженим фрикційним моментом на колесі / В. В. Процив // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 7 – 8. – С. 73 – 78.

57. Проців В. В. Ослаблення гальмівної сили магніторейкового гальма на одиничних нерівностях рейкової колії / В. В. Проців // Вібрація в техніці та технологіях. – Вінниця: ВДАУ. – 2010. – № 1 (57). – С. 49 – 54.
58. Проців В. В. Перевірка адекватності динамічної моделі руху шахтного поїзда положенням класичної механіки / В. В. Проців // Збірник наукових праць НГУ. – 2010. – № 35. – Т. 1. – С. 82 – 91.
59. Проців В. В. Порівняльні дослідження дискових осьових та трансмісійних гальм шахтного локомотива / В. В. Проців, А. Г. Моня, О. Є. Гончар // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 4. – С. 98 – 100.
60. Проців В. В. Розробка і обґрунтування використання нових матеріалів для створення магніторейкових гальм / В. В. Проців // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнар. зб. наук. праць ДонНТУ. – 2010. – Вип. 39. – С. 167 – 173.
61. Проців В. В. Формування динамічної моделі шахтного шарнірно-зчленованого локомотива, що рухається в режимі гальмування / В. В. Проців // Науковий вісник НГУ. – 2009. – № 4. – С. 76 – 83.
62. Проців В. В. Вплив підсипання піску на реалізацію гальмівної сили гравітаційним рейковим гальмом / В. В. Проців // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнар. зб. наук. праць ДонНТУ. – 2008. – Вип. 36. – С. 171 – 180.
63. Ренгевич А. А. Испытания электромагнитного рельсового тормоза / А. А. Ренгевич, В. В. Климов // Вопросы рудничного транспорта. – М.: Углетехиздат, 1957. – Вып. 2. – С. 259 – 273.
64. Ренгевич А. А. Исследование работы рудничных поездов на тяжелых профилях откаточных путей : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05-174 «Рудничный транспорт» / А. А. Ренгевич. – Д., 1950. – 24 с.
65. Ренгевич А. А. О применении электромагнитных рельсовых тормозов для увеличения тормозной силы рудничных поездов при откате по выработкам с тяжелым профилем пути / А. А. Ренгевич // Горная механика и машиностроение: Известия Днепропетровского горн. ин-та. – Д., 1952. – Т. 21. – С. 94 – 97.
66. Ренгевич А. А. Основы теории тяги рудничных поездов / А. А. Ренгевич. – К.: УМК ВО, 1989. – 40 с.
67. Ренгевич А. А. Расчет и конструирование электромагнитного рельсового тормоза для рудничных электровозов / А. А. Ренгевич, В. А. Мурзин // Вопросы рудничного транспорта. – М.: Углетехиздат, 1957. – Вып. 2. – С. 274 – 301.
68. Ренгевич А. А. Результаты работ и направления дальнейших исследований по совершенствованию тормозной системы рудничных электровозов и поездов / А. А. Ренгевич // Транспортные и горные машины. – К.: Наук. думка, 1984. – С. 9 – 12.
69. Ренгевич А. А. Тормозная платформа с электромагнитными рельсовыми тормозами / А. А. Ренгевич // Горные машины и автоматика. – М.: Недра, 1969. – Вып. 9. – С. 57 – 60.

70. Ренгевич А. А. Эффективность торможения поездов рудничными электровозами / А. А. Ренгевич, В. В. Климов // Вопросы рудничного транспорта. – М.: Углетехиздат, 1961. – Вып. 5. – С. 278 – 279.
71. Рогов Е.И. Расчет электромагнитных рельсовых тормозов для рудничных локомотивов / Е. И. Рогов // Горные машины и автоматика. – 1961. – № 4. – С. 53 – 57.
72. Салов В. А. Оценка теплового режима магниторельсового тормоза / В. А. Салов, В. А. Сердюк // Науковий вісник НГА України. – 1998. – № 2. – С. 60 – 61.
73. Салов В. А. Повышение тяговой и тормозной способности шахтного подвижного состава с помощью магнитных устройств / В. А. Салов // Известия вузов: Горный журнал. – 1990. – № 2. – С. 77 – 80.
74. Салов В. А. Рельсовые тормоза на постоянных магнитах / В. А. Салов, В. Н. Дорожкин // Промышленный транспорт. – 1987. – № 7. – С. 42 – 48.
75. Салов В. А. Исследование рельсовых электромагнитных тормозов для шахтного подвижного состава : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05-174 «Рудничный транспорт» / В. А. Салов. – Д., 1972. – 20 с.
76. Салов В.А. Определение магнитного поля в рабочем зазоре секционного рельсового тормоза / В. А. Салов, В. А. Сердюк // Науковий вісник НГА України. – 2000. – № 2. – С. 56 – 58.
77. Салов В.А. Определение рациональных параметров рельсового тормоза / В. А. Салов, В. А. Сердюк, А. В. Ильчаков // Тез. докл. X международной конф. «Проблемы механики железнодорожного транспорта» ДИИТ, Днепропетровск, – 2000. – С. 194–195.
78. Салов В.А. Определение рациональных параметров рельсового тормоза / В. А. Салов, В. А. Сердюк, А. В. Ильчаков // тез. докл. X международной конф. «Проблемы механики железнодорожного транспорта». – Д.: ДГТУЖТ (ДИИТ), 2000. – С. 194 – 195.
79. Сердюк А. А. Научное обоснование технических решений по повышению ходовых характеристик шахтных локомотивов : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.05.06 «Горные машины» / А. А. Сердюк. – Д., 2000. – 350 с.
80. Сердюк А. А. Определение бокового скольжения и коэффициента сцепления шахтного локомотива на криволинейных участках рельсового пути с учетом наличия промежуточной среды / А. А. Сердюк, В. В. Литвин, В. В. Процив // Разработка рудных месторождений. – 2005. – Вып. 88. – С. 253 – 257.
81. Сердюк А. А. Определение параметров подвешивания рельсового тормоза шахтного локомотива / А. А. Сердюк, В. В. Процив // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журнал) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2003. – № 10. – С. 208 – 210.
82. Сердюк В. А. Динамика секционного рельсового тормоза / В. А. Сердюк // Науковий вісник НГА України. 1998. – №3. – С. 43 – 44.

83. Сердюк В. А. Определение магнитного поля при взаимодействии секции рельсового тормоза с рельсом / В. А. Сердюк // Науковий вісник НГА України. – 1999. – № 2. – С. 80 – 81.
84. Сердюк В. А. Фрикционные характеристики рельсового тормоза шахтного локомотива / В. А. Сердюк // Сборник научных трудов НГА Украины. – 2004. – № 11. – С. 231 – 233.
85. Серов Д. И. Исследование характеристик рельсовых электромагнитных тормозов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05-174 «Рудничный транспорт» / Д. И. Серов. – М., МЭИ, 1950. – 20 с.
86. Справочник по шахтному транспорту ; под ред. Г. Я. Пейсаховича и И. П. Ремизова. – М.: Недра, 1977. – 624 с.
87. Транспорт шахтний локомотивний. Перевезення людей і вантажів в виробках з ухилом колії від 0,005 до 0,050: СОУ 10.1.001.85790.007:2006. – Затв. Мивуглепромом України 06.10.2006. – Вид. офіц. – К. 2006. – 47 с.
88. Тюрин В. П. Исследования рельсовых электромагнитных тормозов трамвая : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05-174 «Рудничный транспорт» / В. П. Тюрин. – М.: АКХ им. Памфилова, 1965. – 20 с.
89. Шахтный кабельный электровоз / В. А. Салов, В. Н. Дорожкин, В. В. Процив и др. // Пром. трансп. – 1986. – № 6. – С. 7 – 8.
90. Широков Г. М. Исследование рельсовых электромагнитных тормозов с продольным замыканием магнитного потока для рудничных электровозов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.22.12 «Рудничный транспорт» / Г. М. Широков. – Д., 1975. – 18 с.
91. Шляхов Н. С. Исследование рельсовых тормозов для высокоскоростного подвижного состава : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.22.07 «Подвижной состав и тяга поездов» / Н. С. Шляхов. – Ростов-на-Дону, 1974. – 20 с.
92. Штокман И. Г. Основы создания магнитных транспортных установок / И. Г. Штокман. – М.: Недра, 1972. – 192 с.
93. Epping G. Die Zugbremsung unter Toge und die Ausführung der Bremsen von Grubenlokomotiven / G. Epping // Glückauf. – 1954. – № 41/42.
94. Magnets safety brakes for mine cars utilized on “ropehaul” systems // Mining Equipt. News. – 1966. – № 2. – P. 32 – 37.

## Приложение А

### Листинг файла *3DKP.nb*

Clear Output

Quit Kernel

Remove

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ (ТРЕХМЕРНАЯ) МОДЕЛЬ ТОРМОЖЕНИЯ ШАХТНОГО ПОЕЗДА

### ■ Определение системы уравнений

© Protsiv Gonchar , 2010 ;

Remove["Global`\*"]

SetAttributes[Subscript, HoldFirst];

$M[inj\_]$  := ToExpression[StringJoin[Map[ToString, {inj}]]]

$$\begin{aligned}
 T_x = & \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^2 \left( \left( m_i + \frac{m_k}{2} \right) - \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{M[i,n,j]} \right) (x_i'[t])^2 + \right. \\
 & \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{M[i,n,j]} (x_{M[i,n,j]}'[t])^2 + \sum_{i=1}^2 I_{M[t,i]} \left( \frac{\varphi_{M[t,i]}'[t]}{u_t} \right)^2 + \\
 & \left. \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 I_{M[y,i,n]} (\varphi_{M[i,n]}'[t])^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 I_{M[y,i,n,j]} (\varphi_{M[i,n,j]}'[t])^2 \right) + \frac{1}{2} m_c (x_c'[t])^2; \\
 T_z = & \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^2 \left( \left( m_i + \frac{m_k}{2} \right) - \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{M[i,n,j]} \right) (z_i'[t])^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{M[i,n,j]} (z_{M[i,n,j]}'[t])^2 + \right. \\
 & \sum_{i=1}^2 I_{M[y,i]} (\varphi_i'[t])^2 + I_{y_k} \partial_t \text{ArcSin} \left[ \frac{z_2[t] - z_1[t]}{s_k} \right] + \sum_{i=1}^2 I_{M[x,i]} (\theta_i'[t])^2 + \\
 & I_{x_k} (\theta_i'[t])^2 + \sum_{i=1}^2 I_{M[z,i]} (\psi_i'[t])^2 + I_{z_k} \partial_t \text{ArcSin} \left[ \frac{y_2[t] - y_1[t]}{s_k} \right] + \\
 & \left. \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 I_{M[z,i,n]} (\psi_{M[i,n]}'[t])^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{oz} (z_{M[o,i,n,j]}'[t])^2 \right) + \frac{1}{2} m_c (z_c'[t])^2; \\
 T_y = & \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^2 \left( \left( m_i + \frac{m_k}{2} \right) - \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{M[i,n,j]} \right) (-y_i'[t])^2 + I_{z_k} \frac{(\sum_{i=1}^2 x_i'[t])^2}{4 R_k[t]^2} + \sum_{i=1}^2 I_{M[z,i]} \frac{(x_i'[t])^2}{R_i[t]^2} + \right. \\
 & I_{z_B} \frac{(x_c'[t])^2}{R_B[t]^2} + I_{y_k} \frac{(\sum_{i=1}^2 x_i'[t])^2}{4 R_{M[p,k]}[t]^2} + \sum_{i=1}^2 I_{M[y,i]} \frac{(x_i'[t])^2}{R_{M[p,i]}[t]^2} + I_{y_B} \frac{(x_c'[t])^2}{R_{M[p,B]}[t]^2} + \\
 & \left. I_{x_k} \frac{(i_{M[s,i]}'[t])^2}{(r + h_k + h_{cs})^2} + \sum_{i=1}^2 I_{M[x,i]} \frac{(i_{M[s,i]}'[t])^2}{(r + h_{ct})^2} + n_B I_{x_B} \frac{(i_{M[s,B]}'[t])^2}{h_{cB}^2} + \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left( m_k (i_{M[s,1]} [t])^2 + \sum_{i=1}^2 m_i (i_{M[s,i]} [t])^2 + m_c (i_{M[s,\beta]} [t])^2 \right) + \\
& \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 m_{M[i,n]} (Y_{M[i,n]} [t])^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{oy} (Y_{M[o,i,n,j]} [t])^2 + \frac{1}{2} m_c (Y_c [t])^2; \\
T_{xp} = & \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_g x_{M[g,i,j]} [t]^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 m_m x_{M[m,i,j,m]} [t]^2 \right); \\
T_{zp} = & \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_g z_{M[g,i,j]} [t]^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 m_m z_{M[m,i,j,m]} [t]^2 + \right. \\
& \left. \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{oz} z_{M[og,i,j]} [t]^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 m_{oz} z_{M[om,i,j,m]} [t]^2 \right); \\
T_{yp} = & \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_g Y_{M[g,i,j]} [t]^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 m_m Y_{M[m,i,j,m]} [t]^2 + \right. \\
& \left. \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{oy} Y_{M[og,i,j]} [t]^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 m_{oy} Y_{M[om,i,j,m]} [t]^2 \right); \\
\Pi_x = & \frac{1}{2} \left( c_x \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 (x_i [t] - x_{M[i,n,j]} [t])^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 c_{M[\varphi,i,n]} \left( \varphi_{M[i,n]} [t] - \frac{\varphi_{M[\ell,i]} [t]}{u_t} \right)^2 + \right. \\
& \left. \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 c_{M[\varphi,i,n,j]} (\varphi_{M[i,n,j]} [t] - \varphi_{M[i,n]} [t])^2 \right) + \\
& \sum_{i=1}^2 \left( \left( m_i + \frac{m_k}{2} \right) g_0 x_i [t] \text{Sin}[\text{ArcTan}[i_{M[p,i]} [t]]] \right) + m_c g_0 x_c [t] \text{Sin}[\text{ArcTan}[i_{p\beta} [t]]] + \\
& \frac{1}{2} c_{cx} (x_2 [t] - x_c [t])^2 + \frac{1}{2} c_k (x_2 [t] - x_1 [t])^2; \\
\Pi_z = & \frac{1}{2} \left( c_z \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left( \frac{\sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 G_{M[i,n,j,0]}}{c_z} - z_i [t] - \right. \right. \\
& \left. \left. (-1)^n \text{Tan}[\varphi_i [t]] \frac{a_p}{2 u_p} + (-1)^j \text{Tan}[\vartheta_i [t]] \frac{b_p}{2 u_p} + \left( \frac{\sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 G_{M[i,n,j,0]}}{c_z} - \right. \right. \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left( \frac{\sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 G_{M[i,n,j,0]}}{c_z} \left( \frac{\sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 G_{M[i,n,j,0]}}{c_z} - 2 \left( \frac{(a_p)^2 + (b_p)^2}{2} (1 - \cos[\psi_i[t]]) \right) \right. \right. \\
& \quad \left. \left. \cos \left[ \frac{1}{2} (-3 + 3j + 3n - 2jn) \pi + (-1)^{j+n} \left( \text{ArcTan} \left[ \frac{b_p}{a_p} - \frac{\psi_i[t]}{2} \right] \right) \right] \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{(a_p)^2 + (b_p)^2}{2} (1 - \cos[\psi_i[t]]) \right)^{\frac{1}{2}} \Bigg)^2 + \\
& \quad \left. c_z \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 z_{M[i,n,j]} [t]^2 + c_{oz} \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 z_{M[0,i,n,j]} [t]^2 \right) + \frac{1}{2} c_{cz} (z_2[t] - z_c[t])^2; \\
\Pi_y = & \frac{1}{2} \left( c_y \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-Y_i[t] (*-Y_{M[i,n,j]} [t]*))^2 + c_{oy} \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 Y_{M[0,i,n,j]} [t]^2 \right) - \\
& \sum_{i=1}^2 \left( \left( m_i + \frac{m_k}{2} \right) g_0 Y_i[t] \sin[\text{ArcTan}[i_{M[s,i]} [t]]] - \right. \\
& \left. \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 m_{M[i,n]} g_0 Y_{M[i,n]} [t] \sin[\text{ArcTan}[i_{M[s,i,n]} [t]]] + \frac{1}{2} c_{cy} (Y_2[t] - Y_c[t])^2 \right); \\
\Pi_{xp} = & \frac{1}{2} \left( c_{xg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (x_i[t] - x_{M[g,i,j]} [t])^2 + c_{xm} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (x_i[t] - x_{M[m,i,j,m]} [t])^2 \right); \\
\Pi_{zp} = & \frac{1}{2} \left( c_{zg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (z_i[t] - z_{M[g,i,j]} [t])^2 + c_{zm} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (z_i[t] - z_{M[m,i,j,m]} [t])^2 + \right. \\
& \left. c_{oz} \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 z_{M[0g,i,j]} [t]^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 z_{M[0m,i,j,m]} [t]^2 \right) \right); \\
\Pi_{yp} = & \frac{1}{2} \left( c_{yg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (Y_i[t] - Y_{M[g,i,j]} [t])^2 + c_{ym} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (Y_i[t] - Y_{M[m,i,j,m]} [t])^2 + \right. \\
& \left. c_{oy} \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 Y_{M[0g,i,j]} [t]^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 Y_{M[0m,i,j,m]} [t]^2 \right) \right); \\
\Phi_x = & \frac{1}{2} \left( \beta_x \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 (x_i'[t] - x_{M[i,n,j]}'[t])^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \beta_{M[\varphi,i,n]} \left( \varphi_{M[i,n]}'[t] - \frac{\varphi_{M[t,i]}'[t]}{u_t} \right)^2 + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 \beta_{M[\varphi, i, n, j]} \left( \varphi_{M[i, n, j]}' [t] - \varphi_{M[i, n]}' [t] \right)^2 \right\} + \\
& \frac{1}{2} \beta_{cx} (x_2' [t] - x_c' [t])^2 + \frac{1}{2} \beta_k (x_2' [t] - x_1' [t])^2; \\
\Phi_z = & \frac{1}{2} \left( \beta_z \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 (z_i' [t] + z_{M[i, n, j]}' [t])^2 + \beta_x \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \left( z_i' [t] - \partial_t \left( (-1)^n \text{Tan}[\varphi_i [t]] \frac{a_p}{2 u_p} \right) \right)^2 + \right. \\
& \left. \beta_z \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left( z_i' [t] - \partial_t \left( (-1)^j \text{Tan}[\theta_i [t]] \frac{b_p}{2 u_p} \right) \right)^2 + \beta_{oz} \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 z_{M[o, i, n, j]}' [t]^2 \right) + \\
& \frac{1}{2} \beta_{kzyx} \sum_{i=1}^2 \left( (\theta_i' [t] - i_{M[s, i]}' [t])^2 + (\varphi_i' [t] - i_{M[p, i]}' [t])^2 + (\psi_i' [t])^2 \right) + \\
& \frac{1}{2} \beta_{cz} (z_2' [t] - z_c' [t])^2; \\
\Phi_y = & \frac{1}{2} \left( \beta_y \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 (y_i' [t] - y_{M[i, n]}' [t])^2 + \beta_{oy} \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{j=1}^2 y_{M[o, i, n, j]}' [t]^2 \right) + \\
& \frac{1}{2} \beta_{cy} (y_2' [t] - y_c' [t])^2; \\
\Phi_{xp} = & \frac{1}{2} \left( \beta_{xg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (x_i' [t] - x_{M[g, i, j]}' [t])^2 + \beta_{xm} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (x_i' [t] - x_{M[m, i, j, m]}' [t])^2 \right); \\
\Phi_{zp} = & \frac{1}{2} \left( \beta_{zg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (z_i' [t] - z_{M[g, i, j]}' [t])^2 + \beta_{zm} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (z_i' [t] - z_{M[m, i, j, m]}' [t])^2 + \right. \\
& \left. \beta_{oz} \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 z_{M[og, i, j]}' [t]^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 z_{M[om, i, j, m]}' [t]^2 \right) \right); \\
\Phi_{yp} = & \frac{1}{2} \left( \beta_{yg} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (y_i' [t] - y_{M[g, i, j]}' [t])^2 + \beta_{ym} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 (y_i' [t] - y_{M[m, i, j, m]}' [t])^2 + \right. \\
& \left. \beta_{oy} \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 y_{M[og, i, j]}' [t]^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^3 y_{M[om, i, j, m]}' [t]^2 \right) \right);
\end{aligned}$$

Table[ $Q_{x_i} = 0, \{i, 2\}$ ];

Table[ $Q_{x_{M[i, n, j]}} = (-F_{M[i, n, j]} [t] - W_{M[x, i, n, j]} [t] - W_{M[p, i, n, j]} [t] - Y_{M[i, n, j]} [t] \text{Sin}[y_{M[i, n, j]} [t]]) \text{Cos}[\theta_{M[i, n]} [t]]$ ,  $\{i, 2\}$ ,  $\{n, 2\}$ ,  $\{j, 2\}$ ];

Table[ $Q_{\varphi_{M[i, i]}} = -M_{M[i, i]} [t] - M_{M[d, i]} [t]$ ,  $\{i, 2\}$ ];

Table[ $Q_{\varphi_{M[i, n]}} = -M_{M[d, i, n]} [t]$ ,  $\{i, 2\}$ ,  $\{n, 2\}$ ];

Table[ $Q_{\varphi_{M[i, n, j]}} = r (F_{M[i, n, j]} [t] + W_{M[x, i, n, j]} [t]) - M_{M[s, i, n, j]} [t]$ ,  $\{i, 2\}$ ,  $\{n, 2\}$ ,  $\{j, 2\}$ ];

$Q_{x_c} = m_c (-w_{\theta} - w_{M[\theta R]} [t])$ ;

$Q_{z_c} = 0$ ;

```

Qyc = 0;
Table[Qzi = 0, {i, 2}];
Table[QzM[i,n,j] = GM[i,n,j][t] - NM[i,n,j][t], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
Table[QzM[o,i,n,j] = NM[i,n,j][t], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
Table[Qθi = 0, {i, 2}];
Table[Qφi = 0, {i, 2}];
Table[Qψi = 0, {i, 2}];
Table[Qγi = 0, {i, 2}];
Table[QψM[i,n] = 0, {i, 2}, {n, 2}];
Table[QγM[i,n] = (YM[i,n,j][t] Cos[γM[i,n,j][t]] - WM[y,i,n,j][t] + PM[i,n,j][t]) Cos[θM[i,n][t]],
{i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
Table[QγM[o,i,n,j] = -(YM[i,n,j][t] Cos[γM[i,n,j][t]] - WM[y,i,n,j][t] + PM[i,n,j][t]) Cos[θM[i,n][t]],
{i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
Table[QxM[g,i,j] = -FM[g,i,j][t], {i, 2}, {j, 2}];
Table[QxM[n,i,j,m] = -ZM[i,j,m][t] FM[n,i,j,m][t], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];
Table[QzM[g,i,j] = -(mi +  $\frac{m_k}{2}$ ) g0
( $\frac{1}{2}$  Cos[ArcTan[iM[sg,i,j][t]]] + (-1)j Sin[ArcTan[iM[sg,i,j][t]]]  $\frac{h_{ct} + r}{s_{M}[pg,i,j][t]}$ )
(1 - kM[g,i,j][t]), {i, 2}, {j, 2}];
Table[QzM[n,i,j,m] = -ZM[i,j,m][t] FM[n,i,j,m][t], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];
Table[QzM[op,i,j] =
(mi +  $\frac{m_k}{2}$ ) g0 ( $\frac{1}{2}$  Cos[ArcTan[iM[sg,i,j][t]]] + (-1)j Sin[ArcTan[iM[sg,i,j][t]]]  $\frac{h_{ct} + r}{s_{M}[pg,i,j][t]}$ )
(1 - kM[g,i,j][t]), {i, 2}, {j, 2}];
Table[QzM[om,i,j,m] = ZM[i,j,m][t] FM[n,i,j,m][t], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];
Table[QyM[g,i,j] = WM[yg,i,j][t], {i, 2}, {j, 2}];
Table[QyM[n,i,j,m] = WM[ym,i,j,m][t], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];
Table[QyM[op,i,j] = -WM[yg,i,j][t], {i, 2}, {j, 2}];
Table[QyM[om,i,j,m] = -WM[ym,i,j,m][t], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];

Πz = Collect[Πz, Sqrt[_]];

T = Sum[Taxis, {axis, {x, y, z, xp, yp, zp}}];
Π = Sum[Πaxis, {axis, {x, y, z, xp, yp, zp}}];
Φ = Sum[Φaxis, {axis, {x, y, z, xp, yp, zp}}];

conditions = Flatten[{
Table[xinj[0] == 0, {inj, {c, 1, 111, 112, 121, 122, 2, 211, 212, 221, 222}}],
Table[zinj[0] == 0, {inj, {111, 112, 121, 122, 211, 212, 221, 222}}],
Table[zinj[0] == 0, {inj, {c, 1, 2}}],
Table[zinj[0] == 0, {inj, {o111, o112, o121, o122, o211, o212, o221, o222}}],

```

```

Table[Yinj[0] == 0, {inj, {c, 1, 11, 12, 2, 21, 22}}],
Table[Yinj[0] == 0, {inj, {o111, o112, o121, o122, o211, o212, o221, o222}}],
Table[φinj[0] == 0,
  {inj, {t1, t2, 1, 11, 12, 111, 112, 121, 122, 2, 21, 22, 211, 212, 221, 222}}],
Table[ψinj[0] == 0, {inj, {1, 11, 12, 2, 21, 22}}],
Table[θinj[0] == 0, {inj, {1, 2}}],
Table[xinj'[0] == V0, {inj, {c, 1, 111, 112, 121, 122, 2, 211, 212, 221, 222}}],
Table[zinj'[0] == 0, {inj, {c, 1, 111, 112, 121, 122, 2, 211, 212, 221, 222}}],
Table[zinj'[0] == 0, {inj, {o111, o112, o121, o122, o211, o212, o221, o222}}],
Table[yinj'[0] == 0, {inj, {c, 1, 11, 12, 2, 21, 22}}],
Table[Yinj'[0] == 0, {inj, {o111, o112, o121, o122, o211, o212, o221, o222}}],
Table[φinj'[0] ==  $\frac{V0}{r}$  ur, {inj, {t1, t2}}],
Table[φinj'[0] == 0, {inj, {1, 2}}],
Table[φinj'[0] ==  $\frac{V0}{r}$ ,
  {inj, {11, 12, 111, 112, 121, 122, 21, 22, 211, 212, 221, 222}}],
Table[ψinj'[0] == 0, {inj, {1, 11, 12, 2, 21, 22}}],
Table[θinj'[0] == 0, {inj, {1, 2}}],
Table[xM[g,i,j][0] == 0, {i, 2}, {j, 2}],
Table[xM[m,i,j,m][0] == 0, {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[zM[g,i,j][0] == 0, {i, 2}, {j, 2}],
Table[zM[m,i,j,m][0] == 0, {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[zM[og,i,j][0] == 0, {i, 2}, {j, 2}],
Table[zM[om,i,j,m][0] == 0, {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[YM[g,i,j][0] == 0, {i, 2}, {j, 2}],
Table[YM[m,i,j,m][0] == 0, {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[YM[og,i,j][0] == 0, {i, 2}, {j, 2}],
Table[YM[om,i,j,m][0] == 0, {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[xM[g,i,j]'[0] == V0, {i, 2}, {j, 2}],
Table[xM[m,i,j,m]'[0] == V0, {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[zM[g,i,j]'[0] == 0, {i, 2}, {j, 2}],
Table[zM[m,i,j,m]'[0] == 0, {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[zM[og,i,j]'[0] == 0, {i, 2}, {j, 2}],
Table[zM[om,i,j,m]'[0] == 0, {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[YM[g,i,j]'[0] == 0, {i, 2}, {j, 2}],
Table[YM[m,i,j,m]'[0] == 0, {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[YM[og,i,j]'[0] == 0, {i, 2}, {j, 2}],
Table[YM[om,i,j,m]'[0] == 0, {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}]];

fun = Flatten[{
  Table[xinj, {inj, {c, 1, 111, 112, 121, 122, 2, 211, 212, 221, 222}}],

```

```

Table[zinj, {inj, {c, 1, 111, 112, 121, 122, 2, 211, 212, 221, 222}}],
Table[zinj, {inj, {o111, o112, o121, o122, o211, o212, o221, o222}}],
Table[yinj, {inj, {c, 1, 11, 12, 2, 21, 22}}],
Table[yinj, {inj, {o111, o112, o121, o122, o211, o212, o221, o222}}],
Table[φinj,
  {inj, {t1, t2, 1, 11, 12, 111, 112, 121, 122, 2, 21, 22, 211, 212, 221, 222}}],
Table[ψinj, {inj, {1, 11, 12, 2, 21, 22}}],
Table[θinj, {inj, {1, 2}}],
Table[xM[φ,i,j], {i, 2}, {j, 2}],
Table[xM[m,i,j,m], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[zM[φ,i,j], {i, 2}, {j, 2}],
Table[zM[m,i,j,m], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[zM[oφ,i,j], {i, 2}, {j, 2}],
Table[zM[om,i,j,m], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[yM[φ,i,j], {i, 2}, {j, 2}],
Table[yM[m,i,j,m], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[yM[oφ,i,j], {i, 2}, {j, 2}],
Table[yM[om,i,j,m], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}]];

```

```
simpl = 0; tConstr = 1; (* simpl = 1 - apply Simplify,
```

```
simpl = 0 - not apply Simplify *)
```

```
system =
```

```

{Map[If[simpl == 0, # &, TimeConstrained[Simplify[#], tConstr, #] &], Flatten@Join[
  Table[∂t ∂xinj'[t] T - ∂xinj[t] T + ∂xinj[t] Π + ∂xinj'[t] Φ == Qxinj,
    {inj, {c, 1, 111, 112, 121, 122, 2, 211, 212, 221, 222}}],
  Table[∂t ∂zinj'[t] T - ∂zinj[t] T + ∂zinj[t] Π + ∂zinj'[t] Φ == Qzinj,
    {inj, {c, 1, 111, 112, 121, 122, 2, 211, 212, 221, 222}}],
  Table[∂t ∂zinj'[t] T - ∂zinj[t] T + ∂zinj[t] Π + ∂zinj'[t] Φ == Qzinj,
    {inj, {o111, o112, o121, o122, o211, o212, o221, o222}}],
  Table[∂t ∂yinj'[t] T - ∂yinj[t] T + ∂yinj[t] Π + ∂yinj'[t] Φ == Qyinj,
    {inj, {c, 1, 11, 12, 2, 21, 22}}],
  Table[∂t ∂yinj'[t] T - ∂yinj[t] T + ∂yinj[t] Π + ∂yinj'[t] Φ == Qyinj,
    {inj, {o111, o112, o121, o122, o211, o212, o221, o222}}],
  Table[∂t ∂φinj'[t] T - ∂φinj[t] T + ∂φinj[t] Π + ∂φinj'[t] Φ == Qφinj,
    {inj, {t1, t2, 1, 11, 12, 111, 112, 121, 122, 2, 21, 22, 211, 212, 221, 222}}],
  Table[∂t ∂ψinj'[t] T - ∂ψinj[t] T + ∂ψinj[t] Π + ∂ψinj'[t] Φ == Qψinj,
    {inj, {1, 11, 12, 2, 21, 22}}],
  Table[∂t ∂θinj'[t] T - ∂θinj[t] T + ∂θinj[t] Π + ∂θinj'[t] Φ == Qθinj, {inj, {1, 2}}],
  Table[
    ∂t ∂xM[φ,i,j]'[t] T - ∂xM[φ,i,j][t] T + ∂xM[φ,i,j][t] Π + ∂xM[φ,i,j]'[t] Φ == QxM[φ,i,j], {i, 2}, {j, 2}],
    Table[∂t ∂xM[m,i,j,m]'[t] T - ∂xM[m,i,j,m][t] T + ∂xM[m,i,j,m][t] Π + ∂xM[m,i,j,m]'[t] Φ == QxM[m,i,j,m],
      {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
    Table[∂t ∂zM[φ,i,j]'[t] T - ∂zM[φ,i,j][t] T + ∂zM[φ,i,j][t] Π + ∂zM[φ,i,j]'[t] Φ == QzM[φ,i,j],

```

```

    {i, 2}, {j, 2}],
Table[∂t ∂zM[n,i,3,m]'[t] T - ∂zM[n,i,3,m][t] T + ∂zM[n,i,3,m][t] Π + ∂zM[n,i,3,m]'[t] Φ == QzM[n,i,3,m] /
    {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[∂t ∂zM[op,i,3]'[t] T - ∂zM[op,i,3][t] T + ∂zM[op,i,3][t] Π + ∂zM[op,i,3]'[t] Φ == QzM[op,i,3] /
    {i, 2}, {j, 2}],
Table[∂t ∂zM[om,i,3,m]'[t] T - ∂zM[om,i,3,m][t] T + ∂zM[om,i,3,m][t] Π + ∂zM[om,i,3,m]'[t] Φ == QzM[om,i,3,m] /
    {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[∂t ∂yM[φ,i,3]'[t] T - ∂yM[φ,i,3][t] T + ∂yM[φ,i,3][t] Π + ∂yM[φ,i,3]'[t] Φ == QyM[φ,i,3] /
    {i, 2}, {j, 2}],
Table[∂t ∂yM[n,i,3,m]'[t] T - ∂yM[n,i,3,m][t] T + ∂yM[n,i,3,m][t] Π + ∂yM[n,i,3,m]'[t] Φ == QyM[n,i,3,m] /
    {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
Table[∂t ∂yM[op,i,3]'[t] T - ∂yM[op,i,3][t] T + ∂yM[op,i,3][t] Π + ∂yM[op,i,3]'[t] Φ == QyM[op,i,3] /
    {i, 2}, {j, 2}],
Table[∂t ∂yM[om,i,3,m]'[t] T - ∂yM[om,i,3,m][t] T + ∂yM[om,i,3,m][t] Π + ∂yM[om,i,3,m]'[t] Φ == QyM[om,i,3,m] /
    {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}]]], conditions}

```

```
Dimensions /@ {system[[1]], fun, conditions}
```

- Импорт параметров пути

- Функции форматирования графиков

```

imgsize = {{360}, 230};
(*"GOST type A"*)
stylePlot[f_, var_List, xlab_String: "", ylab_String: "",
  lowlab_String: "", plRange_: Full, imgS_: imgsize, (opts___) ? OptionQ] :=
Module[{img = 500, ats = 16, lts = 18, grdThk = 0.5, majorts = 0.012,
  minorts = 0.0065, grd, ticks, dig, reall, prec},
  ticks = FrameTicks /. AbsoluteOptions[Plot[Evaluate[f], var,
    Frame → True,
    PerformanceGoal → "Speed",
    PlotPoints → 10,
    PlotRange → If[plRange === Null, Full, plRange]]] /.
    {{loc_Real, lab_Real, len: {_, _}, sty: {___}} => {loc, lab, {majorts, 0}},
    {loc_Real, lab_String, len: {_, _}, sty: {___}} => {loc, lab, {minorts, 0}}};
  Table[dig = Map[{Length[Nest[If[Last[#] == 0, Most[#], #] &,
    #][[1, ;; -2]], Length[#][[1, ;; -2]]]]] &[
    If[#2 < 0, RealDigits[#1 10^#2], RealDigits[#1]]] &@# &, #2 &@# &,
    MantissaExponent[grd[i] = Cases[ticks[[i, All, 2]], Except[""]] /. -307 → 0];
  reall = Max[dig[[All, 1]] - dig[[All, 2]]]; prec = reall + Max[dig[[All, 2]]];
  If[reall ≤ 0, ticks[[i]] =
    ticks[[i]] /. {loc_Real, lab_Real, len: {_, _}} => {loc, Rationalize[lab, 0], len},
    ticks[[i]] = ticks[[i]] /. {loc_Real, lab_Real, len: {_, _}} =>
    {loc, PaddedForm[lab, {prec, reall}, NumberPoint → "", "], len}}, {i, 2}];
  If[NumberQ[imgS], img = imgS];
  Labeled[
    Plot[Evaluate[f], var, opts,
      Frame → True,
      FrameTicks → ticks,
      FrameStyle →
        {{Directive[FontSize → img / (500 / ats), FontFamily → "Times New Roman",
          AbsoluteThickness[4 grdThk], AbsoluteThickness[grdThk]},
        {Directive[FontSize → img / (500 / ats), FontFamily → "Times New Roman",
          AbsoluteThickness[4 grdThk], AbsoluteThickness[grdThk]}},
      FrameTicksStyle → {{Directive[AbsoluteThickness[3 grdThk]],
        Directive[AbsoluteThickness[grdThk]]}, {Directive[
          AbsoluteThickness[3 grdThk], Directive[AbsoluteThickness[grdThk]]}},
      PlotRangePadding → {{0, 0}, {Scaled[0.001], Scaled[0.001]}},
      AspectRatio → 1 / GoldenRatio,
      GridLines → {grd[1], grd[2]},
      AxesStyle → {AbsoluteThickness[2 grdThk], AbsoluteThickness[2 grdThk]},
      GridLinesStyle → Directive[{Black, Black}, AbsoluteThickness[grdThk]],
      PlotRange → If[plRange === Null, Full, plRange],
      ImageSize → If[imgS === Null, imgsize, imgS],

```

```

PlotStyle → {{Directive[Black, AbsoluteThickness[3 grdThk]]},
  {Directive[Black, Dashing[{0.04, 0.01}], AbsoluteThickness[3 grdThk]]},
  {Directive[Black, Dashing[{0.04, 0.01, 0.005, 0.01}],
    AbsoluteThickness[3 grdThk]}}},
{Text[Style[lowlab, FontSize → img / (500 / lts), Italic,
  FontFamily → "Times New Roman"]],
  Text[Style[xlab, FontSize → img / (500 / lts), FontFamily → "Times New Roman"]],
  Text[Style[ylab, FontSize → img / (500 / lts), FontFamily → "Times New Roman"]]},
{{Bottom, Center}, {Right, Bottom}, {Top, Left}}, FrameMargins → {{1, -5}, {0, -7}}]]

stylePlot[data_List, xlab_String: "", ylab_String: "",
  lowlab_String: "", plRange_: Full, imgS_: imgsize, opts___?OptionQ] :=
Module[{img = 500, ats = 16, lts = 18, grdThk = 0.5, majorts = 0.012,
  minorts = 0.0065, grd, ticks, dig, reall, prec},
  ticks = FrameTicks /. AbsoluteOptions[ListPlot[data,
    Frame → True,
    PerformanceGoal → "Speed",
    MaxPlotPoints → 100,
    PlotRange → If[plRange === Null, Full, plRange]]] /.
    {{loc_Real, lab_Real, len: {_, _}, sty: {___}} ⇒ {loc, lab, {majorts, 0}},
    {loc_Real, lab_String, len: {_, _}, sty: {___}} ⇒ {loc, lab, {minorts, 0}}};
  Table[dig = Map[{Length[Nest[If[Last[#] == 0, Most[#], #] &,
    #][[1, ;; -2]], Length[#][[1, ;; -2]]]]] &[
    If[#2 < 0, RealDigits[#1 10^#2], RealDigits[#1]]] &@# &, #2 &@# &,
    MantissaExponent[grd[i] = Cases[ticks[[i, All, 2]], Except[""]] /. -307 → 0];
  reall = Max[dig[[All, 1]] - dig[[All, 2]]]; prec = reall + Max[dig[[All, 2]]];
  If[reall ≤ 0, ticks[[i]] =
    ticks[[i]] /. {loc_Real, lab_Real, len: {_, _}} ⇒ {loc, Rationalize[lab, 0], len},
    ticks[[i]] = ticks[[i]] /. {loc_Real, lab_Real, len: {_, _}} ⇒
    {loc, PaddedForm[lab, {prec, reall}, NumberPoint → ", ", len]}, {i, 2}];
  If[NumberQ[imgS], img = imgS];
  Labeled[
  ListPlot[data, opts,
    Joined → True,
    Frame → True,
    FrameTicks → ticks,
    PlotRangePadding → {{0, 0}, {Scaled[0.001], Scaled[0.001]}},
    AspectRatio → 1 / GoldenRatio,
    FrameTicksStyle →
    {{Directive[AbsoluteThickness[3 grdThk]], Directive[AbsoluteThickness[grdThk]]},
    {Directive[AbsoluteThickness[3 grdThk]],
    Directive[AbsoluteThickness[grdThk]}}},
  FrameStyle → {{Directive[FontSize → img / (500 / ats), FontFamily → "Times New Roman",
    AbsoluteThickness[4 grdThk]], AbsoluteThickness[grdThk]},
    {Directive[FontSize → img / (500 / ats), FontFamily → "Times New Roman",
    AbsoluteThickness[4 grdThk]], AbsoluteThickness[grdThk]}},
  GridLines → {grd[1], grd[2]},
  AxesStyle → {AbsoluteThickness[2 grdThk], AbsoluteThickness[2 grdThk]},

```

```

GridLinesStyle → Directive[{Black, Black}, AbsoluteThickness[grdThk]],
PlotRange → If[plRange == Null, Full, plRange],
ImageSize → If[imgS == Null, imgsize, imgS],
PlotStyle → {{Directive[Black, AbsoluteThickness[3 grdThk]],
  {Directive[Black, Dashing[{0.04, 0.01}], AbsoluteThickness[3 grdThk]]},
  {Directive[Black, Dashing[{0.04, 0.01, 0.005, 0.01}],
    AbsoluteThickness[3 grdThk]}}},
{Text[Style[lowlab, FontSize → img / (500 / lts), Italic,
  FontFamily → "Times New Roman"]],
  Text[Style[xlab, FontSize → img / (500 / lts), FontFamily → "Times New Roman"]],
  Text[Style[ylab, FontSize → img / (500 / lts), FontFamily → "Times New Roman"]]},
{{Bottom, Center}, {Right, Bottom}, {Top, Left}}, FrameMargins → {{1, -5}, {0, -7}}]
correct[y_] := If[Chop[y /. t → 0.] == 0.,
  Module[{max}, max = NMaximize[{y, 0 ≤ t ≤ te}, t, WorkingPrecision → 6];
  Piecewise[{{y, 0 ≤ t ≤ max[[2, 1, 2]]}, {max[[1]], max[[2, 1, 2]] < t ≤ te}]],
  Module[{min}, min = NMinimize[{Abs[y], 0 ≤ t ≤ te}, t, WorkingPrecision → 6];
  If[min[[1]] > 0.01, y,
    Piecewise[{{y, 0 ≤ t ≤ min[[2, 1, 2]]}, {min[[1]], min[[2, 1, 2]] < t ≤ te}]]]]
asC[y_] := Map[correct, Flatten[{y}]]

```

#### ■ Импорт

```

(*Импорт параметров пути из файла*)
fileName = "Path parameters.xls";
fileNameetxt = "Path_parameters.txt";
SetDirectory[NotebookDirectory[]]

(*Импорт из Excel*)
cellMax = 134; sMax = 0.75 (cellMax - 4);
(*Максимальное число обрабатываемых строчек ехел файла*)
data = N[Table[
  ToExpression[Import[fileName, {"Data", 2, Range[4, cellMax], i}], {i, 2, 18}]];
(*экспорт в txt / для ускорения дальнейшего считывания
  Export["Path_parameters.txt", data, "Table"];*)

(*Импорт txt
  data=Import[fileNameetxt,"Data"];*)

disi[S_, S0_, dS_, hA_] := 
$$\frac{\text{ArcTan}\left[\frac{hA}{10^3 s_p[S]}\right]}{2} \left( \cos\left[\frac{(S - S0)}{dS} \pi\right] + 1 \right);$$

dis[datai_, S_, dS_] :=
  Piecewise[Table[{disi[S, data[[1, #[[i]]]] + datai[[#[[i]], 2]],
    dS, datai[[#[[i]], 1]]}, data[[1, #[[i]]]] + datai[[#[[i]], 2]] ≤
    S ≤ data[[1, #[[i]]]] + datai[[#[[i]], 2]] + dS},
  {i, Length[#]}] &[Flatten@Position[datai, _List]];

```

```

funpath[a_, b_, dx_] := Module[{h, h2, h3, h4},
  h = Flatten@Position[b, _List];
  (*определение порядковых номеров вещественных чисел в массивах*)
  If[ListQ[dx],
    h2 = Transpose[{Table[a[[i]] + b[[i, 2]] + First@dx * b[[i, 1]], {i, h}],
      Table[b[[i, 1]], {i, h}]}],
    h2 = Transpose[{Table[a[[i]] + b[[i, 2]] + dx, {i, h}], Table[b[[i, 1]], {i, h}]}];
  (*отступ справа*)
  h3 = Transpose[{Table[a[[i]] + b[[i, 2]] - 10-10, {i, h}], ConstantArray[0, Length[h]}];
  (*отступ слева*)
  h4 = Table[{a[[i]] + b[[i, 2]], b[[i, 1]], {i, h}}; (*основные, без Null*)
  Join[{First[a] - 10-10, 0}, h4, h2, h3, {Last[a] + 10-10, 0}]]];

dS = 0.050; dψ = 1.5;

(*Интерполяция*)
{R, sp, is0, ip} = Table[Interpolation[
  Transpose[{data[[1]], data[[i]]}], InterpolationOrder → 4], {i, 2, 5}];
{hℒ, hℛ, lfℒ, lfℛ, ldℒ, ldℛ} = Table[Interpolation[funpath[data[[1]], data[[i]], dS],
  InterpolationOrder → 0], {i, 6, 11}];
{ψℒ, ψℛ} = Table[Interpolation[funpath[data[[1]], data[[i]], dψ],
  InterpolationOrder → 0], {i, {12, 13}}];
{Hℒ, Hℛ} = Table[Interpolation[funpath[data[[1]], data[[i]], dS],
  InterpolationOrder → 0], {i, 14, 15}];
{Rdℒ, Rdℛ} = Table[Interpolation[funpath[data[[1]], data[[i]], {1/5}],
  InterpolationOrder → 0], {i, 16, 17}];
is[S_] := Evaluate[is0[S] + dis[data[[6]], S, dS] - dis[data[[7]], S, dS]];
isLR[S_] := Evaluate[dis[data[[6]], S, dS] + dis[data[[7]], S, dS]];

Clear[T, Π, Φ, data, filePath, funpath]
ppoints = 3000;
pr = Plot[R[S], {S, 0, sMax}, Frame → True, GridLines → Automatic];
psp = Plot[sp[S], {S, 0, sMax}, Frame → True, GridLines → Automatic];
pis = Plot[is[S], {S, 0, sMax},
  PlotPoints → ppoints / 2, Frame → True, GridLines → Automatic];
pip = Plot[ip[S], {S, 0, sMax}, PlotPoints → ppoints / 2,
  Frame → True, GridLines → Automatic];
Show[GraphicsRow[{pr, psp, pis, pip}, ImageSize → 750]]
phl = Plot[hℒ[S], {S, 0, sMax},
  PlotPoints → ppoints / 3, Frame → True, GridLines → Automatic];
phr = Plot[hℛ[S], {S, 0, sMax}, PlotPoints → ppoints / 3,
  Frame → True, GridLines → Automatic];
plfl = Plot[lfℒ[S], {S, 0, sMax}, PlotPoints → ppoints / 3,
  Frame → True, GridLines → Automatic];
plfr = Plot[lfℛ[S], {S, 0, sMax}, PlotPoints → ppoints / 3,
  Frame → True, GridLines → Automatic];

```

```

Show[GraphicsRow[{phl, phr, plfl, plfr}, ImageSize → 750]]
pldl = Plot[ldL[S], {S, 0, sMax},
  PlotPoints → ppoints / 3, Frame → True, GridLines → Automatic];
pldr = Plot[ldR[S], {S, 0, sMax}, PlotPoints → ppoints / 3,
  Frame → True, GridLines → Automatic];
psiL = Plot[ψL[S], {S, 0, sMax}, PlotPoints → ppoints / 3,
  Frame → True, GridLines → Automatic];
psiR = Plot[ψR[S], {S, 0, sMax}, PlotPoints → ppoints / 3,
  Frame → True, GridLines → Automatic];
Show[GraphicsRow[{pldl, pldr, psiL, psiR}, ImageSize → 750]]
put1 = stylePlot[R[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "R, м", "a", , , PlotPoints → ppoints]
put2 = stylePlot[sp[S], {S, 0, sMax}, "S, м",
  "sp, мм", "σ", {0.800, 1.100}, , , PlotPoints → ppoints]
put3 = stylePlot[is[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "is", "Б",
  {-0.100, 0.100}, , , PlotPoints → ppoints]
put4 = stylePlot[ip[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "ip", "Г",
  {-0.050, 0.050}, , , PlotPoints → ppoints]
put5 = stylePlot[hL[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "hL, мм",
  "a", {-10.0, 10.0}, , , PlotPoints → ppoints]
put6 = stylePlot[hR[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "hR, мм",
  "б", {-10.0, 10.0}, , , PlotPoints → ppoints]
put7 = stylePlot[lfL[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "lφL, мм",
  "Б", {0.0, 10.0}, , , PlotPoints → ppoints]
put8 = stylePlot[lfR[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "lφR, мм",
  "Г", {0.0, 10.0}, , , PlotPoints → ppoints]
put9 = stylePlot[ldL[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "ldL, м",
  "д", {0.0, 5.0}, , , PlotPoints → ppoints]
put10 = stylePlot[ldR[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "ldR, м",
  "e", {0.0, 5.0}, , , PlotPoints → ppoints]
put11 = stylePlot[ψL[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "ψL",
  "a", {0.0, 0.25}, , , PlotPoints → ppoints]
put12 = stylePlot[ψR[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "ψR",
  "б", {0.0, 0.25}, , , PlotPoints → ppoints]
put11a = stylePlot[ψL[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "ψL",
  "ж", {0.0, 0.25}, , , PlotPoints → ppoints]
put12a = stylePlot[ψR[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "ψR",
  "з", {0.0, 0.25}, , , PlotPoints → ppoints]
put5H = stylePlot[HL[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "HL, мм",
  "a", {-10.0, 10.0}, , , PlotPoints → ppoints]
put6H = stylePlot[HR[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "HR, мм",
  "б", {-10.0, 10.0}, , , PlotPoints → ppoints]
put1RdL = stylePlot[RdL[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "RdL, м",
  "Б", {0, 25}, , , PlotPoints → ppoints]
put1RdR = stylePlot[RdR[S], {S, 0, sMax}, "S, м", "RdR, м",
  "Г", {0, 25}, , , PlotPoints → ppoints]

```

## ■ Основные вычисления

### ■ Задаваемые параметры

(\*Задаваемые параметры\*)

(\*i<sub>p</sub>[x<sub>-</sub>]:=-0.030\*)

Tt = 250.; xStart = 35.; tm = 1.0; txh = 0.27;

(\*tm - время реакции машиниста - выбега до начала торможения;

txh - время холостого хода - срабатывания тормоза,

k<sub>g</sub> - коэффициент пригрузки гравитационного тормоза\*)

```

(*SetOptions[SelectedNotebook[],
  InitializationCellEvaluation->True,InitializationCellWarning->False];*)

Quiet[Check[{V0, ng, PT, PA, PP, PM, PG, kgmax, Mdi, Mdin, Msinj, Mti} =
  Flatten@Import["initialization.txt", "Table"],
  Export["initialization.txt", ConstantArray[0, 12], "Table"];
  {V0, ng, PT, PA, PP, PM, PG, kgmax, Mdi, Mdin, Msinj, Mti} = ConstantArray[0, 12];]]

V0 = SetPrecision[V0, 4]; curx1 = 0;

SetOptions[SelectedNotebook[], DockedCells -> {}];

dock = TableForm[{{V0 =, Dynamic[V0], " ", " ng =, Dynamic[ng], " ", " x1 =,
  Dynamic[NumberForm[curx1, {4, 2}]], " ", " PT =, Dynamic[PT], " ", " PA =,
  Dynamic[PA], " ", " PP =, Dynamic[PP], " ", " PM =, Dynamic[PM], " ", " PG =,
  Dynamic[PG], " ", " kgmax =, Dynamic[kgmax], " ", " Mdi =, Dynamic[Mdi], " ", " Mdin =,
  Dynamic[Mdin], " ", " Msinj =, Dynamic[Msinj], " ", " Mti =, Dynamic[Mti]}}];
SetOptions[SelectedNotebook[], DockedCells -> Cell[BoxData[ToBoxes[dock]],
  "DockedCell"], WindowStatusArea -> Automatic
  (*Automatic Dynamic[typeM]Dynamic[Refresh[DateString[],UpdateInterval->30]]*)]

nn = 0;

timeout = 1;
If[timeout ≠ 0,
  pnb = CreateWindow[DialogNotebook[{TextCell[Начальная скорость:],
    {{V0 =, Dynamic[V0], м / с, Button["-", V0 -= 0.05^4, ImageSize -> {20, 20}],
      Slider[Dynamic[V0], {0.1^4, 20, 0.05^4}, ImageSize -> {627, 23}],
      Button["+", V0 += 0.05^4, ImageSize -> {20, 20}]}] // TableForm,
    TableForm[{{
      {Количество вагонов: , ng , =,
        PopupMenu[Dynamic[ng], # -> Style[#, 16] & /@Range[0, 30], FieldSize -> 3]},
      {Признак торможения: , PT , =, PopupMenu[Dynamic[PT],
        # -> Style[#, 16] & /@Range[0, 10], FieldSize -> 3]},
      {
        , Mdi , =, InputField[Dynamic[Mdi], FieldSize -> 3]},
      {
        , Msinj , =, InputField[Dynamic[Msinj], FieldSize -> 3]},
      {Степень вкл. МРТ: , PM , =,
        PopupMenu[Dynamic[PM], # -> Style[#, 16] & /@Range[0, 6], FieldSize -> 3]}},
      {{
        Признак управления моментом: , PA , =, PopupMenu[Dynamic[PA],
          # -> Style[#, 16] & /@Range[0, 4], FieldSize -> 3]},
      {
        Признак различных моментов: , PP , =, PopupMenu[Dynamic[PP],
          # -> Style[#, 16] & /@Range[0, 3], FieldSize -> 3]},
      {
        , Mdin , =, InputField[Dynamic[Mdin], FieldSize -> 3]},
      {
        , Mti , =, InputField[Dynamic[Mti], FieldSize -> 3]},
      {
        Степень вкл. ГРТ: , PG , =, PopupMenu[Dynamic[PG],
          # -> Style[#, 16] & /@Range[0, 3], FieldSize -> 3]}]}]}],
    TableForm[{{Кoeffициент нагрузки на колеса: , kgmax , =,
      InputField[Dynamic[kgmax], FieldSize -> 3]}},
    Row[{DefaultButton[DialogReturn[timeout = 0]], , , Dynamic[60 - 0.2^3 * nn]},
      " "}], WindowOpacity -> 0.96, WindowMargins -> Automatic,
    FontSize -> 16, WindowTitle -> "Assign parameters"]];

While[timeout ≠ 0 && nn < 300, nn++; Pause[0.2]];
(*пауза - до Ok в Assign parameters или 60 сек*)

NotebookClose[pnb];
Export["initialization.txt",
  {V0, ng, PT, PA, PP, PM, PG, kgmax, Mdi, Mdin, Msinj, Mti}, "Table"];

```

### Функции управления тормозным моментом

- (\*Способы торможения (признак торможения) RT=;
- 0 - без торможения (выбег);
  - 1 - торможение только трансмиссионным дисковым тормозом;
  - 2 - торможение только осевым дисковым тормозом;
  - 3 - торможение только колесно-колодочным тормозом;
  - 4 - торможение только двигателем;
  - 5 - комбинированное торможение трансмиссионным и осевым дисковыми тормозами;
  - 6 - комбинированное торможение трансмиссионным дисковым тормозом и двигателем;
  - 7 - комбинированное торможение трансмиссионным дисковым и колесно-колодочным тормозами;
  - 8 - комбинированное торможение осевым дисковым и колесно-колодочным тормозами;
  - 9 - комбинированное торможение трансмиссионным и осевым дисковыми, а также колесно-колодочным тормозами;
  - 10 - комбинированное торможение осевым дисковым, колесно-колодочным тормозами и двигателем. \*)
- (\*Способы контроля тормозного момента (признак управления моментом) RA=;
- 0 - без управления (постоянный момент);
  - 1...50 - автоматическое управление тормозным моментом по значению относительного скольжения;
  - 51...100 - автоматическое управление тормозным моментом другими способами;\*)
- (\*Способы задания тормозного момента при RA>
- 0 (признак различий моментов на отдельных устройствах) RP=;
  - 0 - одинаковый на всем локомотиве (внутри локомотива на всех тяговых двигателях, или трансмиссионных тормозах, или осевых тормозах, или колесно-колодочных тормозах моменты равны между собой);
  - 1 - одинаковый на тяговой секции (внутри каждой тяговой секции на всех тяговых двигателях, или трансмиссионных тормозах, или осевых тормозах, или колесно-колодочных тормозах моменты равны между собой);
  - 2 - одинаковый на колесной паре тяговой секции (внутри каждой колесной пары в каждой тяговой секции на осевых тормозах, или колесно-колодочных тормозах моменты равны между собой);
  - 3 - разный на колесно-колодочных тормозах каждого колеса каждой колесной пары, разный на осевых тормозах, разный на дисковых осевых и трансмиссионных тормозах каждой тяговой секции. \*)
- (\*Степень торможения магниторельсовыми тормозами RM=;
- 0 - без торможения (выбег);
  - 1 - торможение только первыми секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза первой по ходу движения тяговой секции;
  - 2 - торможение первыми и вторыми секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза первой по ходу движения тяговой секции;
  - 3 - торможение первыми, вторыми и третьими секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза первой по ходу движения тяговой секции;

- 4 – торможение только первыми секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза обеих тяговых секций;  
 5 – торможение первыми и вторыми секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза обеих тяговых секций;  
 6 – торможение первыми, вторыми и третьими секциями (левой и правой) магниторельсового тормоза обеих тяговых секций.\*)

(\*Степень торможения гравитационными тормозами PG=;

- 0 – без торможения (выбег);  
 1 – торможение только гравитационными тормозами первой по ходу движения тяговой секции;  
 2 – торможение только гравитационными тормозами второй по ходу движения тяговой секции;  
 3 – торможение гравитационными тормозами первой и второй по ходу движения тяговых секций.\*)

(\*настройки момента\*)

```
reset := HoldComplete [
  Evaluate [ { εmax = 0.02, εmin = 0.01, Δt = 0.2, Δtf = 0.01, k = 0.38, dm =  $\frac{M_{din} - k M_{din}}{\Delta t}$ ,
    Table [ { ΔT1{type,inj} = 0.03, ΔTd1{type,inj} [ε_] := Evaluate [
      Piecewise [ { { ΔT1{type,inj} / 3, 0.7 εmin ≤ ε ≤ 1.3 εmax }, { ΔT1{type,inj} / 2,
        0.5 εmin ≤ ε < 0.7 εmin }, { ΔT1{type,inj} / 1.5, 0.3 εmin ≤ ε < 0.5 εmin },
        { ΔT1{type,inj}, ε < 0.3 εmin }, { ΔT1{type,inj} / 2, 1.3 εmax < ε ≤ 1.5 εmax },
        { ΔT1{type,inj} / 1.5, 1.5 εmax < ε ≤ 1.7 εmax }, { ΔT1{type,inj}, 1.7 εmax < ε } } ] ];
    ΔT2{type,inj} = 0.07, tdw{type,inj} = 0, tup{type,inj} = 0, MD{type,inj} = 0.,
    key{type,inj} = 0 }, {type, {di, din, sinj, ti}},
    {inj, {t1, t2, 111, 112, 121, 122, 211, 212, 221, 222}} ];
  typeFM = Switch [ PA,
    0, "PA = 0, Торможение с постоянным моментом",
    1, "PA = 1, Торможение с регулируемым моментом",
    2, "PA = 2, Торможение с регулируемым моментом и зависимой продолжительностью
      однократного увеличения/уменьшения момента от скольжения",
    3, "PA = 3, Скольжение прогнозируются на время t+Δtf.
      Торможение с регулируемым моментом.",
    4, "PA = 4, Скольжение прогнозируются на время t+Δtf. Торможение
      с регулируемым моментом и зависимой продолжительностью
      однократного увеличения/уменьшения момента от скольжения." ] ] ] ;
```

(\*Автоматическое регулирование момента v.5.1\*)

```
Switch [ PA,
  0, AMoment [ t_, type_, inj_, Mmax_ ] :=
  If [ t ≤ tm, 0., If [ (t < tm + txx), Mmax Sin [  $\frac{t - tm}{txx} \frac{\pi}{2}$  ], Mmax ] ],
```

```

1, AMoment[t_, type_, inj_, Mmax_] := (Evaluate[ε[inj] = εinj[t]];
If[t < tm, 0.,
If[(t < tm + txx) && key{type, inj} == 0 && ε[inj] ≤ εmax, MD{type, inj} = Mmax Sin[ $\frac{t - t_m}{t_{xx}} \frac{\pi}{2}$ ],
If[ε[inj] > εmax,
(*уменьшение*)
If[If[tdw{type, inj} == 0, key{type, inj} = 1; Mb{type, inj} = MD{type, inj}; tup{type, inj} = 0;
tdw{type, inj} = t]; MD{type, inj} > k Mmax && t ≤ tdw{type, inj} + ΔT1{type, inj},
MD{type, inj} = -dm (t - tdw{type, inj}) + Mb{type, inj},
If[t ≤ tdw{type, inj} + ΔT1{type, inj} + ΔT2{type, inj},
MD{type, inj}, tdw{type, inj} = 0; MD{type, inj}]],
If[ε[inj] < εmin,
(*увеличение*)
If[If[tup{type, inj} == 0, Mb{type, inj} = MD{type, inj}; tdw{type, inj} = 0; tup{type, inj} = t];
MD{type, inj} < Mmax && t ≤ tup{type, inj} + ΔT1{type, inj},
MD{type, inj} = dm (t - tup{type, inj}) + Mb{type, inj},
If[t ≤ tup{type, inj} + ΔT1{type, inj} + ΔT2{type, inj},
MD{type, inj}, tup{type, inj} = 0; MD{type, inj}]],
tup{type, inj} = 0; tdw{type, inj} = 0; MD{type, inj}]]]]],
2, AMoment[t_, type_, inj_, Mmax_] := (Evaluate[ε[inj] = εinj[t]];
If[t < tm, 0.,
If[(t < tm + txx) && key{type, inj} == 0 && ε[inj] ≤ εmax, MD{type, inj} = Mmax Sin[ $\frac{t - t_m}{t_{xx}} \frac{\pi}{2}$ ],
If[ε[inj] > εmax,
(*уменьшение*)
If[If[tdw{type, inj} == 0, key{type, inj} = 1; Mb{type, inj} = MD{type, inj};
tup{type, inj} = 0; ΔT1{type, inj} = ΔTdl{type, inj}[ε[inj]]; tdw{type, inj} = t];
MD{type, inj} > k Mmax && t ≤ tdw{type, inj} + ΔT1{type, inj},
MD{type, inj} = -dm (t - tdw{type, inj}) + Mb{type, inj},
If[t ≤ tdw{type, inj} + ΔT1{type, inj} + ΔT2{type, inj},
MD{type, inj}, tdw{type, inj} = 0; MD{type, inj}]],
If[ε[inj] < εmin,
(*увеличение*)
If[If[tup{type, inj} == 0, Mb{type, inj} = MD{type, inj};
tdw{type, inj} = 0; ΔT1{type, inj} = ΔTdl{type, inj}[ε[inj]]; tup{type, inj} = t];
MD{type, inj} < Mmax && t ≤ tup{type, inj} + ΔT1{type, inj},
MD{type, inj} = dm (t - tup{type, inj}) + Mb{type, inj},
If[t ≤ tup{type, inj} + ΔT1{type, inj} + ΔT2{type, inj},

```

```

MD{type, inj}, tup{type, inj} = 0; MD{type, inj} ] ] ,
tup{type, inj} = 0; tdw{type, inj} = 0; MD{type, inj} ] ] ] ] ] ,
3, AMoment[t_, type_, inj_, Mmax_] := ( Evaluate[εfut[inj] = εinj[t] + dε[inj] * Δtf] ;
If[t < tm, 0., If[
(t < tm + txx) && key{type, inj} == 0 && εfut[inj] ≤ εmax, MD{type, inj} = Mmax Sin[ $\frac{t - tm}{txx} \frac{\pi}{2}$ ],
If[εfut[inj] > εmax,
(*уменьшение*)
If[If[tdw{type, inj} == 0, key{type, inj} = 1; Mb{type, inj} = MD{type, inj}; tup{type, inj} = 0;
tdw{type, inj} = t]; MD{type, inj} > k Mmax && t ≤ tdw{type, inj} + ΔT1{type, inj} ,
MD{type, inj} = -dm (t - tdw{type, inj}) + Mb{type, inj} ,
If[t ≤ tdw{type, inj} + ΔT1{type, inj} + ΔT2{type, inj} ,
MD{type, inj}, tdw{type, inj} = 0; MD{type, inj} ] ] ,
If[εfut[inj] < εmin,
(*увеличение*)
If[If[tup{type, inj} == 0, Mb{type, inj} = MD{type, inj}; tdw{type, inj} = 0; tup{type, inj} = t];
MD{type, inj} < Mmax && t ≤ tup{type, inj} + ΔT1{type, inj} ,
MD{type, inj} = dm (t - tup{type, inj}) + Mb{type, inj} ,
If[t ≤ tup{type, inj} + ΔT1{type, inj} + ΔT2{type, inj} ,
MD{type, inj}, tup{type, inj} = 0; MD{type, inj} ] ] ,
tup{type, inj} = 0; tdw{type, inj} = 0; MD{type, inj} ] ] ] ] ] ,
4, AMoment[t_, type_, inj_, Mmax_] := ( Evaluate[εfut[inj] = εinj[t] + dε[inj] * Δtf] ;
If[t < tm, 0., If[
(t < tm + txx) && key{type, inj} == 0 && εfut[inj] ≤ εmax, MD{type, inj} = Mmax Sin[ $\frac{t - tm}{txx} \frac{\pi}{2}$ ],
If[εfut[inj] > εmax,
(*уменьшение*)
If[If[tdw{type, inj} == 0, key{type, inj} = 1; Mb{type, inj} = MD{type, inj};
tup{type, inj} = 0; ΔT1{type, inj} = ΔTd1{type, inj} [ε[inj]]; tdw{type, inj} = t];
MD{type, inj} > k Mmax && t ≤ tdw{type, inj} + ΔT1{type, inj} ,
MD{type, inj} = -dm (t - tdw{type, inj}) + Mb{type, inj} ,
If[t ≤ tdw{type, inj} + ΔT1{type, inj} + ΔT2{type, inj} ,
MD{type, inj}, tdw{type, inj} = 0; MD{type, inj} ] ] ,
If[εfut[inj] < εmin,
(*увеличение*)
If[If[tup{type, inj} == 0, Mb{type, inj} = MD{type, inj};
tdw{type, inj} = 0; ΔT1{type, inj} = ΔTd1{type, inj} [ε[inj]]; tup{type, inj} = t];

```



```

9, funPT[1]; funPT[2]; funPT[3],
10, funPT[2]; funPT[3]; funPT[4],
_, Print["Error PT value"]],
2, funPT[PT_] := Switch[PT,
0, Null,
1, Md1[t_] := AMoment[t, di, t1, Mdi]; Md2[t_] := AMoment[t, di, t2, Mdi],
2, Md11[t_] := AMoment[t, din, 111, Mdin]; Md12[t_] := AMoment[t, din, 121, Mdin];
Md21[t_] := AMoment[t, din, 211, Mdin]; Md22[t_] := AMoment[t, din, 221, Mdin],
3, Ms111[t_] := AMoment[t, sinj, 111, Msinj]; Ms112[t_] := Ms111[t];
Ms121[t_] := AMoment[t, sinj, 121, Msinj]; Ms122[t_] := Ms121[t];
Ms211[t_] := AMoment[t, sinj, 211, Msinj]; Ms212[t_] := Ms211[t];
Ms221[t_] := AMoment[t, sinj, 221, Msinj]; Ms222[t_] := Ms221[t],
4, Mt1[t_] := AMoment[t, ti, t1, Mti]; Mt2[t_] := AMoment[t, ti, t2, Mti],
5, funPT[1]; funPT[2],
6, funPT[1]; funPT[4],
7, funPT[1]; funPT[3],
8, funPT[2]; funPT[3],
9, funPT[1]; funPT[2]; funPT[3],
10, funPT[2]; funPT[3]; funPT[4],
_, Print["Error PT value"]],
3, funPT[PT_] := Switch[PT,
0, Null,
1, Md1[t_] := AMoment[t, di, t1, Mdi]; Md2[t_] := AMoment[t, di, t2, Mdi],
2, Md11[t_] := AMoment[t, din, 111, Mdin]; Md12[t_] := AMoment[t, din, 121, Mdin];
Md21[t_] := AMoment[t, din, 211, Mdin]; Md22[t_] := AMoment[t, din, 221, Mdin],
3, Ms111[t_] := AMoment[t, sinj, 111, Msinj]; Ms112[t_] := AMoment[t, sinj, 112, Msinj];
Ms121[t_] := AMoment[t, sinj, 121, Msinj]; Ms122[t_] := AMoment[t, sinj, 122, Msinj];
Ms211[t_] := AMoment[t, sinj, 211, Msinj]; Ms212[t_] := AMoment[t, sinj, 212, Msinj];
Ms221[t_] := AMoment[t, sinj, 221, Msinj]; Ms222[t_] := AMoment[t, sinj, 222, Msinj],
4, Mt1[t_] := AMoment[t, ti, t1, Mti]; Mt2[t_] := AMoment[t, ti, t2, Mti],
5, funPT[1]; funPT[2],
6, funPT[1]; funPT[4],
7, funPT[1]; funPT[3],
8, funPT[2]; funPT[3],
9, funPT[1]; funPT[2]; funPT[3],
10, funPT[2]; funPT[3]; funPT[4],
_, Print["Error PT value"]],
_, Print["Error PP value"]];
funPT[PT];

typeM = Switch[PT,
0, Mmax = 0; data = {}; "0 - без торможения",
1, Mmax = Mdi; data = {Hold@dataD1, Hold@dataD2};
"1 - торможение только трансмиссионным дисковым тормозом",
2, Mmax = Mdin; data = {Hold@dataD11, Hold@dataD12, Hold@dataD21, Hold@dataD22};
"2 - торможение только осевым дисковым тормозом",
3, Mmax = Msinj; data = {Hold@dataS111, Hold@dataS121, Hold@dataS211,

```

```

    Hold@dataS221}; "3 - торможение только колесно-колодочным тормозом",
4, Mmax = Mti; data = {Hold@dataT1, Hold@dataT2};
"4 - торможение только двигателем",
5, Mmax = Mdi + Mdin; data = {Hold@dataD1, Hold@dataD2, Hold@dataD11, Hold@dataD21};
"5 - комбинированное торможение трансмиссионным и осевым дисковыми тормозами",
6, Mmax = Mdi + Mti; data = {Hold@dataD1, Hold@dataD2, Hold@dataT1, Hold@dataT2};
"6 - комбинированное торможение трансмиссионным дисковым тормозом и двигателем",
7, Mmax = Mdi + Msinj; data = {Hold@dataD1, Hold@dataD2,
    Hold@dataS111, Hold@dataS221}; "7 - комбинированное торможение
    трансмиссионным дисковым и колесно-колодочным тормозами",
8, Mmax = Mdin + Msinj; data = {Hold@dataD11, Hold@dataD22,
    Hold@dataS111, Hold@dataS221};
"8 - комбинированное торможение осевым дисковым и колесно-колодочным тормозами",
9, Mmax = Mdi + Mdin + Msinj; data = {Hold@dataD1, Hold@dataD2,
    Hold@dataD11, Hold@dataD22, Hold@dataS111, Hold@dataS221};
"9 - комбинированное торможение трансмиссионным и осевым
    дисковыми, а также колесно-колодочным тормозами",
10, Mmax = Mdin + Msinj + Mti; data = {Hold@dataD11, Hold@dataD22,
    Hold@dataS111, Hold@dataS221, Hold@dataT1, Hold@dataT2};
"10 - комбинированное торможение осевым дисковым, колесно-колодочным
    тормозами и двигателем",
-
Null];

```

#### ■ Константы

(\*Константы\*)

$g_0 = 9.80602;$

(\*Параметры, зависящие от признака торможения\*)

Switch[PT,

```

0, m111 = 171.; m112 = 160.; m121 = 171.; m122 = 160.; m211 = 160.; m212 = 171.; m221 = 160.;
m222 = 171.; Iy111 = 5.2; Iy112 = 5.4; Iy121 = 5.2; Iy122 = 5.4; Iy211 = 5.4; Iy212 = 5.2;
Iy221 = 5.4; Iy222 = 5.2; cφ111 = 11. × 106; cφ112 = 11. × 106; cφ121 = 11. × 106;
cφ122 = 11. × 106; cφ211 = 11. × 106; cφ212 = 11. × 106; cφ221 = 11. × 106; cφ222 = 11. × 106,
1, m111 = 176.; m112 = 155.; m121 = 176.; m122 = 155.; m211 = 155.; m212 = 176.;
m221 = 155.; m222 = 176.; Iy111 = 6.2; Iy112 = 4.6; Iy121 = 6.2; Iy122 = 4.6; Iy211 = 4.6;
Iy212 = 6.2; Iy221 = 4.6; Iy222 = 6.2; cφ111 = 4.8 × 106; cφ112 = 20. × 106; cφ121 = 4.8 × 106;
cφ122 = 20. × 106; cφ211 = 20. × 106; cφ212 = 4.8 × 106; cφ221 = 20. × 106; cφ222 = 4.8 × 106,
2, m111 = 156.; m112 = 175.; m121 = 156.; m122 = 175.; m211 = 175.; m212 = 156.;
m221 = 175.; m222 = 156.; Iy111 = 3.9; Iy112 = 6.2; Iy121 = 3.9; Iy122 = 6.2; Iy211 = 6.2;
Iy212 = 3.9; Iy221 = 6.2; Iy222 = 3.9; cφ111 = 12. × 106; cφ112 = 23. × 106; cφ121 = 12. × 106;
cφ122 = 23. × 106; cφ211 = 23. × 106; cφ212 = 12. × 106; cφ221 = 23. × 106; cφ222 = 12. × 106,
3, m111 = 171.; m112 = 160.; m121 = 171.; m122 = 160.; m211 = 160.; m212 = 171.;
m221 = 160.; m222 = 171.; Iy111 = 5.2; Iy112 = 5.4; Iy121 = 5.2; Iy122 = 5.4; Iy211 = 5.4;
Iy212 = 5.2; Iy221 = 5.4; Iy222 = 5.2; cφ111 = 11. × 106; cφ112 = 11. × 106; cφ121 = 11. × 106;
cφ122 = 11. × 106; cφ211 = 11. × 106; cφ212 = 11. × 106; cφ221 = 11. × 106; cφ222 = 11. × 106,

```

4,  $m_{111} = 176.$ ;  $m_{112} = 155.$ ;  $m_{121} = 176.$ ;  $m_{122} = 155.$ ;  $m_{211} = 155.$ ;  $m_{212} = 176.$ ;  
 $m_{221} = 155.$ ;  $m_{222} = 176.$ ;  $I_{y111} = 6.2$ ;  $I_{y112} = 4.6$ ;  $I_{y121} = 6.2$ ;  $I_{y122} = 4.6$ ;  $I_{y211} = 4.6$ ;  
 $I_{y212} = 6.2$ ;  $I_{y221} = 4.6$ ;  $I_{y222} = 6.2$ ;  $c_{\varphi111} = 4.8 \times 10^6$ ;  $c_{\varphi112} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi121} = 4.8 \times 10^6$ ;  
 $c_{\varphi122} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi211} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi212} = 4.8 \times 10^6$ ;  $c_{\varphi221} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi222} = 4.8 \times 10^6$ ,  
 5,  $m_{111} = 156.$ ;  $m_{112} = 155.$ ;  $m_{121} = 156.$ ;  $m_{122} = 155.$ ;  $m_{211} = 155.$ ;  $m_{212} = 156.$ ;  
 $m_{221} = 155.$ ;  $m_{222} = 149.$ ;  $I_{y111} = 3.9$ ;  $I_{y112} = 4.6$ ;  $I_{y121} = 3.9$ ;  $I_{y122} = 4.6$ ;  $I_{y211} = 4.6$ ;  
 $I_{y212} = 3.9$ ;  $I_{y221} = 4.6$ ;  $I_{y222} = 3.9$ ;  $c_{\varphi111} = 12. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi112} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi121} = 12. \times 10^6$ ;  
 $c_{\varphi122} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi211} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi212} = 12. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi221} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi222} = 12. \times 10^6$ ,  
 6,  $m_{111} = 176.$ ;  $m_{112} = 155.$ ;  $m_{121} = 176.$ ;  $m_{122} = 155.$ ;  $m_{211} = 155.$ ;  $m_{212} = 176.$ ;  
 $m_{221} = 155.$ ;  $m_{222} = 176.$ ;  $I_{y111} = 6.2$ ;  $I_{y112} = 4.6$ ;  $I_{y121} = 6.2$ ;  $I_{y122} = 4.6$ ;  $I_{y211} = 4.6$ ;  
 $I_{y212} = 6.2$ ;  $I_{y221} = 4.6$ ;  $I_{y222} = 6.2$ ;  $c_{\varphi111} = 4.8 \times 10^6$ ;  $c_{\varphi112} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi121} = 4.8 \times 10^6$ ;  
 $c_{\varphi122} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi211} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi212} = 4.8 \times 10^6$ ;  $c_{\varphi221} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi222} = 4.8 \times 10^6$ ,  
 7,  $m_{111} = 176.$ ;  $m_{112} = 155.$ ;  $m_{121} = 176.$ ;  $m_{122} = 155.$ ;  $m_{211} = 155.$ ;  $m_{212} = 176.$ ;  
 $m_{221} = 155.$ ;  $m_{222} = 176.$ ;  $I_{y111} = 6.2$ ;  $I_{y112} = 4.6$ ;  $I_{y121} = 6.2$ ;  $I_{y122} = 4.6$ ;  $I_{y211} = 4.6$ ;  
 $I_{y212} = 6.2$ ;  $I_{y221} = 4.6$ ;  $I_{y222} = 6.2$ ;  $c_{\varphi111} = 4.8 \times 10^6$ ;  $c_{\varphi112} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi121} = 4.8 \times 10^6$ ;  
 $c_{\varphi122} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi211} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi212} = 4.8 \times 10^6$ ;  $c_{\varphi221} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi222} = 4.8 \times 10^6$ ,  
 8,  $m_{111} = 156.$ ;  $m_{112} = 175.$ ;  $m_{121} = 156.$ ;  $m_{122} = 175.$ ;  $m_{211} = 175.$ ;  $m_{212} = 156.$ ;  
 $m_{221} = 175.$ ;  $m_{222} = 156.$ ;  $I_{y111} = 3.9$ ;  $I_{y112} = 6.2$ ;  $I_{y121} = 3.9$ ;  $I_{y122} = 6.2$ ;  $I_{y211} = 6.2$ ;  
 $I_{y212} = 3.9$ ;  $I_{y221} = 6.2$ ;  $I_{y222} = 3.9$ ;  $c_{\varphi111} = 12. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi112} = 23. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi121} = 12. \times 10^6$ ;  
 $c_{\varphi122} = 23. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi211} = 23. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi212} = 12. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi221} = 23. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi222} = 12. \times 10^6$ ,  
 9,  $m_{111} = 156.$ ;  $m_{112} = 155.$ ;  $m_{121} = 156.$ ;  $m_{122} = 155.$ ;  $m_{211} = 155.$ ;  $m_{212} = 156.$ ;  
 $m_{221} = 155.$ ;  $m_{222} = 156.$ ;  $I_{y111} = 3.9$ ;  $I_{y112} = 4.6$ ;  $I_{y121} = 3.9$ ;  $I_{y122} = 4.6$ ;  $I_{y211} = 4.6$ ;  
 $I_{y212} = 3.9$ ;  $I_{y221} = 4.6$ ;  $I_{y222} = 3.9$ ;  $c_{\varphi111} = 12. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi112} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi121} = 12. \times 10^6$ ;  
 $c_{\varphi122} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi211} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi212} = 12. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi221} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi222} = 12. \times 10^6$ ,  
 10,  $m_{111} = 156.$ ;  $m_{112} = 155.$ ;  $m_{121} = 156.$ ;  $m_{122} = 155.$ ;  $m_{211} = 155.$ ;  $m_{212} = 156.$ ;  
 $m_{221} = 155.$ ;  $m_{222} = 149.$ ;  $I_{y111} = 3.9$ ;  $I_{y112} = 4.6$ ;  $I_{y121} = 3.9$ ;  $I_{y122} = 4.6$ ;  $I_{y211} = 4.6$ ;  
 $I_{y212} = 3.9$ ;  $I_{y221} = 4.6$ ;  $I_{y222} = 3.9$ ;  $c_{\varphi111} = 12. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi112} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi121} = 12. \times 10^6$ ;  
 $c_{\varphi122} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi211} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi212} = 12. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi221} = 20. \times 10^6$ ;  $c_{\varphi222} = 12. \times 10^6$ ,  
 \_, Null];

**(\*Массы\*)**

$m_k = 3077.$ ;  
 $m_1 = 3544.$ ;  $m_2 = 3453.$ ;  
 $m_{oz} = 64.4$ ;  $m_{oy} = 63.4$ ;  $m_{11} = 655.5$ ;  $m_{12} = 660.$ ;  $m_{21} = 660.$ ;  $m_{22} = 655.5$ ;  
 $m_m = 38.45$ ;  $m_g = 0.359$ ;  
 $m_{loc} = m_k + (m_1 + m_2)$ ;  $m_g = 6. \times 10^3$ ;  $m_{sp} = 1260.$ ;  $m_c = \text{If}[n_g == 0, 0.0005, n_g m_g]$ ;  
 $G_{1110} = G_{1120} = G_{1210} = G_{1220} = 12459.8$ ;  $G_{2110} = G_{2120} = G_{2210} = G_{2220} = 12236.7$ ;

**(\*Моменты инерции\*)**

$I_{t1} = 0.2$ ;  $I_{t2} = 0.2$ ;  
 $I_{y11} = 18.0$ ;  $I_{y12} = 19.2$ ;  $I_{y21} = 19.2$ ;  $I_{y22} = 18.0$ ;  
 $I_{y1} = 8243.0$ ;  $I_{y2} = 8243.0$ ;  $I_{x1} = 1400.0$ ;  $I_{x2} = 1400.0$ ;  $I_{z1} = 8577.0$ ;  
 $I_{z2} = 8577.0$ ;  $I_{yk} = 5646.$ ;  $I_{xk} = 355.6$ ;  $I_{zk} = 5788.$ ;  $I_{yS} = 5000.$ ;  
 $I_{xS} = 300.$ ;  $I_{zS} = 5000.$ ;  $I_{z11} = I_{z22} = 28.48$ ;  $I_{z12} = I_{z21} = 29.4$ ;

**(\*Жесткости\*)**

$c_c = 7. \times 10^6$  ;  
 $c_k = 1.5 \times 10^8$  ;  $c_x = 4. \times 10^5$  ;  $c_z = 6. \times 10^5$  ;  $c_y = 2.13 \times 10^5$  ;  $c_{oz} = 147. \times 10^6$  ;  $c_{oy} = 40.4 \times 10^6$  ;  
 $c_{\varphi 11} = 2.8 \times 10^4$  ;  $c_{\varphi 12} = 2.0 \times 10^4$  ;  $c_{\varphi 21} = 2.0 \times 10^4$  ;  $c_{\varphi 22} = 2.8 \times 10^4$  ;  
 $c_{xg} = 1. \times 10^6$  ;  $c_{xm} = 2. \times 10^6$  ;  $c_{zg} = 4. \times 10^6$  ;  $c_{zm} = 0. \times 10^6$  ;  $c_{yg} = 2. \times 10^6$  ;  $c_{ym} = 3. \times 10^6$  ;

(\*Коэффициенты диссипации\*)

$\beta_c = 1000.$  ;  
 $\beta_k = 100.$  ;  $\beta_{kzyx} = 200.$  ;  $\beta_x = 10.$  ;  $\beta_z = 50.$  ;  $\beta_y = 15 \times 10^3$  ;  
 $\beta_{oz} = 7.72 \times 10^6$  ;  $\beta_{oy} = 40.8 \times 10^6$  ;  $\beta_{\varphi 111} = 10.$  ;  $\beta_{\varphi 112} = 10.$  ;  $\beta_{\varphi 121} = 10.$  ;  
 $\beta_{\varphi 122} = 10.$  ;  $\beta_{\varphi 211} = 10.$  ;  $\beta_{\varphi 212} = 10.$  ;  $\beta_{\varphi 221} = 10.$  ;  $\beta_{\varphi 222} = 10.$  ;  
 $\beta_{\varphi 11} = 5$  ;  $\beta_{\varphi 12} = 5$  ;  $\beta_{\varphi 21} = 5$  ;  $\beta_{\varphi 22} = 5$  ;  
 $\beta_{xg} = 2$  ;  $\beta_{xm} = 2$  ;  $\beta_{zg} = 2$  ;  $\beta_{zm} = 2$  ;  $\beta_{yg} = 2$  ;  $\beta_{ym} = 2$  ;

(\*Геометрические и кинематические параметры\*)

$sp = 0.9$  ;  $s_c = 2.656$  ;  $s_b = 1.150$  ;  $s_k = 4.300$  ;  $s_g = 3.575$  ;  
 $h_c = 0.310$  ;  $h_{ct} = 0.148$  ;  $h_{cs} = 0.255$  ;  $h_k = 0.589$  ;  $h_{cb} = 0.45$  ;  
 $u_t = 10.93$  ;  $r = 0.265$  ;  $a_p = 1.25$  ;  $b_p = 0.63$  ;  $u_p = 1.397$  ;  $\mu = \frac{1}{7}$  ;  
 $s_{kk} = 0.890$  ;  $\delta_0 = 75. \frac{\pi}{180}$  ;  $c = 0.022$  ;  $r_p = 0.012$  ;  $s_{bB} = 1.10$  ;

(\*Параметры сопротивления движению\*)

$W_0 = 306.8$  ;  $w_B = 0.07$  ;  
 $\alpha_{ck} = 9.$  ;  $\delta_{max} = 30.$  ;

(\*Параметры сцепления колеса с рельсом и  
рельсовых тормозов от относительных скольжения\*)

$$f_0 = k_{gp} \frac{\psi_{gg}}{\psi_0} \left( -0.016935 (100)^{5/11} + 0.195576 \operatorname{Tanh}[150] \right) ;$$

$$f_g [t] := k_{mg} k_{vf} [t] \frac{\psi_{ggg}}{\psi_0} \left( -0.016935 (100)^{5/11} + 0.195576 \operatorname{Tanh}[150] \right) ;$$

$$f_m [t] := k_{mg} k_{vf} [t] \frac{\psi_{ggm}}{\psi_0} \left( -0.016935 (100)^{5/11} + 0.195576 \operatorname{Tanh}[150] \right) ;$$

$$A_k = \frac{4 (G f_0 + \alpha_{ck} \delta_{max})}{\pi^2 \operatorname{Sin} \left[ \frac{\pi G f_0}{G f_0 + \alpha_{ck} \delta_{max}} \right]} ; B_k = \frac{4 (G f_0 + \alpha_{ck} \delta_{max})}{9 \pi^2 \operatorname{Sin} \left[ \frac{3 \pi G f_0}{G f_0 + \alpha_{ck} \delta_{max}} \right]} ;$$

$\psi_{gg} = 0.17$  ; (\*Коэффициент сцепления колеса с  
рельсом по условиям загрязненности рельсового пути\*)

$\psi_0 = 0.17$  ; (\*Коэффициент сцепления колеса с рельсом на сухих чистых рельсах\*)

$k_{gp} = 1.$  ; (\*Коэффициент сгруппированности привода тяговой секции локомотива -  
индивидуальный или групповой\*)

$\psi_{aaa} = 0.55$  ; (\*Коэффициент сцепления тормозной колодки

гравитационного тормоза с рельсом на сухих чистых рельсах\*) (\*равен 0, 55 для композитной колодки ТИИР 300 и 0,35 для чугунных колодок\*)  
 $\psi_{ggm} = 0.35$ ; (\*Кэффициент сцепления тормозной колодки магниторельсового тормоза с рельсом на сухих чистых рельсах\*) (\*равен 0, 35 для полюсных наконечников из первичного железа марки РІ9.5 и 0, 25 для для стальных Сп.Зжп\*)  
 $\kappa_{mg} = 1.0$ ; (\*Кэффициент зачистки тормозной колодкой магниторельсового или гравитационного тормоза загрязненный рельсового пути\*)

(\*Параметры рельсовых тормозов\*)

$$l_m = 0.25; a_m = 1.258; L = 0.280; l = 0.01; B = \frac{2.2}{0.425}; S_m = 6862 \times 10^{-6}; \mu_0 = 4. \pi \times 10^{-7};$$

$$F_{ny0} := \frac{B^2 S_m}{2. \mu_0};$$

$$Y = 2000.; F_m = 1250.; F_g = G (1 - \kappa_{gmax}) fg; fg = 0.11;$$

(\*Неровности пути\*)  
(\*лыски\*)

$$l_f = 0.000; (*начальные углы расположения первой лыски на колесах*) \varphi_{1110} = 0.;$$

$$\varphi_{1120} = \frac{\pi}{4}; \varphi_{1210} = \frac{\pi}{2}; \varphi_{1220} = \frac{3\pi}{4}; \varphi_{2110} = 2. \pi; \varphi_{2120} = \frac{9\pi}{4}; \varphi_{2210} = 3. \pi; \varphi_{2220} = \frac{13\pi}{4};$$

(\*длинные синусоидальные\*)

$$l_{sin} = 0.00001; h_s = 0.000; N_{sin} = c_z h_s; (*Длинная синусоидальная неровность*)$$

(\*параметры силового контакта колеса с рельсом\*)

$$c_{kot} = 4.6 \times 10^8; cm = \sqrt{c_{kot} m_{oz}};$$

$$\kappa_d = 1.6 \times 10^{-5}; \beta_d = 1.2; \gamma_d = 1.4; l_w = 1.5; G = \frac{m_{loc}}{8} g_0; i_{dcp} = \kappa_d \beta_d \gamma_d l_w G;$$

(\*короткий динамический прогиб рельсовых нитей\*)

$$l_{cp} = 2.85; c_{oz} = 147 \times 10^6;$$

$$Table [cm_{M[i,n,j]} = \sqrt{c_{oz} m_{M[i,n,j]}} , \{i, 2\}, \{n, 2\}, \{j, 2\}];$$

■ Расчетные формулы

```

(*Расчет*)
(*Координаты центров тел поезда на прямой*)
S1[t_] := x1[t] + xStart;
S2[t_] := S1[t] - sk;
Sk[t_] := S1[t] -  $\frac{sk}{2}$ ;
S11[t_] := S1[t] +  $\frac{sb}{2}$ ;
S111[t_] := S1[t] +  $\frac{sb}{2}$ ;
S112[t_] := S1[t] +  $\frac{sb}{2}$ ;
S12[t_] := S1[t] -  $\frac{sb}{2}$ ;
S121[t_] := S1[t] -  $\frac{sb}{2}$ ;
S122[t_] := S1[t] -  $\frac{sb}{2}$ ;
S21[t_] := S2[t] +  $\frac{sb}{2}$ ;
S211[t_] := S2[t] +  $\frac{sb}{2}$ ;
S212[t_] := S2[t] +  $\frac{sb}{2}$ ;
S22[t_] := S2[t] -  $\frac{sb}{2}$ ;
S221[t_] := S2[t] -  $\frac{sb}{2}$ ;
S222[t_] := S2[t] -  $\frac{sb}{2}$ ;
Sg[t_] := S2[t] - sc -  $\frac{ng \cdot sg}{2}$ ;
Table[SM[g,i,j][t_] := Evaluate[S1[t]], {i, 2}, {j, 2}];
Table[SM[m,i,j,m][t_] := Evaluate[S1[t] + (-1)j (am + (m-1) (L-1))],
  {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];
Table[SM[g,n][t_] := Evaluate[S2[t] - sc -  $\frac{n \cdot sg}{2}$ ], {n, 0, ng}];

```

```

(*Продольные и поперечные уклоны,
а также радиусы пути под элементами подвижного состава*)
Table[RM[inj][t_] := Evaluate[Piecewise[{{R[Sinj[t]], Abs[R[Sinj[t]]] ≥ 20.},
{20., 0. ≤ R[Sinj[t]] < 20.}, {-20., -20. < R[Sinj[t]] < 0.}}],
{inj, {{*B,*}k, 1, 11, 12, 111, 112, 121, 122, 2, 21, 22, 211, 212, 221, 222}}];
Table[iM[p,inj][t_] := Evaluate[ip[Sinj[t]]],
{inj, {B, k, 1, 11, 12, 111, 112, 121, 122, 2, 21, 22, 211, 212, 221, 222}}];
Table[iM[s,inj][t_] := Evaluate[is[Sinj[t]]],
{inj, {B, k, 1, 11, 12, 111, 112, 121, 122, 2, 21, 22, 211, 212, 221, 222}}];
Table[iM[sg,i,j][t_] := Evaluate[is[SM[sg,i,j][t]]], {i, 2}, {j, 2}];
Table[iM[pm,i,j,m][t_] := Evaluate[ip[SM[pm,i,j,m][t]]], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];
Table[sM[p,inj][t_] := Evaluate[sp[Sinj[t]]],
{inj, {B, k, 1, 11, 12, 111, 112, 121, 122, 2, 21, 22, 211, 212, 221, 222}}];
Table[sM[pg,i,j][t_] := Evaluate[sp[SM[pg,i,j][t]]], {i, 2}, {j, 2}];
Table[RM[p,inj][t_] :=
Evaluate[Which[ip'[Sinj[t]] ≠ 0., Evaluate@Piecewise[{{Evaluate[ $\frac{1}{i_p'[S_{inj}[t]]}$ ],
Evaluate[Abs[ $\frac{1}{i_p'[S_{inj}[t]]}$ ]] ≥ 20.}, {20., 0. ≤ Evaluate[ $\frac{1}{i_p'[S_{inj}[t]]}$ ] < 20.},
{-20., -20. < Evaluate[ $\frac{1}{i_p'[S_{inj}[t]]}$ ] < 0.}}], True, 1010]],
{inj, {B, k, 1, 11, 12, 111, 112, 121, 122, 2, 21, 22, 211, 212, 221, 222}}];
Table[RM[m,i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[
{{R[SM[m,i,j,m][t]], Abs[R[SM[m,i,j,m][t]]] ≥ 20.}, {20., 0. ≤ R[SM[m,i,j,m][t]] < 20.},
{-20., -20. < R[SM[m,i,j,m][t]] < 0.}}], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];
Table[RM[pm,i,j,m][t_] := Evaluate[Which[ip'[SM[pm,i,j,m][t]] ≠ 0.,
Evaluate@Piecewise[{{Evaluate[ $\frac{1}{i_p'[S_{M[pm,i,j,m]}[t]}$ ],
Evaluate[Abs[ $\frac{1}{i_p'[S_{M[pm,i,j,m]}[t]}$ ]] ≥ 20.},
{20., 0. ≤ Evaluate[ $\frac{1}{i_p'[S_{M[pm,i,j,m]}[t]}$ ] < 20.},
{-20., -20. < Evaluate[ $\frac{1}{i_p'[S_{M[pm,i,j,m]}[t]}$ ] < 0.}}],
True, 1010]], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];
Table[RM[s,n][t_] := Evaluate[R[SM[s,n][t]], {n, 0, nB};
Table[RM[ps,n][t_] := Evaluate[
Which[ip'[SM[ps,n][t]] ≠ 0., Evaluate@Piecewise[{{Evaluate[ $\frac{1}{i_p'[S_{M[ps,n]}[t]}$ ],
Evaluate[Abs[ $\frac{1}{i_p'[S_{M[ps,n]}[t]}$ ]] ≥ 20.},
{20., 0. ≤ Evaluate[ $\frac{1}{i_p'[S_{M[ps,n]}[t]}$ ] < 20.},
{-20., -20. < Evaluate[ $\frac{1}{i_p'[S_{M[ps,n]}[t]}$ ] < 0.}}], True, 1010]], {n, 0, nB};
RB[t_] := Evaluate[R[SB[t]]];

```

(\*Сила на сцепке и среднее дополнительное сопротивление вагонетки на кривой\*)

$F_c[t_] := m_c x_c''[t];$

$w_{\text{ср}}[t_] := \text{Evaluate}\left[\text{If}\left[n_s == 0, 0, \frac{1}{n_s}\right.\right.$   
 $\left.\left.\left(\sum_{n=1}^{n_s} \left(\text{Piecewise}\left[\left\{\left\{2.23 s_{\text{бс}} \frac{m_s - m_{\text{сп}}}{m_s} \frac{\psi_{\text{гг}}}{\psi_0} \frac{1.}{\text{Abs}[R_{M[s,n]}[t]]}, 20. < \text{Abs}[R_{M[s,n]}[t]] < 1000.\right\},\right.\right.\right.\right.$   
 $\left.\left.\left.\left.0., \text{Abs}[R_{M[s,n]}[t]] \geq 1000.\right\}, \left\{0.0969, \text{Abs}[R_{M[s,n]}[t]] \leq 20.\right\}\right\}\right]\right)\right];$

(\*Если движение прямолинейное\*)

(\* $w_{\text{ср}}[t_] := 0.$  ;\*)

(\*Динамические нагрузки от единичных неровностей пути\*)

(\*От лысок длиной  $l_r$  на колесах\*)

$\text{Table}[N_{M[r,i,n,j]}[t_] :=$

$\text{Evaluate}\left[\left(x_{M[i,n,j]}\right)'[t] \frac{l_r}{2 r} \text{cm} \frac{\text{FractionalPart}\left[\varphi_{M[i,n,j]}[t] + \varphi_{M[i,n,j]} * 10\right]}{2 \pi}\right], \{i,$   
 $2\}, \{n, 2\}, \{j, 2\};$

(\*От проседания рельсов на стыках\*)

$\text{Table}[N_{M[f,i,n,j]}[t_] := \text{Evaluate}\left[\left(x_{M[i,n,j]}\right)'[t] \frac{l_{fL}[S_{M[i,n,j]}[t]]}{2 r} \text{cm},\right.$   
 $\{i, 2\}, \{n, 2\}, \{j, \{1\}\};$

$\text{Table}[N_{M[f,i,n,j]}[t_] := \text{Evaluate}\left[\left(x_{M[i,n,j]}\right)'[t] \frac{l_{fR}[S_{M[i,n,j]}[t]]}{2 r} \text{cm},\right.$   
 $\{i, 2\}, \{n, 2\}, \{j, \{2\}\};$

(\*От ступенек рельсов на стыках\*)

$\text{Table}[N_{M[c,i,n,j]}[t_] := \text{Evaluate}\left[2 \left(x_{M[i,n,j]}\right)'[t] \sqrt{\frac{h_L[S_{M[i,n,j]}[t]]}{1000 \times 2 r}} \text{cm},\right.$   
 $\{i, 2\}, \{n, 2\}, \{j, \{1\}\};$

$\text{Table}[N_{M[c,i,n,j]}[t_] := \text{Evaluate}\left[2 \left(x_{M[i,n,j]}\right)'[t] \sqrt{\frac{h_R[S_{M[i,n,j]}[t]]}{1000 \times 2 r}} \text{cm},\right.$   
 $\{i, 2\}, \{n, 2\}, \{j, \{2\}\};$

(\*От длинных проседаний рельсов. Координаты  $l_{dL}$  и  $l_{dR}$  - точки выхода колес из неровности\*)

Table[N<sub>M[d,i,n,j]</sub>[t\_] := Evaluate[(x<sub>M[i,n,j]</sub>)' [t] i<sub>dcp</sub>  $\frac{l_{dL} [S_{M[i,n,j]} [t]]}{l_{cp}}$  cm<sub>M[i,n,j]</sub>],  
{i, 2}, {n, 2}, {j, {1}}];

Table[N<sub>M[d,i,n,j]</sub>[t\_] := Evaluate[(x<sub>M[i,n,j]</sub>)' [t] i<sub>dcp</sub>  $\frac{l_{dR} [S_{M[i,n,j]} [t]]}{l_{cp}}$  cm<sub>M[i,n,j]</sub>],  
{i, 2}, {n, 2}, {j, {2}}];

(\*От длинных синусоидальных неровностей длиной l<sub>sin</sub> и высотой N<sub>sin</sub>\*)

Table[N<sub>M[s,i,n,j]</sub>[t\_] := Evaluate[N<sub>sin</sub> Sin[ $\frac{2 \pi S_{M[i,n,j]} [t]}{l_{sin}}$ ]], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2};

(\*Реакции рельсов под колесами\*)

Table[N<sub>M[i,n,j]</sub>[t\_] := Evaluate[k<sub>M[g,i,j]</sub>[t]  

$$\left( \left( m_i g_0 + m_k g_0 \left( \frac{1}{2} \cos[\text{ArcTan}[i_{M[p,i]} [t]]] + (-1)^n \sin[\text{ArcTan}[i_{M[p,i]} [t]]] \frac{h_{cs}}{s_k} \right) \right. \right.$$

$$\left. \left( \cos[\text{ArcTan}[i_{M[s,i]} [t]]] + (-1)^j \sin[\text{ArcTan}[i_{M[s,i]} [t]]] \frac{h_{cs}}{s_{M[p,i,n,j]} [t]} \right) \right)$$

$$\left( \frac{1}{2} \cos[\text{ArcTan}[i_{M[p,i]} [t]]] + (-1)^n \sin[\text{ArcTan}[i_{M[p,i]} [t]]] \frac{h_{ct} + r}{s_b} \right)$$

$$\left( \frac{1}{2} \cos[\text{ArcTan}[i_{M[s,i,n,j]} [t]]] + (-1)^j \sin[\text{ArcTan}[i_{M[s,i,n,j]} [t]]] \frac{h_{ct} + r}{s_{M[p,i,n,j]} [t]} \right) -$$

$$(x_i)'' [t] \left( -(-1)^n m_i \frac{h_{ct} + r}{2 s_b} - (-1)^i m_k \frac{h_{cs}}{4 s_k} \right) - \frac{1}{4} \left( m_i + \frac{m_k}{2} \right) \frac{(x_i' [t])^2}{R_{M[p,i,n,j]} [t]} +$$

$$N_{M[r,i,n,j]} [t] + N_{M[f,i,n,j]} [t] + N_{M[c,i,n,j]} [t] + N_{M[d,i,n,j]} [t] +$$

$$N_{M[s,i,n,j]} [t] \}, \{i, \{1\}\}, \{n, 2\}, \{j, 2\};$$

Table[N<sub>M[i,n,j]</sub>[t\_] := Evaluate[k<sub>M[g,i,j]</sub>[t]  

$$\left( \left( m_i g_0 + m_k g_0 \left( \frac{1}{2} \cos[\text{ArcTan}[i_{M[p,i]} [t]]] + (-1)^n \sin[\text{ArcTan}[i_{M[p,i]} [t]]] \frac{h_{cs}}{s_k} \right) \right. \right.$$

$$\left. \left( \cos[\text{ArcTan}[i_{M[s,i]} [t]]] + (-1)^j \sin[\text{ArcTan}[i_{M[s,i]} [t]]] \frac{h_{cs}}{s_{M[p,i,n,j]} [t]} \right) \right)$$

$$\left( \frac{1}{2} \cos[\text{ArcTan}[i_{M[p,i]} [t]]] + (-1)^n \sin[\text{ArcTan}[i_{M[p,i]} [t]]] \frac{h_{ct} + r}{s_b} \right)$$

$$\left( \frac{1}{2} \cos[\text{ArcTan}[i_{M[s,i,n,j]} [t]]] + (-1)^j \sin[\text{ArcTan}[i_{M[s,i,n,j]} [t]]] \frac{h_{ct} + r}{s_{M[p,i,n,j]} [t]} \right) -$$

$$(x_i)'' [t] \left( -(-1)^n m_i \frac{h_{ct} + r}{2 s_b} - (-1)^i m_k \frac{h_{cs}}{4 s_k} \right) + (-1)^n \frac{F_c [t] h_c}{2 s_b} -$$

$$\frac{1}{4} \left( m_i + \frac{m_k}{2} \right) \frac{(x_i' [t])^2}{R_{M[p,i,n,j]} [t]} + N_{M[r,i,n,j]} [t] + N_{M[r,i,n,j]} [t] + N_{M[c,i,n,j]} [t] + N_{M[d,i,n,j]} [t] + N_{M[s,i,n,j]} [t], \{i, \{2\}\}, \{n, 2\}, \{j, 2\}\};$$

(\*Нагрузки на колеса от силы веса локомотива с учетом неровностей\*)

Table[G<sub>M</sub>[i,n,j][t\_] := Evaluate[N<sub>M</sub>[i,n,j][t], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];

(\*Продольное сопротивление движению колес\*)

Table[W<sub>M</sub>[x,i,n,j][t\_] := Evaluate[Piecewise[{{A<sub>k</sub> Sin[Abs[ε<sub>M</sub>[i,n,j][t]]] + B<sub>k</sub> Sin[3 Abs[ε<sub>M</sub>[i,n,j][t]]] + W<sub>0</sub>, (φ<sub>M</sub>[i,n,j])'[t] ≥ 0.}, {A<sub>k</sub> Sin[Abs[ε<sub>M</sub>[i,n,j][t]]] + B<sub>k</sub> Sin[3 Abs[ε<sub>M</sub>[i,n,j][t]]], (φ<sub>M</sub>[i,n,j])'[t] < 0.}}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];

(\*Тормозные силы под колесами\*)

Table[F<sub>M</sub>[i,n,j][t\_] := Evaluate[ψ<sub>M</sub>[i,n,j][t] N<sub>M</sub>[i,n,j][t], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];

(\*Относительные скольжения продольные\*)

Table[ε<sub>M</sub>[t,i][t\_] := Evaluate[Piecewise[{{ $\frac{(x_i)' [t] - r \frac{(\varphi_{M[t,i])' [t]}{u_i}}{(x_i)' [t]}$ , (φ<sub>M</sub>[t,i])'[t] ≥ 0.}, {1, (φ<sub>M</sub>[t,i])'[t] < 0.}}], {i, 2}];

Table[ε<sub>M</sub>[i,n,j][t\_] := Evaluate[Piecewise[{{ $\frac{(x_{M[i,n,j]})' [t] - r (\varphi_{M[i,n,j]})' [t]}{(x_{M[i,n,j]})' [t]}$ , (φ<sub>M</sub>[i,n,j])'[t] ≥ 0.}, {1, (φ<sub>M</sub>[i,n,j])'[t] < 0.}}], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];

(\*Скорость изменения относительных скольжения по t\*)

Table[dε[M[t, i]] := Evaluate[∂<sub>t</sub> ε<sub>M</sub>[t,i][t], {i, 2}];

Table[dε[M[i, n, j]] := Evaluate[∂<sub>t</sub> ε<sub>M</sub>[i,n,j][t], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];

(\*Коэффициенты сцепления колес с рельсами\*)

Table[ψ<sub>M</sub>[g,inj][t\_] := Evaluate[Piecewise[{{ψ<sub>L</sub>[S<sub>inj</sub>[t]], ψ<sub>L</sub>[S<sub>inj</sub>[t]] > 0.01}, {ψ<sub>gg</sub>, ψ<sub>L</sub>[S<sub>inj</sub>[t]] ≤ 0.01}}], {inj, {111, 121, 211, 221}}];

Table[ψ<sub>M</sub>[g,inj][t\_] := Evaluate[Piecewise[{{ψ<sub>R</sub>[S<sub>inj</sub>[t]], ψ<sub>R</sub>[S<sub>inj</sub>[t]] > 0.01}, {ψ<sub>gg</sub>, ψ<sub>R</sub>[S<sub>inj</sub>[t]] ≤ 0.01}}], {inj, {112, 122, 212, 222}}];

Table[ψ<sub>inj\*10</sub>[t\_] := Evaluate[k<sub>gp</sub>  $\frac{\psi_{M[g,inj]} [t]}{\psi_0}$  (-0.016935 (100 ε<sub>inj</sub>[t])<sup>5/11</sup> + 0.195576 Tanh[150 ε<sub>inj</sub>[t]]), {inj, {111, 112, 121, 122, 211, 212, 221, 222}}];

```
Table[ψinj[t_] := Evaluate[(Re[ψinj*10[t]] - Im[ψinj*10[t]])],
  {inj, {111, 112, 121, 122, 211, 212, 221, 222}}];
```

(\*ТОРМОЖЕНИЕ РЕЛЬСОВЫМИ ТОРМОЗАМИ\*)

(\*Коэффициенты использования силы магнитного притяжения магниторельсовых тормозов\*)

```
ки = 1.; кт[t_] := 1.;
```

```
кvm[t_] := Evaluate[Piecewise[{{1. - 0.163866666666666632741211628854216542095 x1'[t] +
  0.093083333333333276837784353574534179643 x1'[t]2 -
  0.039541666666666635021609721434288076125 x1'[t]3 +
  0.00791666666666659274431694370832701679 x1'[t]4 -
  0.0005916666666666080983544295790466094 x1'[t]5,
  Abs[x1'[t]] ≤ 5.}, {0.664, Abs[x1'[t]] > 5.}}];
```

```
кvf[t_] := Evaluate[Piecewise[{{1. - 0.102299999999999969673147859339223941788 x1'[t] +
  0.0714361111111072831114654491102555767 x1'[t]2 -
  0.06977083333333319870028788045601686463 x1'[t]3 +
  0.0267986111111109944760144685460545588 x1'[t]4 -
  0.0044291666666666805629581915582093643 x1'[t]5 +
  0.0002652777777777807001122201135956402 x1'[t]6,
  Abs[x1'[t]] ≤ 6.}, {0.554, Abs[x1'[t]] > 6.}}];
```

```
Table[кM[0,i,j,m][t_] := Evaluate[(Piecewise[{{0.36211165947654072594374952132056932896
  RM[m,i,j,m][t] - 0.06412501192123934434796694858960108832 RM[m,i,j,m][t]2 +
  0.00653593123640969046739268577539405669 RM[m,i,j,m][t]3 -
  0.00042299611124909687609463304625023738 RM[m,i,j,m][t]4 +
  0.00001846993533449202664806741702729909 RM[m,i,j,m][t]5 -
  5.6436690576080558875114723260679 × 10-7 RM[m,i,j,m][t]6 +
  1.230579023380141929493468205478 × 10-8 RM[m,i,j,m][t]7 -
  1.9258687111032664949661004986 × 10-10 RM[m,i,j,m][t]8 +
  2.14667980196928175128973983 × 10-12 RM[m,i,j,m][t]9 -
  1.66301767547618410881328934687904467629647584 × 10-14 RM[m,i,j,m][t]10 +
  8.50727418711390748476484026294841909814549 × 10-17 RM[m,i,j,m][t]11 -
  2.583088019662813385313882135168435071529 × 10-19 RM[m,i,j,m][t]12 +
  3.52462117425673756920311581075821226 × 10-22 RM[m,i,j,m][t]13,
  7 ≤ Abs[RM[m,i,j,m][t]] ≤ 100.}, {1., Abs[RM[m,i,j,m][t]] > 100.},
  {1., Abs[RM[m,i,j,m][t]] < 7.}}) Piecewise[
  {{0.0192006 RM[pm,i,j,m][t] + 0.000505334 RM[pm,i,j,m][t]2 - 0.0000418347 RM[pm,i,j,m][t]3 +
  1.21885 × 10-6 RM[pm,i,j,m][t]4 - 2.12555 × 10-8 RM[pm,i,j,m][t]5 +
  2.52508 × 10-10 RM[pm,i,j,m][t]6 - 2.17599 × 10-12 RM[pm,i,j,m][t]7 +
  1.41337 × 10-14 RM[pm,i,j,m][t]8 - 7.09861 × 10-17 RM[pm,i,j,m][t]9 +
  2.80571 × 10-19 RM[pm,i,j,m][t]10 - 8.83130 × 10-22 RM[pm,i,j,m][t]11 +
  2.23021 × 10-24 RM[pm,i,j,m][t]12 - 4.53486 × 10-27 RM[pm,i,j,m][t]13 +
  7.42409 × 10-30 RM[pm,i,j,m][t]14 - 9.74712 × 10-33 RM[pm,i,j,m][t]15 +
```

```

1.01765 × 10-35 RM[pm, i, j, m] [t]16 - 8.32958 × 10-39 RM[pm, i, j, m] [t]17 +
5.22562 × 10-42 RM[pm, i, j, m] [t]18 - 2.42417 × 10-45 RM[pm, i, j, m] [t]19 +
7.83033 × 10-49 RM[pm, i, j, m] [t]20 - 1.57164 × 10-52 RM[pm, i, j, m] [t]21 +
1.47532 × 10-56 RM[pm, i, j, m] [t]22, Abs[RM[pm, i, j, m] [t] ≤ 211.},
{1., Abs[RM[pm, i, j, m] [t] > 211.}}], {i, 2}, {j, {1}}, {m, 3};
Table[kM[o, i, j, m] [t_] := Evaluate[(Piecewise[{0.36211165947654072594374952132056932896
RM[m, i, j, m] [t] - 0.06412501192123934434796694858960108832 RM[m, i, j, m] [t]2 +
0.00653593123640969046739268577539405669 RM[m, i, j, m] [t]3 -
0.00042299611124909687609463304625023738 RM[m, i, j, m] [t]4 +
0.00001846993533449202664806741702729909 RM[m, i, j, m] [t]5 -
5.6436690576080558875114723260679 × 10-7 RM[m, i, j, m] [t]6 +
1.230579023380141929493468205478 × 10-8 RM[m, i, j, m] [t]7 -
1.9258687111032664949661004986 × 10-10 RM[m, i, j, m] [t]8 +
2.14667980196928175128973983 × 10-12 RM[m, i, j, m] [t]9 -
1.66301767547618410881328934687904467629647584 × 10-14 RM[m, i, j, m] [t]10 +
8.50727418711390748476484026294841909814549 × 10-17 RM[m, i, j, m] [t]11 -
2.583088019662813385313882135168435071529 × 10-19 RM[m, i, j, m] [t]12 +
3.52462117425673756920311581075821226 × 10-22 RM[m, i, j, m] [t]13,
7 ≤ Abs[RM[m, i, j, m] [t] ≤ 100.}, {1., Abs[RM[m, i, j, m] [t] > 100.},
{1., Abs[RM[m, i, j, m] [t] < 7.}}] Piecewise[
{0.0192006 RM[pm, i, j, m] [t] + 0.000505334 RM[pm, i, j, m] [t]2 - 0.0000418347 RM[pm, i, j, m] [t]3 +
1.21885 × 10-6 RM[pm, i, j, m] [t]4 - 2.12555 × 10-8 RM[pm, i, j, m] [t]5 +
2.52508 × 10-10 RM[pm, i, j, m] [t]6 - 2.17599 × 10-12 RM[pm, i, j, m] [t]7 +
1.41337 × 10-14 RM[pm, i, j, m] [t]8 - 7.09861 × 10-17 RM[pm, i, j, m] [t]9 +
2.80571 × 10-19 RM[pm, i, j, m] [t]10 - 8.83130 × 10-22 RM[pm, i, j, m] [t]11 +
2.23021 × 10-24 RM[pm, i, j, m] [t]12 - 4.53486 × 10-27 RM[pm, i, j, m] [t]13 +
7.42409 × 10-30 RM[pm, i, j, m] [t]14 - 9.74712 × 10-33 RM[pm, i, j, m] [t]15 +
1.01765 × 10-35 RM[pm, i, j, m] [t]16 - 8.32958 × 10-39 RM[pm, i, j, m] [t]17 +
5.22562 × 10-42 RM[pm, i, j, m] [t]18 - 2.42417 × 10-45 RM[pm, i, j, m] [t]19 +
7.83033 × 10-49 RM[pm, i, j, m] [t]20 - 1.57164 × 10-52 RM[pm, i, j, m] [t]21 +
1.47532 × 10-56 RM[pm, i, j, m] [t]22, Abs[RM[pm, i, j, m] [t] ≤ 211.},
{1., Abs[RM[pm, i, j, m] [t] > 211.}}], {i, 2}, {j, {2}}, {m, 3};

```

```

Table[kM[c, i, j, m] [t_] := Evaluate[1. -
2.2299028709846107077 hL[SM[m, i, j, m] [t]] + 2.3323266667256712381 hL[SM[m, i, j, m] [t]]2 -
1.4023736567649087714 hL[SM[m, i, j, m] [t]]3 + 0.5274123208942220753 hL[SM[m, i, j, m] [t]]4 -
0.1293977532506817851 hL[SM[m, i, j, m] [t]]5 + 0.0210365765267863693 hL[SM[m, i, j, m] [t]]6 -
0.0022471055332969328 hL[SM[m, i, j, m] [t]]7 + 0.0001515766513125927 hL[SM[m, i, j, m] [t]]8 -
5.85283897266429111523774 × 10-6 hL[SM[m, i, j, m] [t]]9 +
9.857447825161269203162 × 10-8 hL[SM[m, i, j, m] [t]]10], {i, 2}, {j, {1}}, {m, 3};

```

Table  $[k_{M[c,i,j,m]}[t_] := \text{Evaluate}[1. - 2.2299028709846107077 h_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]] +$   
 $2.3323266667256712381 h_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^2 -$   
 $1.4023736567649087714 h_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^3 + 0.5274123208942220753 h_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^4 -$   
 $0.1293977532506817851 h_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^5 + 0.0210365765267863693 h_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^6 -$   
 $0.0022471055332969328 h_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^7 + 0.0001515766513125927 h_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^8 -$   
 $5.85283897266429111523774 \times 10^{-6} h_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^9 +$   
 $9.857447825161269203162 \times 10^{-8} h_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^{10}], \{i, 2\}, \{j, \{2\}\}, \{m, 3\}];$

Table  $[k_{M[f,i,j,m]}[t_] := \text{Evaluate}[1. -$   
 $0.9780934654293503838 H_{\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]] + 0.5036345711840775063 H_{\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^2 -$   
 $0.1544429042268276597 H_{\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^3 + 0.0294153004866659143 H_{\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^4 -$   
 $0.0034940156307831515 H_{\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^5 + 0.0002509903539446298 H_{\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^6 -$   
 $9.95573489642641309906208 \times 10^{-6} H_{\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^7 +$   
 $1.671552523530817974849 \times 10^{-7} H_{\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^8], \{i, 2\}, \{j, \{1\}\}, \{m, 3\}];$

Table  $[k_{M[f,i,j,m]}[t_] := \text{Evaluate}[1. - 0.9780934654293503838 H_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]] +$   
 $0.5036345711840775063 H_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^2 -$   
 $0.1544429042268276597 H_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^3 + 0.0294153004866659143 H_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^4 -$   
 $0.0034940156307831515 H_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^5 + 0.0002509903539446298 H_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^6 -$   
 $9.95573489642641309906208 \times 10^{-6} H_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^7 +$   
 $1.671552523530817974849 \times 10^{-7} H_{\mathcal{R}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^8], \{i, 2\}, \{j, \{2\}\}, \{m, 3\}];$

Table  $[k_{M[d,i,j,m]}[t_] :=$   
 $\text{Evaluate}[\text{Piecewise}[\{\{0.0048881367521367482 R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]] + 0.0005242019373219377$   
 $R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^2 - 0.00001604394757834759038502351 R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^3 +$   
 $1.8141501994302012670731 \times 10^{-7} R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^4 -$   
 $7.1763874643874709449 \times 10^{-10} R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^5,$   
 $10. \leq \text{Abs}[R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]] \leq 25.\}, \{1, \text{Abs}[R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]] > 25.\},$   
 $\{1, \text{Abs}[R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]] < 10.\}\}], \{i, 2\}, \{j, \{1\}\}, \{m, 3\}];$

Table  $[k_{M[d,i,j,m]}[t_] := \text{Evaluate}[\text{Piecewise}[\{\{0.0048881367521367482 R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]] +$   
 $0.0005242019373219377 R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^2 -$   
 $0.00001604394757834759038502351 R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^3 + 1.8141501994302012670731 \times$   
 $10^{-7} R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^4 - 7.1763874643874709449 \times 10^{-10} R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]^5,$   
 $10. \leq \text{Abs}[R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]] \leq 25.\}, \{1, \text{Abs}[R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]] > 25.\},$   
 $\{1, \text{Abs}[R_{d\mathcal{L}}[S_{M[m,i,j,m]}[t]]] < 10.\}\}], \{i, 2\}, \{j, \{2\}\}, \{m, 3\}];$

(\*Если движение прямолинейное\*)

```

(*Table[kM[0,i,j,m] [t_] := 1., {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];*)

(*Углы установки и поперечные относительные скольжения рельсовых тормозов*)
tM = 1.5; (*Время холостого хода магниторельсового тормоза*)
tG = 1.5; (*Время холостого хода гравитационного рельсового тормоза*)

Table[σM[m,i,j,m] [t_] := Evaluate[ArcTan[ $\frac{a_m + (L + 1) (m - 1) + a_1 [t]}{\text{Abs}[R_i [t]] - (-1)^j \left(\frac{SP}{2}\right)}$ ]],
  {i, {1}}, {j, 2}, {m, 3}]; Table[
  σM[m,i,j,m] [t_] := Evaluate[ArcTan[ $\frac{a_m + (L + 1) (m - 1) - a_1 [t]}{\text{Abs}[R_i [t]] - (-1)^j \left(\frac{SP}{2}\right)}$ ]], {i, {2}}, {j, 2}, {m, 3}];

Table[εM[ym,i,j,m] [t_] := Evaluate[ZM[i,j,m] [t] Sin[σM[m,i,j,m] [t]]], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];

(*Силы и поперечные сопротивления движению на рельсовых тормозах*)
Am := Evaluate[ $\frac{4 (F_m + \alpha_{ck} \delta_{max})}{\pi^2 \text{Sin}\left[\frac{\pi F_m}{F_m + \alpha_{ck} \delta_{max}}\right]}$ ];
Bm := Evaluate[ $\frac{4 (F_m + \alpha_{ck} \delta_{max})}{9 \pi^2 \text{Sin}\left[\frac{3 \pi F_m}{F_m + \alpha_{ck} \delta_{max}}\right]}$ ];

condZpm1 = (t ≥ tm + tM);
condZpm2 = (t ≥ tm + tM + txx);
condZpm3 = (t ≥ tm + tM + 2. txx);

funPM[PM_] :=
  Switch[PM,
    0, Table[ZM[i,j,m] [t_] := Evaluate[Piecewise[{{0, condZpm1}}]], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];
    Table[WM[ym,i,j,m] [t_] := Evaluate[Piecewise[{{0, condZpm1}}]],
      {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}],
    1, funPM[0]; Table[ZM[i,j,m] [t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm1}}]],
      {i, {1}}, {j, 2}, {m, {1}}]; Table[WM[ym,i,j,m] [t_] :=
      Evaluate[Piecewise[{{Am Sin[εM[ym,i,j,m] [t]] + Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m] [t]], condZpm1}}]],
      {i, {1}}, {j, 2}, {m, {1}}],
    2, funPM[0]; Table[ZM[i,j,m] [t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm1}}]],
      {i, {1}}, {j, 2}, {m, {1}}]; Table[
      ZM[i,j,m] [t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm2}}]], {i, {1}}, {j, 2}, {m, {2}}];
    Table[WM[ym,i,j,m] [t_] := Evaluate[
      Piecewise[
        {{Am Sin[εM[ym,i,j,m] [t]] + Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m] [t]], condZpm1}}]],
      {i, {1}}, {j, 2}, {m, {1}}]; Table[WM[ym,i,j,m] [t_] :=
      Evaluate[Piecewise[{{Am Sin[εM[ym,i,j,m] [t]] + Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m] [t]], condZpm2}}]],

```

```

    {i, {1}}, {j, 2}, {m, {2}}],
3, funPM[0]; Table[ZM[i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm1}}]],
    {i, {1}}, {j, 2}, {m, {1}}]; Table[
    ZM[i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm2}}]], {i, {1}}, {j, 2}, {m, {2}}];
Table[ZM[i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm3}}]],
    {i, {1}}, {j, 2}, {m, {3}}];
Table[WM[ym,i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[
    {{Am Sin[εM[ym,i,j,m][t]] + Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m][t]], condZpm1}}]],
    {i, {1}}, {j, 2}, {m, {1}}]; Table[WM[ym,i,j,m][t_] :=
    Evaluate[Piecewise[{{Am Sin[εM[ym,i,j,m][t]] + Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m][t]], condZpm2}}]],
    {i, {1}}, {j, 2}, {m, {2}}];
Table[WM[ym,i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{Am Sin[εM[ym,i,j,m][t]] +
    Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m][t]], condZpm3}}]], {i, {1}}, {j, 2}, {m, {3}}],
4, funPM[0]; Table[ZM[i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm1}}]],
    {i, 2}, {j, 2}, {m, {1}}]; Table[WM[ym,i,j,m][t_] :=
    Evaluate[Piecewise[{{Am Sin[εM[ym,i,j,m][t]] + Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m][t]], condZpm1}}]],
    {i, 2}, {j, 2}, {m, {1}}],
5, funPM[0]; Table[ZM[i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm1}}]],
    {i, 2}, {j, 2}, {m, {1}}]; Table[
    ZM[i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm2}}]], {i, 2}, {j, 2}, {m, {2}}];
Table[WM[ym,i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[
    {{Am Sin[εM[ym,i,j,m][t]] + Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m][t]], condZpm1}}]],
    {i, 2}, {j, 2}, {m, {1}}]; Table[WM[ym,i,j,m][t_] :=
    Evaluate[Piecewise[{{Am Sin[εM[ym,i,j,m][t]] + Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m][t]], condZpm2}}]],
    {i, 2}, {j, 2}, {m, {2}}],
6, funPM[0]; Table[ZM[i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm1}}]],
    {i, 2}, {j, 2}, {m, {1}}]; Table[
    ZM[i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm2}}]], {i, 2}, {j, 2}, {m, {2}}];
Table[ZM[i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condZpm3}}]],
    {i, 2}, {j, 2}, {m, {3}}];
Table[WM[ym,i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[
    {{Am Sin[εM[ym,i,j,m][t]] + Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m][t]], condZpm1}}]],
    {i, 2}, {j, 2}, {m, {1}}]; Table[WM[ym,i,j,m][t_] :=
    Evaluate[Piecewise[{{Am Sin[εM[ym,i,j,m][t]] + Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m][t]], condZpm2}}]],
    {i, 2}, {j, 2}, {m, {2}}];
Table[WM[ym,i,j,m][t_] := Evaluate[Piecewise[{{Am Sin[εM[ym,i,j,m][t]] +
    Bm Sin[3 εM[ym,i,j,m][t]], condZpm3}}]], {i, 2}, {j, 2}, {m, {3}}],
_, Null];
funPM[PM];

Table[FM[n,i,j,m][t_] := Evaluate[ZM[i,j,m][t] Fny0 lm kym[t] Abs[kM[o,i,j,m][t]]
    kM[e,i,j,m][t] kM[f,i,j,m][t] kM[d,i,j,m][t] ku kr[t]], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];
Table[FM[m,i,j,m][t_] := Evaluate[ZM[i,j,m][t] FM[n,i,j,m][t] fm[t]], {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}];

```

```

Table[ $\epsilon_{M[yg,i,j]}[t\_]$  := Evaluate[ $\frac{\text{Sin}[\sigma_{M[i,1,j]}[t]] + \text{Sin}[\sigma_{M[i,2,j]}[t]]}{2}$ ], {i, 2}, {j, 2}];

Ag := Evaluate[ $\frac{4 (Fg + \alpha_{ck} \delta_{max})}{\pi^2 \text{Sin}[\frac{\pi Fg}{Fg + \alpha_{ck} \delta_{max}}]}$ ];

Bg := Evaluate[ $\frac{4 (Fg + \alpha_{ck} \delta_{max})}{9 \pi^2 \text{Sin}[\frac{3 \pi Fg}{Fg + \alpha_{ck} \delta_{max}}]}$ ];

tGcmax = 1.5;
tGc = tGcmax (1 - kgmax);
condKpg = (t ≥ tm + tG + tGc);

funPG[PG_] :=
Switch[PG,
0, Table[kM[g,i,j][t_] := Evaluate[Piecewise[{{1, condKpg}}, 1]], {i, 2}, {j, 2}];
Table[WM[yg,i,j][t_] := Evaluate[Piecewise[{{0, condKpg}}]], {i, 2}, {j, 2},
1, funPG[0];
Table[kM[g,i,j][t_] := Evaluate[Piecewise[{{ $\frac{-t + tG + tGc + tm + (t - tG - tm) k_{gmax}}{tGc}$ ,
tm + tG ≤ t ≤ tm + tG + tGc}, {kgmax, condKpg}}, 1]],
{i, {1}}, {j, 2}]; Table[WM[yg,i,j][t_] := Evaluate[Piecewise[
{{Ag Sin[ $\epsilon_{M[yg,i,j]}[t]$ ] + Bg Sin[3  $\epsilon_{M[yg,i,j]}[t]$ ], condKpg}}]], {i, {1}}, {j, 2}],
2, funPG[0]; Table[kM[g,i,j][t_] := Evaluate[Piecewise[
{{ $\frac{-t + tG + tGc + tm + (t - tG - tm) k_{gmax}}{tGc}$ , tm + tG ≤ t ≤ tm + tG + tGc}, {kgmax, condKpg}},
1]], {i, {2}}, {j, 2}]; Table[WM[yg,i,j][t_] :=
Evaluate[Piecewise[{{Ag Sin[ $\epsilon_{M[yg,i,j]}[t]$ ] + Bg Sin[3  $\epsilon_{M[yg,i,j]}[t]$ ], condKpg}}]], {i,
{2}}, {j, 2}],
3, funPG[0]; Table[kM[g,i,j][t_] := Evaluate[Piecewise[
{{ $\frac{-t + tG + tGc + tm + (t - tG - tm) k_{gmax}}{tGc}$ , tm + tG ≤ t ≤ tm + tG + tGc}, {kgmax, condKpg}},
1]], {i, 2}, {j, 2}]; Table[WM[yg,i,j][t_] := Evaluate[Piecewise[
{{Ag Sin[ $\epsilon_{M[yg,i,j]}[t]$ ] + Bg Sin[3  $\epsilon_{M[yg,i,j]}[t]$ ], condKpg}}]], {i, 2}, {j, 2},
_, Null];
funPG[PG];

```

```
Table[FM[g,i,j][t_] := Evaluate[
  (mi +  $\frac{m_k}{2}$ ) (  $\frac{1}{2}$  Cos[ArcTan[iM[sg,i,j][t]]] + (-1)j Sin[ArcTan[iM[sg,i,j][t]]] )  $\frac{h_{ct} + r}{s_{M[pg,i,j]}[t]}$  )
  g0 (1 - kM[g,i,j][t]) fg[t], {i, 2}, {j, 2}];
```

(\*КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ\*)

```
Table[φM[i,n][t_] := Evaluate[ψM[i,n][t]], {i, 2}, {n, 2};
Table[uM[i,n][t_] := Evaluate[sM[p,i,n][t] - skk], {i, 2}, {n, 2};
Table[ai[t_] := Evaluate[
```

```
  Piecewise[{{0, M[YY, i] == 0}},  $\frac{(u_{M[i,1]}[t] + u_{M[i,2]}[t]) \text{Abs}[R_i[t]]}{2 s_b}$ ]], {i, 2}];
γ0 = ArcSin[  $\frac{\sqrt{\frac{2(c-r_p)(1-\text{Cos}[\delta_0])}{r+c}}}{\text{Tan}[\delta_0]}$  ];
```

(\*Условие образования направляющих силы колес\*)

```
Table[iccM[s,i][t_] :=
  Evaluate[Piecewise[{{iM[s,i][t], Ri[t] ≥ 0.}, {-iM[s,i][t], Ri[t] < 0.}}]], {i, 2}];
(*Table[vM[cc,i][t_] := Evaluate[Piecewise[
```

```
  {{  $\sqrt{g_0 \text{Abs}[R_i[t]] \frac{f_0 + icc_{M[s,i]}[t]}{1 - f_0 icc_{M[s,i]}[t]}}$  ; If[  $\sqrt{g_0 \text{Abs}[R_i[t]] \frac{f_0 + icc_{M[s,i]}[t]}{1 - f_0 icc_{M[s,i]}[t]}} \leq 0.$  ,
    Print["Произошло поперечное опрокидывание поезда"], None],
    Abs[Ri[t]] < 1000.}, {100., Abs[Ri[t]] ≥ 1000.} }]], {i, 2}]; *)
```

```
Table[vM[cc,i][t_] := Evaluate[Piecewise[{{If[  $\sqrt{g_0 \text{Abs}[R_i[t]] \frac{f_0 + icc_{M[s,i]}[t]}{1 - f_0 icc_{M[s,i]}[t]}} \leq 0.$  ,
    Print["Произошло поперечное опрокидывание поезда"]];
     $\sqrt{g_0 \text{Abs}[R_i[t]] \frac{f_0 + icc_{M[s,i]}[t]}{1 - f_0 icc_{M[s,i]}[t]}}$  , Abs[Ri[t]] < 1000.},
    {100., Abs[Ri[t]] ≥ 1000.} }]], {i, 2}];
```

(\*Направляющие силы на дорожки катания колес\*)

```
Table[PM[i,n,j][t_] := Evaluate[(-1)j (-μ NM[i,n,j][t])], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
```

(\*Коэффициенты устойчивости по взползанию колес на рельсы\*)

```
Table[KM[ys,i,n,j][t_] :=
```

```

Evaluate[Piecewise[{{50., YM[i,n,j][t] == 0}},  $\frac{N_{M[i,n,j][t] \tan[\delta_0 - f_0]}{\text{Abs}[Y_{M[i,n,j][t]} (1 + f_0 \tan[\delta_0])}]$ ]], {i,
2}, {n, 2}, {j, 2}];

(*Поперечное сопротивление по ребордам колес*)
Table[WM[p,i,n,j][t_] :=
  Evaluate[Piecewise[{{1.0001, YM[i,n,j][t] == 0}},  $\frac{\lambda_{M[i,n,j][t]} A_p \sin[\text{Cot}[\beta_{M[i,n,j][t]}]] + B_p \sin[3 \text{Cot}[\beta_{M[i,n,j][t]}]]}{r}$ ]], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
Ap := Evaluate[ $\frac{4 (Y f_0 \sin[\delta_0] + \alpha_{ck} \delta_{max})}{\pi^2 \sin[\frac{\pi Y f_0}{Y f_0 + \alpha_{ck} \delta_{max}}]}$ ];
Bp := Evaluate[ $\frac{4 (Y f_0 \sin[\delta_0] + \alpha_{ck} \delta_{max})}{9 \pi^2 \sin[\frac{3 \pi Y f_0}{Y f_0 + \alpha_{ck} \delta_{max}}]}$ ];

Table[βM[i,n,j][t_] :=
  Evaluate[Piecewise[{{0., YM[i,n,j][t] == 0}}, ArcCos[Sin[YM[i,n,j][t] Tan[δ0]]]], {i,
2}, {n, 2}, {j, 2}];
Table[λM[i,n,j][t_] := Evaluate[Piecewise[{{0., YM[i,n,j][t] == 0}},
(r + c) Sin[YM[i,n,j][t] Tan[δ0]]], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];

(*Относительные скольжения поперечные*)
Table[εM[y,i,n,j][t_] := Evaluate[Sin[σM[i,n,j][t]]], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];

(*Поперечное сопротивление движению колес*)
Table[WM[y,i,n,j][t_] := Evaluate[Ak Sin[εM[y,i,n,j][t]] + Bk Sin[3 εM[y,i,n,j][t]]],
{i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];

(*Скорость срыва сцепления -
перехода экипажа тяговой секции в хордовое положение YY=1 или YY=11*)
YY1 := Evaluate[Piecewise[
{0, Abs[R1[t]] ≥ 1000},
{3, 0. ≤ R1[t] < 1000. && 0. ≤ x1'[t] ≤ vcc1[t]},
{2, 0. > R1[t] > -1000. && 0. ≤ x1'[t] ≤ vcc1[t]},
{1, 0. ≤ R1[t] < 1000. && x1'[t] > vcc1[t]},
{1, 0. > R1[t] > -1000. && x1'[t] > vcc1[t]},
{11, 0. ≤ R1[t] < 1000. && -vcc1[t] < x1'[t] ≤ 0.},
{11, 0. > R1[t] > -1000. && -vcc1[t] < x1'[t] ≤ 0.}]];
YY2 := Evaluate[Piecewise[
{0, Abs[R2[t]] ≥ 1000.},
{2, 0. ≤ R2[t] < 1000. && 0. ≤ x2'[t] ≤ vcc2[t]},
{3, 0. > R2[t] > -1000. && 0. ≤ x2'[t] ≤ vcc2[t]},
{1, 0. ≤ R2[t] < 1000. && x2'[t] > vcc2[t]},

```

```
{1, 0. > R2[t] > -1000. && x2'[t] > vcc2[t]},
{11, 0. ≤ R2[t] < 1000. && -vcc2[t] < x1'[t] ≤ 0.},
{11, 0. > R2[t] > -1000. && -vcc2[t] < x1'[t] ≤ 0.}}];
```

(\*Углы набегания и установки колес\*)

```
Table[γM[i,n,j][t_] := Evaluate[Which[
  i == 1,
  Evaluate[Switch[YY1,
    0, 0.,
    1, Evaluate[ArcSin[ $\frac{\frac{s_b}{2}}{\text{Abs}[R_i[t]] - (r+c) \text{Tan}[\delta_0] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}}$ ]],
    11, Evaluate[ArcSin[ $\frac{\frac{s_b}{2}}{\text{Abs}[R_i[t]] - (r+c) \text{Tan}[\delta_0] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}}$ ]],
    2, Evaluate[Piecewise[{{#1, γ0 > #1}, {#2, γ0 ≤ #1}}, Null] & [
      Evaluate[ArcSin[ $\frac{\frac{s_b}{2} + (-1)^n a_i[t]}{\text{Abs}[R_i[t]] - (r+c) \text{Tan}[\delta_0] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}}$ ]],
      Evaluate[ArcSin[ $\frac{\frac{s_b}{2} + (-1)^n a_i[t] + (r+c) \text{Tan}[\delta_0] \text{Sin}[\gamma_0]}{\text{Abs}[R_i[t]] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}}$ ]]]]],
    3, Evaluate[Piecewise[{{#1, γ0 > #1}, {#2, γ0 ≤ #1}}, Null] & [
      Evaluate[ArcSin[ $\frac{\frac{s_b}{2} - (-1)^n a_i[t]}{\text{Abs}[R_i[t]] - (r+c) \text{Tan}[\delta_0] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}}$ ]],
      Evaluate[ArcSin[ $\frac{\frac{s_b}{2} - (-1)^n a_i[t] + (r+c) \text{Tan}[\delta_0] \text{Sin}[\gamma_0]}{\text{Abs}[R_i[t]] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}}$ ]]]]]]],
  i == 2,
  Evaluate[Switch[YY2,
    0, 0.,
    1, Evaluate[ArcSin[ $\frac{\frac{s_b}{2}}{\text{Abs}[R_i[t]] - (r+c) \text{Tan}[\delta_0] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}}$ ]],
    11, Evaluate[ArcSin[ $\frac{\frac{s_b}{2}}{\text{Abs}[R_i[t]] - (r+c) \text{Tan}[\delta_0] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}}$ ]],
    2, Evaluate[Piecewise[{{#1, γ0 > #1}, {#2, γ0 ≤ #1}}, Null] & [
```

Evaluate  $\left[ \text{ArcSin} \left[ \frac{\frac{s_b}{2} + (-1)^n a_i[t]}{\text{Abs}[R_i[t]] - (r+c) \text{Tan}[\delta_0] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}} \right] \right],$   
 Evaluate  $\left[ \text{ArcSin} \left[ \frac{\frac{s_b}{2} + (-1)^n a_i[t] + (r+c) \text{Tan}[\delta_0] \text{Sin}[\gamma_0]}{\text{Abs}[R_i[t]] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}} \right] \right] \right],$   
 3, Evaluate  $\left[ \text{Piecewise}[\{\{ \#1, \gamma_0 > \#1 \}, \{ \#2, \gamma_0 \leq \#1 \}\}, \text{Null}] \& \left[ \right.$   
 Evaluate  $\left[ \text{ArcSin} \left[ \frac{\frac{s_b}{2} - (-1)^n a_i[t]}{\text{Abs}[R_i[t]] - (r+c) \text{Tan}[\delta_0] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}} \right] \right],$  Evaluate  $\left[ \text{ArcSin} \left[ \right.$   
 $\left. \frac{\frac{s_b}{2} - (-1)^n a_i[t] + (r+c) \text{Tan}[\delta_0] \text{Sin}[\gamma_0]}{\text{Abs}[R_i[t]] - (-1)^j \frac{u_{M[i,n]}[t]}{2}} \right] \right] \right] \right] \right], \{i, 2\}, \{n, 2\}, \{j, 2\};$

Table  $\left[ \sigma_{M[i,n,j]}[t_] := \text{Evaluate} \left[ \text{Which} \left[ \right. \right.$   
 $i == 1,$   
 Evaluate  $\left[ \text{Switch} \left[ \text{YY1}, \right. \right.$   
 $0, 0.,$   
 $1, \text{Evaluate} \left[ \text{ArcTan} \left[ \frac{\frac{s_b}{2}}{\text{Abs}[R_i[t]] - (-1)^j \left( \frac{sp - (-1)^j u_{M[i,n]}[t]}{2} \right)} \right] \right],$   
 $11, \text{Evaluate} \left[ \text{ArcTan} \left[ \frac{\frac{s_b}{2}}{\text{Abs}[R_i[t]] - (-1)^j \left( \frac{sp - (-1)^j u_{M[i,n]}[t]}{2} \right)} \right] \right],$   
 $2, \text{Evaluate} \left[ \text{ArcTan} \left[ \frac{\frac{s_b}{2} + (-1)^n a_i[t]}{\text{Abs}[R_i[t]] - (-1)^j \left( \frac{sp - (-1)^j u_{M[i,n]}[t]}{2} \right)} \right] \right],$   
 $3, \text{Evaluate} \left[ \text{ArcTan} \left[ \frac{\frac{s_b}{2} - (-1)^n a_i[t]}{\text{Abs}[R_i[t]] - (-1)^j \left( \frac{sp - (-1)^j u_{M[i,n]}[t]}{2} \right)} \right] \right] \right] \right],$   
 $i == 2,$   
 Evaluate  $\left[ \text{Switch} \left[ \text{YY2}, \right. \right.$   
 $0, 0.,$   
 $1, \text{Evaluate} \left[ \text{ArcTan} \left[ \frac{\frac{s_b}{2}}{\text{Abs}[R_i[t]] - (-1)^j \left( \frac{sp - (-1)^j u_{M[i,n]}[t]}{2} \right)} \right] \right],$   
 $11, \text{Evaluate} \left[ \text{ArcTan} \left[ \frac{\frac{s_b}{2}}{\text{Abs}[R_i[t]] - (-1)^j \left( \frac{sp - (-1)^j u_{M[i,n]}[t]}{2} \right)} \right] \right],$

$$2, \text{ Evaluate} \left[ \text{ArcTan} \left[ \frac{\frac{s_n}{2} + (-1)^n a_i [t]}{\text{Abs} [R_i [t]] - (-1)^j \left( \frac{sp - (-1)^j u_{M[i,n]} [t]}{2} \right)} \right] \right],$$

$$3, \text{ Evaluate} \left[ \text{ArcTan} \left[ \frac{\frac{s_n}{2} - (-1)^n a_i [t]}{\text{Abs} [R_i [t]] - (-1)^j \left( \frac{sp - (-1)^j u_{M[i,n]} [t]}{2} \right)} \right] \right] \right] \right],$$

{i, 2}, {n, 2}, {j, 2};

(\*Направляющие силы на ребордах колес\*)

```
Table[YM[i,n,j][t_] := Evaluate[Which[
  i == 1,
  Evaluate[Switch[YY1,
    0, 0,
    1, Evaluate[Which[
      n == 1 && j == 1,
      Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛(mi +  $\frac{m_k}{2}$ ) ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_0 i_{M[s,i,n,j]}[t]$ ⎞⎞⎞ Sin[δ0⎞⎞⎞],
      n == 1 && j == 2, 0,
      n == 2 && j == 1,
      Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛(mi +  $\frac{m_k}{2}$ ) ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_0 i_{M[s,i,n,j]}[t]$ ⎞⎞⎞ Sin[δ0⎞⎞⎞],
      n == 2 && j == 2, 0]]],
  11, Evaluate[Which[
    n == 1 && j == 1, 0,
    n == 1 && j == 2,
    Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛(mi +  $\frac{m_k}{2}$ ) ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_0 i_{M[s,i,n,j]}[t]$ ⎞⎞⎞ Sin[δ0⎞⎞⎞],
    n == 2 && j == 1, 0,
    n == 2 && j == 2,
    Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛(mi +  $\frac{m_k}{2}$ ) ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_0 i_{M[s,i,n,j]}[t]$ ⎞⎞⎞ Sin[δ0⎞⎞⎞]]],
  2, Evaluate[Which[
    n == 1 && j == 1, 0,
    n == 1 && j == 2,
    Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛(mi +  $\frac{m_k}{2}$ ) ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_0 i_{M[s,i,n,j]}[t]$ ⎞⎞⎞ Sin[δ0⎞⎞⎞],
    n == 2 && j == 1, Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛(mi +  $\frac{m_k}{2}$ ) ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_0 i_{M[s,i,n,j]}[t]$ ⎞⎞⎞]]]
```

```

Sin[δ0]]],
n == 2 && j == 2, 0]],
3, Evaluate[Which[
n == 1 && j == 1,
Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛mi +  $\frac{m_k}{2}$ ⎞⎞ ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_{0 i_{M[s,i,n,j]}[t]}$ ⎞⎞ Sin[δ0]]],
n == 1 && j == 2, 0,
n == 2 && j == 1, 0,
n == 2 && j == 2,
Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛mi +  $\frac{m_k}{2}$ ⎞⎞ ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_{0 i_{M[s,i,n,j]}[t]}$ ⎞⎞ Sin[δ0]]]]]],
i = 2,
Evaluate[Switch[YY2,
0, 0,
1, Evaluate[Which[
n == 1 && j == 1,
Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛mi +  $\frac{m_k}{2}$ ⎞⎞ ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_{0 i_{M[s,i,n,j]}[t]}$ ⎞⎞ Sin[δ0]]],
n == 1 && j == 2, 0.,
n == 2 && j == 1,
Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛mi +  $\frac{m_k}{2}$ ⎞⎞ ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_{0 i_{M[s,i,n,j]}[t]}$ ⎞⎞ Sin[δ0]]],
n == 2 && j == 2, 0.]]],
11, Evaluate[Which[
n == 1 && j == 1, 0.,
n == 1 && j == 2,
Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛mi +  $\frac{m_k}{2}$ ⎞⎞ ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_{0 i_{M[s,i,n,j]}[t]}$ ⎞⎞ Sin[δ0]]],
n == 2 && j == 1, 0.,
n == 2 && j == 2,
Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛mi +  $\frac{m_k}{2}$ ⎞⎞ ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_{0 i_{M[s,i,n,j]}[t]}$ ⎞⎞ Sin[δ0]]]]],
2, Evaluate[Which[
n == 1 && j == 1, 0.,
n == 1 && j == 2,
Evaluate[-(-1)j ⎛⎛⎛mi +  $\frac{m_k}{2}$ ⎞⎞ ⎛ $\frac{(x_i'[t])^2}{\text{Abs}[R_i[t]]} - g_{0 i_{M[s,i,n,j]}[t]}$ ⎞⎞ Sin[δ0]]],

```

```

n == 2 && j == 1, Evaluate [ - (-1)^j ( ( (m_i + m_k) / 2 ) ( (x_i' [t])^2 / Abs[R_i [t]] - g_0 i_{M[s,i,n,j]} [t] ) ) Sin[delta_0] ] ,
Sin[delta_0] ] ,
n == 2 && j == 2, 0. ] ] ,
3, Evaluate [ Which [
n == 1 && j == 1,
Evaluate [ - (-1)^j ( ( (m_i + m_k) / 2 ) ( (x_i' [t])^2 / Abs[R_i [t]] - g_0 i_{M[s,i,n,j]} [t] ) ) Sin[delta_0] ] ,
n == 1 && j == 2, 0. ,
n == 2 && j == 1, 0. ,
n == 2 && j == 2, Evaluate [ - (-1)^j ( ( (m_i + m_k) / 2 ) ( (x_i' [t])^2 / Abs[R_i [t]] - g_0 i_{M[s,i,n,j]} [t] ) ) Sin[delta_0] ] ] ] ] ] ] ] , {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];

```

(\*Углы наклона сцепки между второй тяговой секцией локомотива и первым вагоном состава вагонеток\*)

```

alpha_cg[t_] := Evaluate [ If [ n_s == 0, 0, Piecewise [ { { 12.616058679742675 / (R_2 [t] + R_{M[s,1]} [t]) / 2.,
20. <= Abs [ (R_2 [t] + R_{M[s,1]} [t]) / 2. ] < 1000. }, { 0., Abs [ (R_2 [t] + R_{M[s,1]} [t]) / 2. ] >= 1000. },
{ 0.6361725123519332, Abs [ (R_2 [t] + R_{M[s,1]} [t]) / 2. ] < 20. } } ] ] ] ;
alpha_cv[t_] := Evaluate [ If [ n_s == 0, 0, Piecewise [ { { 13.255520965687491 / (R_{p2} [t] + R_{M[pS,1]} [t]) / 2.,
20. <= Abs [ (R_{p2} [t] + R_{M[pS,1]} [t]) / 2. ] < 1000. }, { 0., Abs [ (R_{p2} [t] + R_{M[pS,1]} [t]) / 2. ] >= 1000. },
{ 0.667291732914992, Abs [ (R_{p2} [t] + R_{M[pS,1]} [t]) / 2. ] < 20. } } ] ] ] ;
c_cx := c_c Cos [ Abs [ alpha_cg [t] ] ] ; beta_cx := beta_c Cos [ Abs [ alpha_cg [t] ] ] ;
c_cy := c_c Sin [ Abs [ alpha_cg [t] ] ] ; beta_cy := beta_c Sin [ Abs [ alpha_cg [t] ] ] ;
c_cz := c_c Sin [ Abs [ alpha_cv [t] ] ] ; beta_cz := beta_c Sin [ Abs [ alpha_cv [t] ] ] ;

```

(\*Если движение прямолинейное\*)

```

(*Table [ theta_{M[i,n]} [t_] := 0., {i, 2}, {n, 2} ] ;
Table [ u_{M[i,n]} [t_] := 0., {i, 2}, {n, 2} ] ;
Table [ a_i [t_] := 0., {i, 2} ] ;
Table [ v_{M[cc,i]} [t_] := 5., {i, 2} ] ;
Table [ P_{M[i,n,j]} [t_] := Evaluate [ (-1)^j ( -mu N_{M[i,n,j]} [t] ) ], {i, 2}, {n, 2}, {j, 2} ] ;
Table [ K_{M[yS,i,n,j]} [t_] := 30., {i, 2}, {n, 2}, {j, 2} ] ;
Table [ W_{M[p,i,n,j]} [t_] := 0., {i, 2}, {n, 2}, {j, 2} ] ;

```

```

Table[ $\beta_{M[i,n,j]}$  [t_] := 0., {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
Table[ $\lambda_{M[i,n,j]}$  [t_] := 0., {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
Table[ $\epsilon_{M[y,i,n,j]}$  [t_] := 0., {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
Table[ $W_{M[y,i,n,j]}$  [t_] := 0., {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
YY1=0;
YY2=0;
Table[ $\gamma_{M[i,n,j]}$  [t_] := 0., {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
Table[ $\sigma_{M[i,n,j]}$  [t_] := 0., {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
Table[ $Y_{M[i,n,j]}$  [t_] := 0., {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}];
 $\alpha_{cg}$  [t_] := 0.;  $\alpha_{cv}$  [t_] := 0.;
 $c_{cx}$  =  $c_c$ ;  $\beta_{cx}$  =  $\beta_c$ ;
 $c_{cy}$  = 0.;  $\beta_{cy}$  = 0.;
 $c_{cz}$  = 0.;  $\beta_{cz}$  = 0.; *)

```

### ■ Решение системы уравнений Лагранжа второго рода

```

ReleaseHold[reset]
Text[Row[{typeM, "\n" typeFM, "\n"  $\epsilon_{min}$  =,  $\epsilon_{min}$ , "\t"  $\epsilon_{max}$  =,  $\epsilon_{max}$ , "\t"  $\Delta T_1$  =,
 $\Delta T_{1\{di,111\}}$ , " c", "\t"  $\Delta T_2$  =,  $\Delta T_{2\{di,111\}}$ , " c", "\t"  $\bar{d}m$  =,  $\bar{d}m$ , " H/c",
"\t"  $\Delta t_{future}$  =,  $\Delta t_f$ , " c", "\t"  $t_m$  =,  $t_m$ , " c", "\t"  $t_{xx}$  =,  $t_{xx}$ , " c"}]]
et1data = et2data = dataD1 = dataD2 =
  dataD11 = dataD12 = dataD21 = dataD22 = dataS111 = dataS112 =
  dataS121 = dataS122 = dataS211 = dataS212 =
  dataS221 = dataS222 = dataT1 = dataT2 = {{0, 0}}; x1data = {}; p0data = {};
updM = 0.003; updE = 0.01; tfix = tfix2 = 0; dplot1 = dplot2 =
  dplot3 = dplot4 = dplotAll = True;
Grid[{{Checkbox[Dynamic[dplotAll]]}}]
Grid[{{Checkbox[Dynamic[dplot1]], Checkbox[Dynamic[dplot2]],
  Checkbox[Dynamic[dplot3]], Checkbox[Dynamic[dplot4]]}}]
Dynamic[If[dplotAll && te > 0.01,
  {If[dplot1, ListPlot[x1data, Joined → True, PlotRange → {{0, Last[x1data][[1]] + 0.5},
    {0, (*Last[x1data][[2]]*) V0 + V0 / 4}}, PlotStyle → {Blue, Thick},
  DisplayFunction → Identity, Frame → True, ImageSize → 500,
  GridLines → Automatic, PlotLabel → Style["x'(t), м/с", FontSize → 14]],
  Graphics[{{Text[Style["Dynamic Plot 1", Large, Bold, Red], Center]}},
  If[dplot2, TableForm[{{" $\epsilon_{111}$ ", ProgressIndicator[Dynamic[If[ $\epsilon_{111} \geq 0$ ,  $\epsilon_{111}$ , 0]],
    {0, 1}], " $M_{11}$ ", ProgressIndicator[Dynamic[m11], {0, Mmax}]}, {" ",
  Dynamic[NumberForm[ $\epsilon_{111}$ , {4, 4}]}, " ", Dynamic[NumberForm[m11, {4, 0}]}],
  {" $\epsilon_{121}$ ", ProgressIndicator[Dynamic[If[ $\epsilon_{121} \geq 0$ ,  $\epsilon_{121}$ , 0]], {0, 1}],
  " $M_{12}$ ", ProgressIndicator[Dynamic[m12], {0, Mmax}]}, {" ",
  Dynamic[NumberForm[ $\epsilon_{121}$ , {4, 4}]}, " ", Dynamic[NumberForm[m12, {4, 0}]}],
  {" $\epsilon_{211}$ ", ProgressIndicator[Dynamic[If[ $\epsilon_{211} \geq 0$ ,  $\epsilon_{211}$ , 0]], {0, 1}],
  " $M_{21}$ ", ProgressIndicator[Dynamic[m21], {0, Mmax}]}, {" ",
  Dynamic[NumberForm[ $\epsilon_{211}$ , {4, 4}]}, " ", Dynamic[NumberForm[m21, {4, 0}]}],
  {" $\epsilon_{221}$ ", ProgressIndicator[Dynamic[If[ $\epsilon_{221} \geq 0$ ,  $\epsilon_{221}$ , 0]], {0, 1}],

```

```

    "M22", ProgressIndicator[Dynamic[m22], {0, Mmax}], {" ",
    Dynamic[NumberForm[ε221, {4, 4}]], " ", Dynamic[NumberForm[m22, {4, 0}]]},
    {"εt1", ProgressIndicator[Dynamic[If[εt1 ≥ 0, εt1, 0]], {0, 1}],
    "εt2", ProgressIndicator[Dynamic[If[εt2 ≥ 0, εt2, 0]], {0, 1}]],
    {" ", Dynamic[NumberForm[εt1, {7, 4}]], " ",
    Dynamic[NumberForm[εt2, {7, 4}]]}], TableAlignments → Center],
Graphics[{Text[Style["Indicators", Large, Bold, Red], Center]}]],
{If[dplot3, ListPlot[p0data, Joined → True, PlotRange →
    {{0, Last[p0data][[1]] + 0.5}, {-0., 1.}}, PlotStyle → {Blue, Thick},
    DisplayFunction → Identity, Frame → True, ImageSize → 500, GridLines → Automatic,
    PlotLabel → Style[" $\frac{r(\varphi_{111})'[t] - r(\varphi_{211})'[t]}{r(\varphi_{111})'[t]}$ ", FontSize → 14]],
Graphics[{Text[Style["Dynamic Plot 2", Large, Bold, Red], Center]}]}, If[
dplot4, {TableForm[
    {{TogglerBar[Dynamic[data], {Hold@dataD1 → "Md1", Hold@dataD2 → "Md2",
    Hold@dataD11 → "Md11", Hold@dataD12 → "Md12", Hold@dataD21 → "Md21",
    Hold@dataD22 → "Md22", Hold@dataS111 → "Ms111", Hold@dataS112 → "Ms112",
    Hold@dataS121 → "Ms121", Hold@dataS122 → "Ms122", Hold@dataS211 → "Ms211",
    Hold@dataS212 → "Ms212", Hold@dataS221 → "Ms221", Hold@dataS222 → "Ms222",
    Hold@dataT1 → "Mt1", Hold@dataT2 → "Mt2"}]}, TableAlignments → Center],
{ListPlot[{Sequence@@ReleaseHold[data], st1data, st2data, {{0, Mmax},
    {Tt, Mmax}}}], Joined → True, PlotRange → {{0, te + 0.5}, {0, Mmax + 100}},
    PlotStyle → {{RGBColor[0., 0.4, 1], Thick}, {Blue, Thin},
    {Magenta, Thick}, {Purple, Thin}, {RGBColor[0.1, 1, 0.4], Thick},
    {Darker[Green], Thin}, {Dashed, Red, Thin}}, DisplayFunction → Identity,
    Frame → True, ImageSize → 500, GridLines → Automatic, PlotLabel →
    Style["1000×εt1[t], 1000×εt2[t], M1, M2, M3, M4, MMAX", FontSize → 14]]},
Graphics[{Text[Style["Dynamic Plot 3", Large, Bold, Red], Center]}]] //
TableForm, Graphics[{Text[Style["Dynamic Plots", Large, Bold, Blue],
Center]}]]]
{{Button["Stop", stp = te + 0.0001], Slider[Dynamic[stp], {0., Tt, 0.01},
    ImageSize → 500], Dynamic[stp], Dynamic[NumberForm[te, {4, 4}]]} // TableForm
stp = Tt;
tstart = TimeUsed[];
(*Решение системы уравнений Лагранжа второго рода*)
sol = NDSolve[system, fun, {t, 0, Tt}, (*AccuracyGoal→10, PrecisionGoal→10, *)
    MaxStepSize → 0.001 (*, Method → "ExplicitMidpoint", "Adams", "BDF",
    "ExplicitRungeKutta", "ImplicitRungeKutta", "SymplecticPartitionedRungeKutta",
    "ExplicitEuler", "ExplicitMidpoint", "ExplicitModifiedMidpoint",
    "LinearlyImplicitModifiedMidpoint", "LocallyExact" *) ,
    EvaluationMonitor ⇒ Block[{t = t; curx1 = x1[t]; st1 = εt1[t];
    st2 = εt2[t]; ε111 = ε111[t]; ε121 = ε121[t]; ε211 = ε211[t]; ε221 = ε221[t];
    m11 = Md1[t] + Md11[t] + Ms111[t] + Mt1[t]; m12 = Md1[t] + Md12[t] + Ms121[t] + Mt1[t];
    m21 = Md2[t] + Md21[t] + Ms211[t] + Mt2[t]; m22 = Md2[t] + Md22[t] + Ms221[t] + Mt2[t];
    If[t - tfix ≥ updM,

```

```

If[PT == 1 || PT == 5 || PT == 6 || PT == 7 || PT == 9,
  AppendTo[dataD1, {t, Md1[t]}]; AppendTo[dataD2, {t, Md2[t]}];
If[PT == 2 || PT == 8 || PT == 9 || PT == 10, AppendTo[dataD11, {t, Md11[t]}];
  AppendTo[dataD12, {t, Md12[t]}]; AppendTo[dataD21, {t, Md21[t]}];
  AppendTo[dataD22, {t, Md22[t]}];
If[PT == 3 || PT == 7 || PT == 8 || PT == 9 || PT == 10, AppendTo[dataS111, {t, Ms111[t]}];
  AppendTo[dataS112, {t, Ms112[t]}]; AppendTo[dataS121, {t, Ms121[t]}];
  AppendTo[dataS122, {t, Ms122[t]}]; AppendTo[dataS211, {t, Ms211[t]}];
  AppendTo[dataS212, {t, Ms212[t]}]; AppendTo[dataS221, {t, Ms221[t]}];
  AppendTo[dataS222, {t, Ms222[t]}];
If[PT == 4 || PT == 6 || PT == 10, AppendTo[dataT1, {t, Mt1[t]}];
  AppendTo[dataT2, {t, Mt2[t]}];
tfix = t];
If[t - tfix2 ≥ updE, AppendTo[x1data, {t, x1'[t]}];
  AppendTo[εt1data, {t, 1000 εt1[t]}]; AppendTo[εt2data, {t, 1000 εt2[t]}];
  AppendTo[p0data, {t,  $\frac{r(\varphi_{111})'[t] - r(\varphi_{211})'[t]}{r(\varphi_{111})'[t]}$ ]}]; tfix2 = t];
(*Print["t=", t, " ε111=", ε111[t], " (x111)'=", (x111)'[t], " r(φ111)'[t]=",
  r(φ111)'[t], " ψ111[t]=", ψ111[t], " M011=", M011[*]]],
Method → {"EventLocator", "Event" ⇒ {t - stp, x1'[t], x2'[t]}, "EventAction" ⇒
  {Throw[te = t, "StopIntegration"], Throw[te = t, "StopIntegration"],
  Throw[te = t, "StopIntegration"]}}, SolveDelayed → True, MaxSteps → 1000000]
(*StepMonitor⇒Block[{}, data=Append[data, {t, M011}]; x1data=Append[x1data, {t, (x1)'[t]}];
  (*Print["t=", t, " ε111=", ε111[t], " (x111)'=", (x111)'[t],
  " r(φ111)'[t]=", r(φ111)'[t], " ψ111[t]=", ψ111[t], " M011=", M011[*]]],
  MaxSteps→1000000, StoppingTest⇒0.<x1'[t]*] (*StepMonitor⇒
  Block[{}, data=Append[data, {t, M011}]; (*Print["t=", t, " ε111=", ε111[t], " (x111)'=",
  (x111)'[t], " r(φ111)'[t]=", r(φ111)'[t], " ψ111[t]=", ψ111[t], " M011=", M011[*]]],
  MaxSteps→1000000, StoppingTest⇒Or[0.≤x1'[t], 0.≤x2'[t]]]*)

Print["Система решалась ", timeev = DateString[{0, 0, 0, 0, 0, TimeUsed[] - tstart},
  {"Hour24", "ч", "Minute", "мин", "Second", "с", "Millisecond", "мс"}]]
Print["Время до остановки ", te, " с, тормозной путь x1=",
  PaddedForm[x1[te] /. sol[[1]], 5], " и x2=",
  PaddedForm[x2[te] /. sol[[1]], 5], " м,", " скорость x1'=",
  PaddedForm[x1'[te] /. sol[[1]], 5], " и x2'=", x2'[te] /. sol[[1]], " м/с"]
Print["Время действительного торможения до остановки ",
  te - tm - txx, " с, тормозной путь действительного торможения x1=",
  PaddedForm[(x1[te] - x1[tm + txx]) /. First@sol, 5], " и x2=",
  PaddedForm[(x2[te] - x2[tm + txx]) /. First@sol, 5], " м,",
  " скорость остановки x1'=", PaddedForm[x1'[te] /. sol[[1]], 5],
  " и x2'=", PaddedForm[x2'[te] /. sol[[1]], 5], " м/с"]

MessageDialog[
  Row[{If[Evaluate[(x1'[te] /. sol[[1])] < 0.001], Text[Style["Stopping successfully!",
    18, Bold, Green]], Text[Style["Stopping failed!", 18, Bold, Red]]},

```

```

"\n\nСистема решалась: \t", timeev, "\nвремя до остановки: \t",
NumberForm[te, 5], \, NumberForm[te - tm - txx, 5],
" с, \n тормозной путь: \n", x1 = , NumberForm[x1[te] /. sol[[1]], 5],
\, PaddedForm[(x2[te] - x2[tm + txx]) /. First@sol, 5],
" и " x2 = , NumberForm[x2[te] /. sol[[1]], 5], \,
PaddedForm[(x2[te] - x2[tm + txx]) /. First@sol, 5], " м",
"\n скорость: \n", x1' = , NumberForm[Chop[x1'[te] /. sol[[1]], 10-6], 5],
\, PaddedForm[x1'[te] /. sol[[1]], 5], " и ",
x2' = , NumberForm[Chop[x2'[te] /. sol[[1]], 10-6], 5],
\, PaddedForm[x2'[te] /. sol[[1]], 5], " м/с"]],
WindowTitle → "Evaluation completed"];

```

---

## Вывод графиков

```

(*Результаты*)
Plot[{x1[t]} /. sol, {t, 0, te}]
Plot[Evaluate[{x1[t], x2[t]} /. sol], {t, 0, te}, PlotStyle → {Blue, Darker[Green]}]
Plot[{xc[t]} /. sol, {t, 0, te}]
Plot[{x1'[t]} /. sol, {t, 0, te}]
Plot[Evaluate[{(x1)'[t], (x2)'[t]} /. sol],
{t, 0, te}, PlotStyle → {Blue, Darker[Green]}]

```

```

p0202 = stylePlot[asC[{ $\varphi_{t1}[t]$ ,  $\varphi_{t2}[t]$ } /. sol], {t, 0, te}, "t, c", " $\varphi_{t1}$ ,  $\varphi_{t2}$ , рад.", "r"]
p0203 = stylePlot[asC[{ $\varphi_{111}[t]$ } /. sol], {t, 0, te}, "t, c", " $\varphi_{111}$ , рад.", "a"]
p0204 =
  stylePlot[asC[{ $\varphi_{111}[t]$ ,  $\varphi_{121}[t]$ } /. sol], {t, 0, te}, "t, c", " $\varphi_{111}$ ,  $\varphi_{121}$ , рад.", "б"]
p0206 = stylePlot[asC[{ $\varphi_{111}[t]$ ,  $\varphi_{211}[t]$ } /. sol],
  {t, 0, te}, "t, c", " $\varphi_{111}$ ,  $\varphi_{211}$ , рад.", "д"]
p0207 = stylePlot[asC[{ $\varphi_{211}[t]$ ,  $\varphi_{221}[t]$ } /. sol],
  {t, 0, te}, "t, c", " $\varphi_{211}$ ,  $\varphi_{221}$ , рад.", "r"]

p201 = Plot[Evaluate[{ $\varphi_{t1}[t]$ } /. sol], {t, 0, te}, Frame → True,
  GridLines → Automatic, PlotLabel → Style[" $\varphi_{t1}$ ", FontSize → 14]];
p202 = Plot[Evaluate[{ $\varphi_{t1}[t]$ ,  $\varphi_{t2}[t]$ } /. sol], {t, 0, te}, Frame → True,
  GridLines → Automatic, PlotLabel → Style[" $\varphi_{t1}$ ,  $\varphi_{t2}$ ", FontSize → 14],
  PlotStyle → {Blue, Darker[Green]};

p203 = Plot[Evaluate[{ $\varphi_{111}[t]$ } /. sol], {t, 0, te}, Frame → True,
  GridLines → Automatic, PlotLabel → Style[" $\varphi_{111}$ ", FontSize → 14]];
p204 = Plot[Evaluate[{ $\varphi_{111}[t]$ ,  $\varphi_{211}[t]$ } /. sol], {t, 0, te}, Frame → True,
  GridLines → Automatic, PlotLabel → Style[" $\varphi_{111}[t]$ ,  $\varphi_{211}[t]$ ", FontSize → 14],
  PlotStyle → {Blue, Darker[Green]};

p205 = Plot[Evaluate[{ $\varphi_{111}[t]$ ,  $\varphi_{112}[t]$ ,  $\varphi_{121}[t]$ ,  $\varphi_{122}[t]$ } /. sol], {t, 0, te}, Frame → True,
  GridLines → Automatic, PlotStyle → {Blue, Darker[Green], Thick, Dashed}];
p206 = Plot[Evaluate[{ $\varphi_{111}[t]$ ,  $\varphi_{121}[t]$ } /. sol], {t, 0, te}, Frame → True,
  GridLines → Automatic, PlotLabel → Style[" $\varphi_{111}[t]$ ,  $\varphi_{121}[t]$ ", FontSize → 14],
  PlotStyle → {Blue, Darker[Green], Thick, Dashed}];

p207 = Plot[Evaluate[{ $\varphi_{211}[t]$ ,  $\varphi_{212}[t]$ ,  $\varphi_{221}[t]$ ,  $\varphi_{222}[t]$ } /. sol],
  {t, 0, te}, Frame → True, GridLines → Automatic,
  PlotLabel → Style[" $\varphi_{211}[t]$ ,  $\varphi_{212}[t]$ ,  $\varphi_{221}[t]$ ,  $\varphi_{222}[t]$ ", FontSize → 14],
  PlotStyle → {Blue, Darker[Green], Thick, Dashed}];
p208 = Plot[Evaluate[{ $\varphi_{211}[t]$ ,  $\varphi_{212}[t]$ } /. sol], {t, 0, te},
  PlotStyle → {Blue, Darker[Green], Thick, Dashed}];

p209 = Plot[Evaluate[{( $\varphi_{111}$ )'[t], ( $\varphi_{211}$ )'[t]} /. sol],
  {t, 0, te}, PlotStyle → {Blue, Darker[Green]};
Show[GraphicsRow[{p201, p203, p203, p204}, ImageSize → 750]]
Show[GraphicsRow[{p205, p206, p207, p208}, ImageSize → 750]]

```

```

p0210a = stylePlot[{{(φt1)'[t]} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "φt1' , рад./с", "a", {{0., te}, {0, Full}}]
p0210 = stylePlot[{{(φt1)'[t], (φt2)'[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "φt1' , φt2' , рад./с", "a", {{0., te}, {0, Full}}]
p0211 = stylePlot[{{(φ111)'[t], (φ211)'[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "φ111' , φ211' , рад./с", "Б", {{0., te}, {0, Full}}]
p0212 = stylePlot[{{ $\frac{r(\varphi_{111})'[t] - (r(\varphi_{121})'[t])}{r(\varphi_{111})'[t]}$ } /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", " $\frac{r\varphi_{111}' - r\varphi_{121}'}{r\varphi_{111}'}$ ", "a", {{0., te}, {-0., 1.}}]
p0213 = stylePlot[{{ $\frac{r(\varphi_{111})'[t] - (r(\varphi_{211})'[t])}{r(\varphi_{111})'[t]}$ } /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", " $\frac{r\varphi_{111}' - r\varphi_{211}'}{r\varphi_{111}'}$ ", "B", {{0., te}, {-0., 1.}}]
p0213a = stylePlot[{{∂t(r(φ111)'[t] - (r(φ211)'[t]))} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "(rφ111' - rφ211')'", "e", {{0., te}, {-6., 16.}}]
p0214 = stylePlot[{{ $\frac{r(\varphi_{211})'[t] - (r(\varphi_{221})'[t])}{r(\varphi_{211})'[t]}$ } /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", " $\frac{r\varphi_{211}' - r\varphi_{221}'}{r\varphi_{211}'}$ ", "a", {-0.5, 1.}}]

Clear[asC, correct]

p210 = Plot[Evaluate[{{(φt1)'[t], (φt2)'[t]} /. sol}, {t, 0, te},
  PlotLabel → Style["φ1 t' , φ2 t'", FontSize → 14], PlotStyle → {Blue, Darker[Green]};
p211 = Plot[Evaluate[{{(φ111)'[t], (φ211)'[t]} /. sol}, {t, 0, te},
  PlotLabel → Style["φ111' , φ211'", FontSize → 14], PlotStyle → {Blue, Darker[Green]};
p212 = Plot[Evaluate[{{r(φ111)'[t], r(φ211)'[t]} /. sol}, {t, 0, te},
  PlotLabel → Style["rφ111' , rφ211'", FontSize → 14], PlotStyle → {Blue, Darker[Green]};
p213 = Plot[Evaluate[{{r(φ111)'[t] - (r(φ121)'[t])} /. sol}, {t, 0, te},
  PlotLabel → Style["r(φ111)'[t] - (r(φ121)'[t])", FontSize → 14],
  GridLines → Automatic, Frame → True];
p214 = Plot[Evaluate[{{r(φ211)'[t] - (r(φ221)'[t])} /. sol}, {t, 0, te},
  PlotLabel → Style["r(φ211)'[t] - (r(φ221)'[t])", FontSize → 14],
  GridLines → Automatic, Frame → True];
Show[GraphicsRow[{p210, p211, p212, p213, p214}, ImageSize → 750]]

```

```

p080 = stylePlot[dataD11, "t, c", "Md11, H·m", "a", {0, 1200}]
p081 = stylePlot[dataD21, "t, c", "Md21, H·m", "a", {{0., te}, {0, 1400}}]
p0801 =
  stylePlot[{dataD11, dataD22}, "t, c", "Md11, Md22, H·m", "a", {{0., te}, {0, 1200}}]
p082 = stylePlot[dataS111, "t, c", "Ms211, H·m", "a", {0, 600}, 500]
p082a = stylePlot[dataS111, "t, c", "Ms211, H·m", "", {439, 441}, 500]
p083 = stylePlot[dataT1, "t, c", "Mt1, H·m", "a", {0, 1200}, 500]
p084 = stylePlot[dataD1, "t, c", "Md1, H·m", "a", {0, 200}, 500]

p80 = ListPlot[dataD11, Joined → True, DisplayFunction → Identity,
  PlotRange → {{0., te}, {-0., 1200.}}, GridLines → Automatic,
  Frame → True, PlotLabel → Style["MD11(t)", FontSize → 14]];
p81 = ListPlot[dataD22, Joined → True, DisplayFunction → Identity,
  PlotRange → {{0., te}, {-0., 1200.}}, GridLines → Automatic,
  Frame → True, PlotLabel → Style["MD22(t)", FontSize → 14]];
p82 = ListPlot[dataS111, Joined → True, DisplayFunction → Identity,
  PlotRange → {{0., te}, {-0., 1200.}}, GridLines → Automatic,
  Frame → True, PlotLabel → Style["MS111(t)", FontSize → 14]];
p82a = ListPlot[dataS111, Joined → True, DisplayFunction → Identity,
  PlotRange → {{0., te}, {549., 551.}}, GridLines → Automatic,
  Frame → True, PlotLabel → Style["MS111(t)", FontSize → 14]];
p83 = ListPlot[dataT1, Joined → True, DisplayFunction → Identity,
  PlotRange → {{0., te}, {-0., 1200.}}, GridLines → Automatic,
  Frame → True, PlotLabel → Style["MT1(t)", FontSize → 14]];
Show[GraphicsRow[{p80, p81, p82, p83}, ImageSize → 750]]

p00001R1 = stylePlot[{R1[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "R1, m", "e", {-100, 100}]
p00001R2 = stylePlot[{R2[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "R2, m", "e", {-100, 100}]
p00001RB0 = stylePlot[{RB[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "RB, m", "σ", {-100, 100}]
p00001RB01 =
  stylePlot[{ $\frac{R_2[t] + R_{B1}[t]}{2}$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\frac{R_2 + R_{B1}}{2}$ , m", "e", {-100, 100}]
p00001RB1 = stylePlot[{RB1[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "RB1, m", "e", {-100, 100}]
p00001RB2 = stylePlot[{RB2[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "RB2, m", "e", {-100, 100}]
p00001RB3 = stylePlot[{RB3[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "RB3, m", "e", {-100, 100}]
p00001RB4 = stylePlot[{RB4[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "RB4, m", "e", {-100, 100}]
p00001RB5 = stylePlot[{RB5[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "RB5, m", "e", {-100, 100}]
p00001RB6 = stylePlot[{RB6[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "RB6, m", "e", {-100, 100}]
p00001RB7 = stylePlot[{RB7[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "RB7, m", "σ", {-100, 100}]

p00002p1 = stylePlot[{Rp1[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Rp1, m", "e", {-1000, 1000}]
p00002p2 = stylePlot[{Rp2[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Rp2, m", "e", {-1000, 1000}]
p00001RB1p = stylePlot[{Rps1[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Rps1, m", "e", {-100, 100}]
p00001RB2p = stylePlot[{Rps2[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Rps2, m", "e", {-100, 100}]

```

```

p00001RB3p = stylePlot[{Rps3[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Rps3, м", "e", {-100, 100}]
p00001RB4p = stylePlot[{Rps4[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Rps4, м", "e", {-100, 100}]
p00001RB5p = stylePlot[{Rps5[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Rps5, м", "e", {-100, 100}]
p00001RB6p = stylePlot[{Rps6[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Rps6, м", "e", {-100, 100}]
p00001RB7p = stylePlot[{Rps7[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Rps7, м", "e", {-100, 100}]
p00002m = stylePlot[{Rpm111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Rpm111, м", "e", {-1000, 1000}]
p00002i = stylePlot[{ip1[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "ip1, м", "e", {-0.05, 0.05}]
p00002im =
  stylePlot[{ipm111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "ipm111, м", "e", {-0.05, 0.05}]
p00002im1 = stylePlot[{is1[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "is1, м", "e", {-0.05, 0.05}]

p02x1 = stylePlot[{x1[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "x1, м", "e", {0, 40}]
p02x2 = stylePlot[{x2[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "x2, м", "e", {0, 40}]
p01 = stylePlot[{(x2)'[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "x2', м/с", "ж", ]
p03 = stylePlot[{(x1)''[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "x1'', м/с2", "а", {-1.5, 1.5}]
p03 = stylePlot[{(x2)''[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "x2'', м/с2", "з", {-1.5, 1.5}]

p02c = stylePlot[{xc[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "xc, м", "e", {0, 40}]
p01c = stylePlot[{(xc)'[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "xc', м/с", "ж", ]
p04c = stylePlot[{(xc)''[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "xc'', м/с2", "а", {-1.5, 1.5}]
p00111c = stylePlot[{zc[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "zc, мм", "а", {-65., 20.}]
p00111c = stylePlot[{yc[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "yc, мм", "а", {-10., 10.}]

p00111x = stylePlot[{x111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "x111, м", "а", {0., 40.}]

p00111psi1 =
  stylePlot[{ψ1[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "ψ1, рад.", "а", {-0.005, 0.005}]
p00111psi11 = stylePlot[{ψ11[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "ψ11, рад.", "а", {-0.005, 0.005}]
p00111psi12 = stylePlot[{ψ12[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "ψ12, рад.", "а", {-0.005, 0.005}]
p00111teta12 = stylePlot[{θ12[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "θ12, рад.", "а", {-0.005, 0.005}]
p00111psi2 = stylePlot[{ψ2[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "ψ2, рад.", "а", {-0.005, 0.005}]
p00111psi21 = stylePlot[{ψ21[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "ψ21, рад.", "а", {-0.005, 0.005}]
p00111psi22 = stylePlot[{ψ22[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "ψ22, рад.", "а", {-0.005, 0.005}]
p00111teta22 = stylePlot[{θ22[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "θ22, рад.", "а", {-0.005, 0.005}]

p00111tettai = stylePlot[{θ1[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "θ1, рад.", "а", {-2., 2.0}]
p00111tettaii = stylePlot[{θ2[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "θ2, рад.", "а", {-2., 2.0}]

p00111fii = stylePlot[{φ1[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "φ1, рад.", "а", {-2., 2.0}]
p00111fiii = stylePlot[{φ2[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "φ2, рад.", "а", {-2., 2.0}]

```

```

p00111y1 =
  stylePlot[{y1[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "y1, MM", "a", {-10., 10.}]
p00111y2 = stylePlot[{y2[t] × 1000.} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "y2, MM", "a", {-10., 10.}]

p00111y =
  stylePlot[{y11[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "y11, MM", "a", {-4000., 4000.}]
p00112y = stylePlot[{y12[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "y12, MM", "a", {-4000., 4000.}]
p00211y = stylePlot[{y21[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "y21, MM", "a", {-4000., 4000.}]
p00222y = stylePlot[{y22[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "y22, MM", "a", {-4000., 4000.}]

p00111yo =
  stylePlot[{y0111[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "y0111, MM", "a", {-0.1, 0.1}]
p00112yo = stylePlot[{y0112[t] × 1000.} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "y0112, MM", "a", {-0.1, 0.1}]
p00121yo = stylePlot[{y0121[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "y0121, MM", "a", {-0.1, 0.1}]
p00122yo = stylePlot[{y0122[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "y0122, MM", "a", {-0.1, 0.1}]
p00211yo = stylePlot[{y0211[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "y0211, MM", "a", {-0.1, 0.1}]
p00212yo = stylePlot[{y0212[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "y0212, MM", "a", {-0.1, 0.1}]
p00221yo = stylePlot[{y0221[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "y0221, MM", "a", {-0.1, 0.1}]
p00222yo = stylePlot[{y0222[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "y0222, MM", "a", {-0.1, 0.1}]

p00111z1 =
  stylePlot[{z1[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "z1, MM", "a", {-65., 25.}]
p00111z2 = stylePlot[{z2[t] × 1000.} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "z2, MM", "a", {-65., 25.}]

p00111z =
  stylePlot[{z111[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "z111, MM", "a", {-0.04, 0.04}]
p00112z = stylePlot[{z112[t] × 1000.} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "z112, MM", "a", {-0.04, 0.04}]
p00121z = stylePlot[{z121[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "z121, MM", "a", {-0.04, 0.04}]
p00122z = stylePlot[{z122[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "z122, MM", "a", {-0.04, 0.04}]
p00211z = stylePlot[{z211[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "z211, MM", "a", {-0.04, 0.04}]
p00212z = stylePlot[{z212[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},

```

```

    "t", c", "z212, MM", "a", {-0.04, 0.04}]
p00221z = stylePlot[{z221[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
    "t", c", "z221, MM", "a", {-0.04, 0.04}]
p00222z = stylePlot[{z222[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
    "t", c", "z222, MM", "a", {-0.04, 0.04}]

p00111zo =
    stylePlot[{z0111[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te}, "t", c", "z0111, MM", "a", {-0., 0.1}]
p00112zo = stylePlot[{z0111[t] × 1000.} /. sol,
    {t, 0, te}, "t", c", "z0112, MM", "a", {-0., 0.1}]
p00121zo = stylePlot[{z0111[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
    "t", c", "z0121, MM", "a", {-0., 0.1}]
p00122zo = stylePlot[{z0111[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
    "t", c", "z0122, MM", "a", {-0., 0.1}]
p00211zo = stylePlot[{z0111[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
    "t", c", "z0211, MM", "a", {-0., 0.1}]
p00212zo = stylePlot[{z0111[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
    "t", c", "z0212, MM", "a", {-0., 0.1}]
p00221zo = stylePlot[{z0111[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
    "t", c", "z0221, MM", "a", {-0., 0.1}]
p00222zo = stylePlot[{z0111[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
    "t", c", "z0222, MM", "a", {-0., 0.1}]
p00222zoa = stylePlot[{z0111[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
    "t", c", "z0222, MM", "a", {0.086, 0.088}]

p1 = Plot[Evaluate[{x1'[t]} /. sol], {t, 0, te}, GridLines → Automatic,
    Frame → True, PlotLabel → Style[x1'(t), FontSize → 14]];
p2 = Plot[Evaluate[x1[t] /. sol], {t, 0, te}, GridLines → Automatic,
    Frame → True, PlotLabel → Style[x1(t), FontSize → 14]];
p3 = Plot[Evaluate[x1''[t] /. sol], {t, 0, te}, GridLines → Automatic, PlotRange →
    {{0, te}, {-0.4, 0.4}}, Frame → True, PlotLabel → Style[x1''[t], FontSize → 14]];
p4 = Plot[Evaluate[x111'[t] - x1'[t] /. sol], {t, 0, te}, GridLines → Automatic,
    DisplayFunction → Identity, PlotRange → {{0, te}, {-0.1, 0.1}},
    Frame → True, PlotLabel → Style[x1'(t) - x111'(t), FontSize → 14]];
p5 = Plot[Evaluate[φ111'[t] /. sol], {t, 0, te}, GridLines → Automatic,
    DisplayFunction → Identity, Frame → True, PlotLabel → Style[φ111'(t), FontSize → 14]];
p6 = Plot[Evaluate[φ11'[t] /. sol], {t, 0, te}, GridLines → Automatic,
    DisplayFunction → Identity, Frame → True, PlotLabel → Style[φ11'(t), FontSize → 14]];
p7 = Plot[Evaluate[cx(x111[t] - x1[t]) + βx(x111'[t] - x1'[t]) /. sol], {t, 0, te},
    GridLines → Automatic, DisplayFunction → Identity, PlotRange → {{0, te}, {-2500., 0}},
    Frame → True, PlotLabel → Style[Сила буксе 111, FontSize → 14]];
p8 = ListPlot[dataD11, Joined → True, GridLines → Automatic,
    DisplayFunction → Identity, PlotRange → {{0., te}, {-0., 1500.}},
    Frame → True, PlotLabel → Style["M11(t)", FontSize → 14]];
p9 = Plot[Evaluate[ $\frac{x_{111}'[t] - r * \phi_{111}'[t]}{x_{111}'[t]}$  /. sol], {t, 0, te}, GridLines → Automatic,
    DisplayFunction → Identity, PlotRange → {{0, te}, {-0., 0.04}},

```

```

Frame → True, PlotLabel → Style[ $\epsilon_{111}[t]$ , FontSize → 14]];
p10 = Plot[Evaluate[ $\psi_{111}[t]$  /. sol], {t, 0, te}, GridLines → Automatic,
DisplayFunction → Identity, PlotRange → {{0, te}, {-0., 0.23}},
Frame → True, PlotLabel → Style[Кэфф. сцепления  $\psi_{111}$ , FontSize → 14]];
p11 = Plot[Evaluate[( $\psi_{111}[t] + \psi_{112}[t]$ )  $\frac{m_{oc}}{8} g_0 r$  /. sol], {t, 0, te}, GridLines → Automatic,
DisplayFunction → Identity, PlotRange → {{0, te}, {-0., 3000}},
Frame → True, PlotLabel → Style[Момент тормозной на оси 11, FontSize → 14]];
p12 = Plot[Evaluate[( $\psi_{111}[t] + \psi_{112}[t]$ )  $\frac{m_{oc}}{8} g_0$  /. sol], {t, 0, te}, GridLines → Automatic,
DisplayFunction → Identity, PlotRange → {{0, te}, {-0., 5000}},
Frame → True, PlotLabel → Style[Сила сцепления 11, FontSize → 14]];
p13 = Plot[Evaluate[Re[ $k_{gp} \frac{\psi_{gg}}{\psi_0} (-0.016935 (100 S)^{5/11} + 0.195576 \text{Tanh}[150 S])$ ]] -
Im[ $k_{gp} \frac{\psi_{gg}}{\psi_0} (-0.016935 (100 S)^{5/11} + 0.195576 \text{Tanh}[150 S])$ ] /. sol], {S, -0.2, 0.2},
DisplayFunction → Identity, PlotRange → {{-0.04, 0.04}, {-0.177, 0.177}}, GridLines →
Automatic, Frame → True, PlotLabel → Style[Функция сцепления, FontSize → 14]];
p14 = Plot[Evaluate[Re[ $k_{gp} \frac{\psi_{gg}}{\psi_0} (-0.016935 (100 S)^{5/11} + 0.195576 \text{Tanh}[150 S])$ ]] -
Im[ $k_{gp} \frac{\psi_{gg}}{\psi_0} (-0.016935 (100 S)^{5/11} + 0.195576 \text{Tanh}[150 S])$ ] /. sol], {S, -0.4, 0.4},
DisplayFunction → Identity, PlotRange → {{-0.4, 0.4}, {-0.177, 0.177}}, GridLines →
Automatic, Frame → True, PlotLabel → Style[Функция сцепления, FontSize → 14]];
Show[GraphicsRow[{p1, p2, p3}, ImageSize → 750]]
Show[GraphicsRow[{p4, p5, p6}, ImageSize → 750]]
Show[GraphicsRow[{p7, p8, p9}, ImageSize → 750]]
Show[GraphicsRow[{p10, p11, p12}, ImageSize → 750]]
Show[GraphicsRow[{p13, p14}, ImageSize → 750]]

p091 = stylePlot[ $\{\epsilon_{111}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x111}$ ", "", {{0., te}, {0, 0.025}}]
p092 = stylePlot[ $\{\epsilon_{112}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x112}$ ", "", {{0., te}, {0, 0.025}}]
p093 = stylePlot[ $\{\epsilon_{121}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x121}$ ", "", {{0., te}, {0, 0.025}}]
p094 = stylePlot[ $\{\epsilon_{122}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x122}$ ", "", {{0., te}, {0, 0.025}}]
p095 = stylePlot[ $\{\epsilon_{211}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x211}$ ", "6", {{0., te}, {0, 0.025}}]
p095a = stylePlot[ $\{\epsilon_{211}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x211}$ ", "", {{0., te}, {0, 0.025}}]
p096 = stylePlot[ $\{\epsilon_{212}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x212}$ ", "", {{0., te}, {0, 0.025}}]
p097 = stylePlot[ $\{\epsilon_{221}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x221}$ ", "", {{0., te}, {0, 0.025}}]
p098 = stylePlot[ $\{\epsilon_{222}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x222}$ ", "", {{0., te}, {0, 0.025}}]

p091b = stylePlot[ $\{\epsilon_{111}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x111}$ ", "", {{0., te}, {0, 1.025}}]
p092b = stylePlot[ $\{\epsilon_{112}[t]\}$  /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{x112}$ ", "", {{0., te}, {0, 1.025}}]

```

```

p093b = stylePlot[{ε121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εx121", "", {{0., te}, {0, 1.025}}]
p094b = stylePlot[{ε122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εx122", "", {{0., te}, {0, 1.025}}]
p095b = stylePlot[{ε211[t]} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "εx211", "б", {{0., te}, {0, 1.025}}]
p096b = stylePlot[{ε212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εx212", "", {{0., te}, {0, 1.025}}]
p097b = stylePlot[{ε221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εx221", "", {{0., te}, {0, 1.025}}]
p098b = stylePlot[{ε222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εx222", "", {{0., te}, {0, 1.025}}]

p099 = stylePlot[εt1[t] /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εtx1", "a", {{0., te}, {0, 0.025}}]
p100 = stylePlot[{εt2[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εtx2", "a", {{0., te}, {0, 0.025}}]

p091y = stylePlot[{εy111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εy111", "", {{0., te}, {0, 0.05}}]
p092y = stylePlot[{εy112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εy112", "", {{0., te}, {0, 0.05}}]
p093y = stylePlot[{εy121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εy121", "", {{0., te}, {0, 0.05}}]
p094y = stylePlot[{εy122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εy122", "", {{0., te}, {0, 0.05}}]
p095y =
  stylePlot[{εy211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εy211", "б", {{0., te}, {0, 0.05}}]
p095ay = stylePlot[{εy211[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "εy211", "", {{0., te}, {0, 0.05}}]
p096y = stylePlot[{εy212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εy212", "", {{0., te}, {0, 0.05}}]
p097y = stylePlot[{εy221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εy221", "", {{0., te}, {0, 0.05}}]
p098y = stylePlot[{εy222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "εy222", "", {{0., te}, {0, 0.05}}]

p099uu = stylePlot[u11[t] × 1000. /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "u11, мм", "a", {{0., te}, {0, 50.}}]
p100uu = stylePlot[{u12[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "u12, мм", "a", {{0., te}, {0, 50.}}]
p0991uu = stylePlot[u21[t] × 1000. /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "u21, мм", "a", {{0., te}, {0, 50.}}]
p1002uu = stylePlot[{u22[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "u22, мм", "a", {{0., te}, {0, 50.}}]

p099a = stylePlot[{a1[t] × 1000.} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "a1, мм", "", {{0., te}, {-20 000., 20 000.}}]
p100a = stylePlot[{a2[t] × 1000.} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "a2, мм", "", {{0., te}, {-20 000., 20 000.}}]

p091sigma = stylePlot[{σ111[t]} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "σ111, рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p092sigma = stylePlot[{σ112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "σ112, рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p093sigma = stylePlot[{σ121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "σ121, рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p094sigma = stylePlot[{σ122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "σ122, рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p095sigma = stylePlot[{σ211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "σ211, рад.", "б", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]

```

```

p095asigma = stylePlot[{ $\sigma_{211}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\sigma_{211}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p096sigma = stylePlot[{ $\sigma_{212}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\sigma_{212}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p097sigma = stylePlot[{ $\sigma_{221}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\sigma_{221}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p098sigma = stylePlot[{ $\sigma_{222}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\sigma_{222}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]

p091gamma = stylePlot[{ $\gamma_{111}[t]$ } /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", " $\gamma_{111}$ , рад.", "", {{0., te}, {-10.05, 100.05}}]
p092gamma = stylePlot[{ $\gamma_{112}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\gamma_{112}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p093gamma = stylePlot[{ $\gamma_{121}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\gamma_{121}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p094gamma = stylePlot[{ $\gamma_{122}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\gamma_{122}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p095gamma = stylePlot[{ $\gamma_{211}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\gamma_{211}$ , рад.", "б", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p095gamma = stylePlot[{ $\gamma_{211}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\gamma_{211}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p096gamma = stylePlot[{ $\gamma_{212}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\gamma_{212}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p097gamma = stylePlot[{ $\gamma_{221}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\gamma_{221}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]
p098gamma = stylePlot[{ $\gamma_{222}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\gamma_{222}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.05, 0.05}}]

p091beta = stylePlot[{ $\beta_{111}[t]$ } /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", " $\beta_{111}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.2, 2.0}}]
p092beta = stylePlot[{ $\beta_{112}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\beta_{112}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.2, 2.0}}]
p093beta = stylePlot[{ $\beta_{121}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\beta_{121}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.2, 2.0}}]
p094beta = stylePlot[{ $\beta_{122}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\beta_{122}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.2, 2.0}}]
p095beta = stylePlot[{ $\beta_{211}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\beta_{211}$ , рад.", "б", {{0., te}, {-0.2, 2.0}}]
p095beta = stylePlot[{ $\beta_{211}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\beta_{211}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.2, 2.0}}]
p096beta = stylePlot[{ $\beta_{212}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\beta_{212}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.2, 2.0}}]
p097beta = stylePlot[{ $\beta_{221}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\beta_{221}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.2, 2.0}}]
p098beta = stylePlot[{ $\beta_{222}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\beta_{222}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.2, 2.0}}]

p091alfacg =

```

```

stylePlot[{ $\alpha_{cy}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\alpha_{cy}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.8, 0.8}}]
p091alfacv = stylePlot[{ $\alpha_{cv}[t]$ } /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", " $\alpha_{cv}$ , рад.", "", {{0., te}, {-0.8, 0.8}}]

p091cx = stylePlot[{ $c_{cx} / 1000000$ } /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", " $c_{cx}$ ,  $10^6$  H·M", "", {{0., te}, {-0., 8.0}}]
p091cy = stylePlot[{ $c_{cy} / 1000000$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $c_{cy}$ ,  $10^6$  H·M", "", {{0., te}, {-0., 8.0}}]
p091cz = stylePlot[{ $c_{cz} / 1000000$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $c_{cz}$ ,  $10^6$  H·M", "", {{0., te}, {0., 7.0}}]

p091cx = stylePlot[{ $\beta_{cx}$ } /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", " $\beta_{cx}$ , H·c2/M", "", {{0., te}, {-1000., 1000.}}]
p091cy = stylePlot[{ $\beta_{cy}$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\beta_{cy}$ , H·c2/M", "", {{0., te}, {-1000., 1000.}}]
p091cz = stylePlot[{ $\beta_{cz}$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  " $\beta_{cz}$ , H·c2/M", "", {{0., te}, {0., 1000.}}]

p090 = stylePlot[{ $w_{BR}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $w_{BR}$ , H", "a", {-0.02, 0.10}]

p91 = Plot[Evaluate[ $\epsilon_{111}[t]$ ] /. sol, {t, 0, te},
  PlotRange -> {{0, te}, {0., 0.025}}, DisplayFunction -> Identity, Frame -> True,
  GridLines -> Automatic, PlotLabel -> Style[ $\epsilon_{111}(t)$ , FontSize -> 14]];
p92 = Plot[Evaluate[ $\epsilon_{112}[t]$ ] /. sol, {t, 0, te}, PlotRange -> {{0, te}, {0., 0.025}},
  DisplayFunction -> Identity, Frame -> True, GridLines -> Automatic,
  PlotLabel -> Style[ $\epsilon_{112}(t)$ , FontSize -> 14]];
p93 = Plot[Evaluate[ $\epsilon_{121}[t]$ ] /. sol, {t, 0, te}, PlotRange -> {{0, te}, {0., 0.025}},
  DisplayFunction -> Identity, Frame -> True, GridLines -> Automatic,
  PlotLabel -> Style[ $\epsilon_{121}(t)$ , FontSize -> 14]];
p94 = Plot[Evaluate[ $\epsilon_{122}[t]$ ] /. sol, {t, 0, te}, PlotRange -> {{0, te}, {0., 0.025}},
  DisplayFunction -> Identity, Frame -> True, GridLines -> Automatic,
  PlotLabel -> Style[ $\epsilon_{122}(t)$ , FontSize -> 14]];
p95 = Plot[Evaluate[ $\epsilon_{211}[t]$ ] /. sol, {t, 0, te}, PlotRange -> {{0, te}, {0., 0.025}},
  DisplayFunction -> Identity, Frame -> True, GridLines -> Automatic,
  PlotLabel -> Style[ $\epsilon_{211}(t)$ , FontSize -> 14]];
p96 = Plot[Evaluate[ $\epsilon_{212}[t]$ ] /. sol, {t, 0, te}, PlotRange -> {{0, te}, {0., 0.025}},
  DisplayFunction -> Identity, Frame -> True, GridLines -> Automatic,
  PlotLabel -> Style[ $\epsilon_{212}(t)$ , FontSize -> 14]];
p97 = Plot[Evaluate[ $\epsilon_{221}[t]$ ] /. sol, {t, 0, te}, PlotRange -> {{0, te}, {0., 0.025}},
  DisplayFunction -> Identity, Frame -> True, GridLines -> Automatic,
  PlotLabel -> Style[ $\epsilon_{221}(t)$ , FontSize -> 14]];
p98 = Plot[Evaluate[ $\epsilon_{222}[t]$ ] /. sol, {t, 0, te}, PlotRange -> {{0, te}, {0., 0.025}},
  DisplayFunction -> Identity, Frame -> True, GridLines -> Automatic,
  PlotLabel -> Style[ $\epsilon_{222}(t)$ , FontSize -> 14]];

```

```
Show[GraphicsRow[{p91, p92, p93, p94}, ImageSize -> 750]]
Show[GraphicsRow[{p95, p96, p97, p98}, ImageSize -> 750]]

p0101 = stylePlot[{N111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "N111, H", "", {-2500, 20000}]
p0102 = stylePlot[{N112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "N112, H", "", {-2500, 20000}]
p0103 = stylePlot[{N121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "N121, H", "", {-2500, 20000}]
p0104 = stylePlot[{N122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "N122, H", "", {-2500, 20000}]
p0105 = stylePlot[{N211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "N211, H", "", {-2500, 20000}]
p0105a = stylePlot[{N211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "N211, H", "r", {-2500, 20000}]
p0106 = stylePlot[{N212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "N212, H", "", {-2500, 20000}]
p0107 = stylePlot[{N221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "N221, H", "", {-2500, 20000}]
p0108 = stylePlot[{N222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "N222, H", "", {-2500, 20000}]

p0108vcc1 = stylePlot[{vM[cc,1][t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "vcc1, H", "a", {-10, 10}]
p0108vcc2 = stylePlot[{vM[cc,2][t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "vcc2, H", "σ", {-10, 10}]
YY1 /. Subscript[x, 1][t] -> 1
YY2 /. Subscript[x, 1][t] -> 1
(*для графика YY1/.sol*)
p0101YY1 = stylePlot[{YY1} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "YY1", "a", {-2., 12}]
p0101YY2 = stylePlot[{YY2} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "YY2", "σ", {-2., 12}]

p0101p = stylePlot[{P111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "P111, H", "a", {-5000., 5000.}]
p0101p = stylePlot[{P112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "P112, H", "a", {-5000., 5000.}]

p0101y = stylePlot[{Y111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Y111, H", "a", {-5000., 5000.}]
p0102y = stylePlot[{Y112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Y112, H", "a", {-5000., 5000.}]
p0103y = stylePlot[{Y121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Y121, H", "a", {-5000., 5000.}]
p0104y = stylePlot[{Y122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Y122, H", "a", {-5000., 5000.}]
p0105y = stylePlot[{Y211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Y211, H", "r", {-5000., 5000.}]
p0106y = stylePlot[{Y212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Y212, H", "a", {-5000., 5000.}]
p0107y = stylePlot[{Y221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Y221, H", "a", {-5000., 5000.}]
p0108y = stylePlot[{Y222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Y222, H", "a", {-5000., 5000.}]

p0101y = stylePlot[{KyB111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "KyB111, H", "a", {0., 50.}]
p0102y = stylePlot[{KyB112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "KyB112, H", "a", {0., 50.}]
p0103y = stylePlot[{KyB121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "KyB121, H", "a", {0., 50.}]
p0104y = stylePlot[{KyB122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "KyB122, H", "a", {0., 50.}]
p0105y = stylePlot[{KyB211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "KyB211, H", "r", {0., 50.}]
p0106y = stylePlot[{KyB212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "KyB212, H", "a", {0., 50.}]
p0107y = stylePlot[{KyB221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "KyB221, H", "a", {0., 50.}]
p0108y = stylePlot[{KyB222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "KyB222, H", "a", {0., 50.}]

p101 = Plot[Evaluate[N111[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction -> Identity,
  GridLines -> Automatic, PlotRange -> {{0, te}, {10500., 14000}},
  Frame -> True, PlotLabel -> Style[N111[t], FontSize -> 14]];
p102 = Plot[Evaluate[N112[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction -> Identity,
  GridLines -> Automatic, PlotRange -> {{0, te}, {10500., 14000}},
```

```

Frame → True, PlotLabel → Style[N112[t], FontSize → 14]];
p103 = Plot[Evaluate[N121[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {10500., 14000}},
Frame → True, PlotLabel → Style[N121[t], FontSize → 14]];
p104 = Plot[Evaluate[N122[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {10500., 14000}},
Frame → True, PlotLabel → Style[N122[t], FontSize → 14]];
p105 = Plot[Evaluate[N211[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {10500., 14000}},
Frame → True, PlotLabel → Style[N211[t], FontSize → 14]];
p106 = Plot[Evaluate[N212[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {10500., 14000}},
Frame → True, PlotLabel → Style[N212[t], FontSize → 14]];
p107 = Plot[Evaluate[N221[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {10500., 14000}},
Frame → True, PlotLabel → Style[N221[t], FontSize → 14]];
p108 = Plot[Evaluate[N222[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {10500., 14000}},
Frame → True, PlotLabel → Style[N222[t], FontSize → 14]];
Show[GraphicsRow[{p101, p102, p103, p104}, ImageSize → 750]]
Show[GraphicsRow[{p105, p106, p107, p108}, ImageSize → 750]]

```

```

p0171 = stylePlot[{F111[t]} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "F111, H", "", {{0., te}, {-200, 3000}}]
p0172 = stylePlot[{F112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "F112, H", "", {{0., te}, {-200, 3000}}]
p0173 = stylePlot[{F121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "F121, H", "", {{0., te}, {-200, 3000}}]
p0174 = stylePlot[{F122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "F122, H", "", {{0., te}, {-200, 3000}}]
p0175 = stylePlot[{F211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "F211, H", "д", {{0., te}, {500, 3000}}]
p0175a = stylePlot[{F211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "F211, H", "", {{0., te}, {-200, 3000}}]
p0176 = stylePlot[{F212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "F212, H", "", {{0., te}, {-200, 3000}}]
p0177 = stylePlot[{F221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "F221, H", "", {{0., te}, {-200, 3000}}]
p0178 = stylePlot[{F222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "F222, H", "", {{0., te}, {-200, 3000}}]

p171 = Plot[Evaluate[F111[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction -> Identity,
  GridLines -> Automatic, PlotRange -> {{0, te}, {-500., 2500}},
  Frame -> True, PlotLabel -> Style[F111[t], FontSize -> 14]];
p172 = Plot[Evaluate[F112[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction -> Identity,
  GridLines -> Automatic, PlotRange -> {{0, te}, {-500., 2500}},
  Frame -> True, PlotLabel -> Style[F112[t], FontSize -> 14]];
p173 = Plot[Evaluate[F121[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction -> Identity,
  GridLines -> Automatic, PlotRange -> {{0, te}, {-500., 2500}},
  Frame -> True, PlotLabel -> Style[F121[t], FontSize -> 14]];
p174 = Plot[Evaluate[F122[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction -> Identity,
  GridLines -> Automatic, PlotRange -> {{0, te}, {-500., 2500}},
  Frame -> True, PlotLabel -> Style[F122[t], FontSize -> 14]];
p175 = Plot[Evaluate[F211[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction -> Identity,
  GridLines -> Automatic, PlotRange -> {{0, te}, {-500., 2500}},
  Frame -> True, PlotLabel -> Style[F211[t], FontSize -> 14]];
p176 = Plot[Evaluate[F212[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction -> Identity,
  GridLines -> Automatic, PlotRange -> {{0, te}, {-500., 2500}},
  Frame -> True, PlotLabel -> Style[F212[t], FontSize -> 14]];
p177 = Plot[Evaluate[F221[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction -> Identity,
  GridLines -> Automatic, PlotRange -> {{0, te}, {-500., 2500}},
  Frame -> True, PlotLabel -> Style[F221[t], FontSize -> 14]];
p178 = Plot[Evaluate[F222[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction -> Identity,
  GridLines -> Automatic, PlotRange -> {{0, te}, {-500., 2500}},
  Frame -> True, PlotLabel -> Style[F222[t], FontSize -> 14]];
Show[GraphicsRow[{p171, p172, p173, p174}, ImageSize -> 750]]
Show[GraphicsRow[{p175, p176, p177, p178}, ImageSize -> 750]]

```

```

p071 = stylePlot[{Wx111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wx111, H", "a", {200, 800}]
p072 = stylePlot[{Wx112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wx112, H", "a", {200, 800}]
p073 = stylePlot[{Wx121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wx121, H", "a", {200, 800}]
p074 = stylePlot[{Wx122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wx122, H", "a", {200, 800}]
p075 = stylePlot[{Wx211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wx211, H", "B", {200, 800}]
p076 = stylePlot[{Wx212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wx212, H", "a", {200, 800}]
p077 = stylePlot[{Wx221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wx221, H", "a", {200, 800}]
p078 = stylePlot[{Wx222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wx222, H", "a", {200, 800}]

p071y = stylePlot[{Wy111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wy111, H", "a", {-200.0, 200.}]
p072y = stylePlot[{Wy112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wy112, H", "a", {-200.0, 200.}]
p073y = stylePlot[{Wy121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wy121, H", "a", {-200.0, 200.}]
p074y = stylePlot[{Wy122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wy122, H", "a", {-200.0, 200.}]
p075y = stylePlot[{Wy211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wy211, H", "B", {-200.0, 200.}]
p076y = stylePlot[{Wy212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wy212, H", "a", {-200.0, 200.}]
p077y = stylePlot[{Wy221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wy221, H", "a", {-200.0, 200.}]
p078y = stylePlot[{Wy222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wy222, H", "a", {-200.0, 200.}]

p071y = stylePlot[{Wp111[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wp111, H", "a", {-200.0, 200.}]
p072y = stylePlot[{Wp112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wp112, H", "a", {-200.0, 200.}]
p073y = stylePlot[{Wp121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wp121, H", "a", {-200.0, 200.}]
p074y = stylePlot[{Wp122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wp122, H", "a", {-200.0, 200.}]
p075y = stylePlot[{Wp211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wp211, H", "B", {-200.0, 200.}]
p076y = stylePlot[{Wp212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wp212, H", "a", {-200.0, 200.}]
p077y = stylePlot[{Wp221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wp221, H", "a", {-200.0, 200.}]
p078y = stylePlot[{Wp222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "Wp222, H", "a", {-200.0, 200.}]

p71 = Plot[Evaluate[Wx111[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {50., 350}},
  Frame → True, PlotLabel → Style[Wx111[t], FontSize → 14]];
p72 = Plot[Evaluate[Wx112[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {50., 350}},
  Frame → True, PlotLabel → Style[Wx112[t], FontSize → 14]];
p73 = Plot[Evaluate[Wx121[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {50., 350}},
  Frame → True, PlotLabel → Style[Wx121[t], FontSize → 14]];
p74 = Plot[Evaluate[Wx122[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {50., 350}},
  Frame → True, PlotLabel → Style[Wx122[t], FontSize → 14]];
p75 = Plot[Evaluate[Wx211[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {50., 350}},
  Frame → True, PlotLabel → Style[Wx211[t], FontSize → 14]];
p76 = Plot[Evaluate[Wx212[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {50., 350}},
  Frame → True, PlotLabel → Style[Wx212[t], FontSize → 14]];
p77 = Plot[Evaluate[Wx221[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {50., 350}},
  Frame → True, PlotLabel → Style[Wx221[t], FontSize → 14]];
p78 = Plot[Evaluate[Wx222[t] /. sol], {t, 0, te}, DisplayFunction → Identity,
  GridLines → Automatic, PlotRange → {{0, te}, {50., 350}},
  Frame → True, PlotLabel → Style[Wx222[t], FontSize → 14]];
Show[GraphicsRow[{p71, p72, p73, p74}, ImageSize → 750]]
Show[GraphicsRow[{p75, p76, p77, p78}, ImageSize → 750]]

```

```
(* Результаты торможения рельсовыми тормозами*)

p02g = stylePlot[{xg21[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "xg21, м", "e", {0, 40}]
p01g = stylePlot[{(xg21)'[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "xg21', м/с", "B"]
p03g = stylePlot[{(xg21)''[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "xg21'', м/с2", "д", {-1.5, 1.5}]

p02m = stylePlot[{xm211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "xm211, м", "e", {-0, 40}]
p01m = stylePlot[{(xm211)'[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "xm211', м/с", "B"]
p03m = stylePlot[{(xm211)''[t]} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "xm211'', м/с2", "д", {-25.0, 25.0}]

Fny0
B
B1m
B 0.425
p0171fm =
  stylePlot[{kvf[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "kvf", "", {{0., te}, {-0.0, 1.2}}]
p0171fm = stylePlot[{kvm[t]} /. sol, {t, 0, te},
  "t, c", "kvm", "", {{0., te}, {-0.0, 1.2}}]

p0171fm =
  stylePlot[{fm[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "fm", "B", {{0., te}, {0.04, 0.14}}]
p0171fmv = ParametricPlot[Evaluate[{(x2)'[t], fm[t]} /. sol],
  {t, te, 0}, AspectRatio → 1]
p0171fg = stylePlot[{fg[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "fg", "r", {{0., te}, {0.05, 0.20}}]
p0171fmv = ParametricPlot[Evaluate[{(x2)'[t], fg[t]} /. sol],
  {t, te, 0}, AspectRatio → 1]

p0171nm = stylePlot[{Fn11[t]} /. sol,
  {t, 0, te}, "t, c", "Fn11, Н", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0172nm = stylePlot[{Fn12[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "Fn12, Н", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0172nmi = stylePlot[{Fn13[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "Fn13, Н", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0173nm = stylePlot[{Fn121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "Fn121, Н", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0174nm = stylePlot[{Fn122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "Fn122, Н", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0174nmi = stylePlot[{Fn123[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "Fn123, Н", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0175nm = stylePlot[{Fn211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "Fn211, Н", "a", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0175nma = stylePlot[{Fn211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
  "Fn211, Н", "a", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0176nm = stylePlot[{Fn212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
```

```

    "Fn212, H", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0176nmi = stylePlot[{Fn213[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fn213, H", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0177nm = stylePlot[{Fn221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fn221, H", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0178nm = stylePlot[{Fn222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fn222, H", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]
p0178nmi = stylePlot[{Fn223[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fn223, H", "", {{0., te}, {-1000, 20000}}]

p0171m = stylePlot[{Fm111[t]} /. sol,
    {t, 0, te}, "t, c", "Fm111, H", "", {{0., te}, {-100, 2500}}]
p0172m = stylePlot[{Fm112[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fm112, H", "", {{0., te}, {-100, 2500}}]
p0173m = stylePlot[{Fm121[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fm121, H", "", {{0., te}, {-100, 2500}}]
p0174m = stylePlot[{Fm122[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fm122, H", "", {{0., te}, {-100, 2500}}]
p0175m = stylePlot[{Fm211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fm211, H", "σ", {{0., te}, {-100, 2500}}]
p0175ma = stylePlot[{Fm211[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fm211, H", "σ", {{0., te}, {-100, 2500}}]
p0176m = stylePlot[{Fm212[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fm212, H", "", {{0., te}, {-100, 2500}}]
p0177m = stylePlot[{Fm221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fm221, H", "", {{0., te}, {-100, 2500}}]
p0178m = stylePlot[{Fm222[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fm222, H", "", {{0., te}, {-100, 2500}}]

p0171g = stylePlot[{Fg11[t]} /. sol,
    {t, 0, te}, "t, c", "Fg11, H", "", {{0., te}, {-1000, 3000}}]
p0173g = stylePlot[{Fg12[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fg12, H", "", {{0., te}, {-1000, 3000}}]
p0175g = stylePlot[{Fg21[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fg21, H", "σ", {{0., te}, {-1000, 3000}}]
p0175ga = stylePlot[{Fg21[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fg21, H", "σ", {{0., te}, {-1000, 3000}}]
p0178g = stylePlot[{Fg22[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "Fg22, H", "", {{0., te}, {-1000, 3000}}]

p0171kg =
    stylePlot[{kg21[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c", "kg21", "a", {{0., te}, {-0.2, 1.1}}]
p0171ko = stylePlot[{ko221[t]} /. sol, {t, 0, te},
    "t, c", "ko221", "", {{0., te}, {-0.2, 1.1}}]
p0172kg = stylePlot[{kc221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
    "kc221", "", {{0., te}, {-0.2, 1.1}}]
p0173kg = stylePlot[{kf221[t]} /. sol, {t, 0, te}, "t, c",

```

```

"  $k_{f221}$  ", "", {{0., te}, {-0.2, 1.1}}]
p0174kg = stylePlot[{ $k_{d221}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $k_{d221}$  ", "", {{0., te}, {-0.2, 1.1}}]
p0175kg = stylePlot[{ $k_{d222}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $k_{d222}$  ", "", {{0., te}, {-0.2, 1.1}}]

p091ym =
stylePlot[{ $\epsilon_{ym111}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{ym111}$ ", "", {{0., te}, {-0., 0.1}}]
p092ym = stylePlot[{ $\epsilon_{ym112}[t]$ } /. sol, {t, 0, te},
"t, c", " $\epsilon_{ym112}$ ", "", {{0., te}, {-0., 0.1}}]
p093ym = stylePlot[{ $\epsilon_{ym121}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $\epsilon_{ym121}$  ", "", {{0., te}, {-0., 0.1}}]
p094ym = stylePlot[{ $\epsilon_{ym122}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $\epsilon_{ym122}$  ", "", {{0., te}, {-0., 0.1}}]
p095ym = stylePlot[{ $\epsilon_{ym211}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $\epsilon_{ym211}$  ", "σ", {{0., te}, {-0., 0.1}}]
p095aym = stylePlot[{ $\epsilon_{ym211}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $\epsilon_{ym211}$  ", "", {{0., te}, {-0.02, 0.02}}]
p096ym = stylePlot[{ $\epsilon_{ym212}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $\epsilon_{ym212}$  ", "", {{0., te}, {-0., 0.1}}]
p097ym = stylePlot[{ $\epsilon_{ym221}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $\epsilon_{ym221}$  ", "", {{0., te}, {-0., 0.1}}]
p098ym = stylePlot[{ $\epsilon_{ym222}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $\epsilon_{ym222}$  ", "", {{0., te}, {-0., 0.1}}]

p091yg =
stylePlot[{ $\epsilon_{yg11}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $\epsilon_{yg11}$ ", "", {{0., te}, {-0., 0.04}}]
p093yg = stylePlot[{ $\epsilon_{yg12}[t]$ } /. sol, {t, 0, te},
"t, c", " $\epsilon_{yg12}$ ", "", {{0., te}, {-0., 0.04}}]
p095yg = stylePlot[{ $\epsilon_{yg21}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $\epsilon_{yg21}$  ", "σ", {{0., te}, {-0., 0.04}}]
p095ayg = stylePlot[{ $\epsilon_{yg21}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $\epsilon_{yg21}$  ", "", {{0., te}, {-0., 0.04}}]
p097yg = stylePlot[{ $\epsilon_{yg22}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c",
"  $\epsilon_{yg22}$  ", "", {{0., te}, {-0., 0.04}}]

p071ym = stylePlot[{ $W_{ym111}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{ym111}$ ", "H", "a", {-150, 150}]
p072ym = stylePlot[{ $W_{ym112}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{ym112}$ ", "H", "a", {-150, 150}]
p073ym = stylePlot[{ $W_{ym121}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{ym121}$ ", "H", "a", {-150, 150}]
p074ym = stylePlot[{ $W_{ym122}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{ym122}$ ", "H", "a", {-150, 150}]
p075ym = stylePlot[{ $W_{ym211}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{ym211}$ ", "H", "B", {-150, 150}]
p076ym = stylePlot[{ $W_{ym212}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{ym212}$ ", "H", "a", {-150, 150}]
p077ym = stylePlot[{ $W_{ym221}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{ym221}$ ", "H", "a", {-150, 150}]
p078ym = stylePlot[{ $W_{ym222}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{ym222}$ ", "H", "a", {-150, 150}]

p071yg = stylePlot[{ $W_{yg11}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{yg11}$ ", "H", "a", {-100, 100}]
p073yg = stylePlot[{ $W_{yg12}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{yg12}$ ", "H", "a", {-100, 100}]
p075yg = stylePlot[{ $W_{yg21}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{yg21}$ ", "H", "B", {-100, 100}]
p077yg = stylePlot[{ $W_{yg22}[t]$ } /. sol, {t, 0, te}, "t, c", " $W_{yg22}$ ", "H", "a", {-100, 100}]

```

```

p02150 =
  Grid[{{p081, p095}, {p075, p0105a}, {p0175, p02x2}, {p01, p03}}, ItemSize → Full]

p02160 = Grid[{{p091, p092, p093, p094}, {p095a, p096, p097, p098},
  {p0171, p0172, p0173, p0174}, {p0175a, p0176, p0177, p0178}}, ItemSize → All]
(*p02160=Grid[{{p091,p092,p093,p094}, {p095b,p096b,p097b,p098b},
  {p0171,p0172,p0173,p0174}, {p0175a,p0176,p0177,p0178}}, ItemSize→All]*)

p0217 = Grid[{{p0210, p0211, p0213}, {p0202, p0206, p0213a}}, ItemSize → Full]

p0218 = Grid[{{put1, put2}, {put3, put4}}, ItemSize → Full]
p0219 =
  Grid[{{put5, put6}, {put7, put8}, {put9, put10}, {put11a, put12a}}, ItemSize → Full]
p0220 = Grid[{{put11, put12}}, ItemSize → Full]
p0221 = Grid[{{put5H, put6H}, {put1RdL, put1RdR}}, ItemSize → Full]

p02151 =
  Grid[{{p0175nma, p0175ma}, {p01m, p0105}, {p03m, p02x2}, {p01, p03}}, ItemSize → Full]

p02152 =
  Grid[{{p0171kg, p0175ga}, {p01g, p0105}, {p03g, p02x2}, {p01, p03}}, ItemSize → Full]

p02162 = Grid[{{p0101, p0102, p0103, p0104}, {p0105, p0106, p0107, p0108},
  {p0171, p0172, p0173, p0174}, {p0175a, p0176, p0177, p0178}}, ItemSize → All]

p02163 = Grid[{{p0171fm, p0171fg}}, ItemSize → Full]

p02164 = Grid[{{p090, p00001RB0}}, ItemSize → Full]

```

---

## Экспорт графиков

```

explot[catalog_, plnum_] :=
  Module[{i, len}, CreateDirectory[catalog]; len = Length[plnum];
  i = 1; Do[Export[catalog <> "\p0" <> ToString[plnum[[i]]] <> ".png",
  M["p0", plnum[[i]], ImageResolution → 300]; i++, {len}];

clog = NotebookDirectory[] <> FileNameTake[NotebookFileName[]] <> "_pics"
plnum = {2150, 2151, 2152, 2160, 2162, 2163, 2164, 217, 218, 219, 220, 221};
explot[clog, plnum]

(*Export["p0216.png", p0216, ImageResolution→300]*)

```

## Тестирование на сходимость результатов решения динамической модели с результатами классической механики

```

Table[iFM[i,n,j] = FunctionInterpolation[FM[i,n,j][t] /. sol, {t, 0, te}],
  {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}]
Table[iWM[x,i,n,j] = FunctionInterpolation[WM[x,i,n,j][t] /. sol, {t, 0, te}],
  {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}]
Table[iiM[p,i] = FunctionInterpolation[iM[p,i][t] /. sol, {t, 0, te}], {i, 2}]
Table[iFM[m,i,j,m] = FunctionInterpolation[FM[m,i,j,m][t] /. sol, {t, 0, te}],
  {i, 2}, {j, 2}, {m, 3}]
Table[iFM[g,i,j] = FunctionInterpolation[FM[g,i,j][t] /. sol, {t, 0, te}], {i, 2}, {j, 2}]
Table[iWM[p,i,n,j] = FunctionInterpolation[WM[p,i,n,j][t] /. sol, {t, 0, te}],
  {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}]
Table[iYM[i,n,j] = FunctionInterpolation[YM[i,n,j][t] /. sol, {t, 0, te}],
  {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}]
Table[iγM[i,n,j] = FunctionInterpolation[γM[i,n,j][t] /. sol, {t, 0, te}],
  {i, 2}, {n, 2}, {j, 2}]
wSR = FunctionInterpolation[wSR[t] /. sol, {t, 0, te}]

Δt = 4.0
Δtt = 4.0

(∑i=12 ∑n=12 ∑j=12 ∫Δt+tm+txxte-Δtt iFM[i,n,j][t] dt + ∑i=12 ∑m=13 ∑j=12 ∫Δt+tm+txxte-Δtt iFM[m,i,j,m][t] dt +
  ∑i=12 ∑j=12 ∫Δt+tm+txxte-Δtt iFM[g,i,j][t] dt)
Finj = -----
  ((te - Δtt) - (tm + txx + Δt))

Wx = (∑i=12 ∑n=12 ∑j=12 ∫Δt+tm+txxte-Δtt iWM[x,i,n,j][t] dt) /
  ((te - Δtt) - (tm + txx + Δt))

Wp = (∑i=12 ∑n=12 ∑j=12 ∫Δt+tm+txxte-Δtt iWM[p,i,n,j][t] dt) /
  ((te - Δtt) - (tm + txx + Δt))

Y = (∑i=12 ∑n=12 ∑j=12 ∫Δt+tm+txxte-Δtt iYM[i,n,j][t] dt) /
  ((te - Δtt) - (tm + txx + Δt))

ip = (∑i=12 ∫Δt+tm+txxte-Δtt iiM[p,i][t] dt) /
  2 ((te - Δtt) - (tm + txx + Δt))

γ = (∑i=12 ∑n=12 ∑j=12 ∫Δt+tm+txxte-Δtt iγM[i,n,j][t] dt) /
  ((te - Δtt) - (tm + txx + Δt))

mc (wS + wSR)
mloc
mc
x1' [tm + txx + Δt] /. sol
x1' [te - Δtt] /. sol
Sin[ArcTan[ip]]
(x1' [te - Δtt] - x1' [tm + txx + Δt]) /. sol
ψπ = (Finj + Wx + Wp + Y Sin[γ] + mc (wS + wSR)) /
  g0 (mloc + mc)

Sklass = ((x1' [te - Δtt])2 - (x1' [tm + txx + Δt])2) /
  2 g0 (Sin[ArcTan[-ip]] - ψπ Cos[ArcTan[-ip]]) /. sol

shodimost = (x1' [te - Δtt] - x1' [tm + txx + Δt]) /
  Sklass /. sol

```

---

## Сохранение результатов

```
(*expName =FileNameTake[NotebookFileName[]] <> "_Results.mx";*)  
  
(*DumpSave[expName, {sol, data, te, tm, txx, V0, PT, PA, PP, Mdi, Mdin, Msinj,  
  Mti, dataD1, dataD2, dataD11, dataD12, dataD21, dataD22, dataS111, dataS112,  
  dataS121, dataS122, dataS211, dataS212, dataS221, dataS222, dataT1, dataT2}];*)
```

---

## Загрузка результатов

```
expName = FileNameTake[NotebookFileName[]] <> "_Results.mx"  
  
(*SetDirectory[NotebookDirectory[]]*)  
  
(*Get[expName]*)
```

## Приложение Б

Пример составления файла *Path Parametr.xls*

**Заезд восточного откаточного полевого штреха**

Параметр ед. из.	$I_{изм}$ М	$R$ М	$S_p$ М	$i_s$	$i_p$	$h_L$ мм	$h_R$ мм	$I_{\phi L}$ мм	$I_{\phi R}$ мм	$I_{\phi L}$ М	$I_{\phi R}$ М	$\psi_L$	$\psi_R$	$H_L$ мм	$H_R$ мм	$R_{\phi L}$ М	$R_{\phi R}$ М	
0	0,00	30,00	0,9120	-0,0195	-0,0240													0
1	0,75	30,00	0,9225	-0,0015	-0,0275													0
2	1,50	21,50	0,9315	0,0160	-0,0315													0
3	2,25	26,50	0,9320	0,0075	-0,0285													0
4	3,00	24,50	0,9320	0,0010	-0,0245													0
5	3,75	20,00	0,9320	0,0035	-0,0250													0
6	4,50	20,00	0,9320	0,0060	-0,0245													0
7	5,25	20,00	0,9310	0,0095	-0,0258	{5,0.25}												0
8	6,00	21,00	0,9310	0,0130	-0,0310		{5,0}											0
9	6,75	20,50	0,9310	-0,0150	-0,0328													0
10	7,50	20,25	0,9290	-0,0180	-0,0350													0
11	8,25	20,25	0,9270	0,0185	-0,0365												{12,0}	0
12	9,00	20,00	0,9250	0,0190	-0,0380													0
13	9,75	20,00	0,9210	0,0180	-0,0328	{3,0.5}				{2,2.0.15}							{12,0}	0
14	10,50	23,00	0,9230	0,0170	-0,0335		{3,0.25}				{2,1.0.1}							0
15	11,25	22,50	0,9270	0,0170	-0,0290													0
16	12,00	21,50	0,9290	0,0170	-0,0247													0
17	12,75	20,00	0,9280	0,0140	-0,0248													0
18	13,50	20,00	0,9210	0,0110	-0,0250													0
19	14,25	21,75	0,9200	0,0250	-0,0250	{7,0}												0
20	15,00	21,25	0,9200	0,0060	-0,0250		{7,0.1}											0
21	15,75	20,00	0,9180	-0,0125	-0,0265													0
22	16,50	20,00	0,9180	-0,0190	-0,0285													0
23	17,25	16,25	0,9170	-0,0215	-0,0288													0
24	18,00	20,00	0,9150	-0,0240	-0,0290													0
25	18,75	20,00	0,9140	-0,0225	-0,0293									{8,0.35}				0
26	19,50	24,00	0,9130	-0,0210	-0,0295										{8,0.2}			0
27	20,25	23,75	0,9130	-0,0150	-0,0318													0
28	21,00	23,50	0,9130	-0,0090	-0,0210													0
29	21,75	30,00	0,9100	0,0090	-0,0210													0
30	22,50	41,00	0,9080	0,0000	-0,0250													0
31	23,25	52,00	0,9080	0,0000	-0,0260									{9,0.05}				0
32	24,00	64,00	0,9080	0,0120	-0,0280										{9,0.055}			0





Наукове видання

**Проців Володимир Васильович**

**МОДЕЛЮВАННЯ ГАЛЬМУВАННЯ ШАХТНОГО ПОТЯГА  
РЕЙКОВИМИ ГАЛЬМАМИ**

Монографія  
(Російською мовою)

Друкується в авторській редакції

Підписано до друку 11.11.2011. Формат 42×30/4.  
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 10,5.  
Обл. -вид. арк. 14,3. Тираж 300 пр. Зам. № .

Підготовлено до друку та видруковано  
у ДНВЗ «Національний гірничий університет».  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004 р.  
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.