

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

На правах рукописи



Михайлов Сергей Владимирович

**ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ В КОНТАКТАХ КОЛЕС
ЭКИПАЖА И РЕЛЬСОВ В БЕЗБАЛЛАСТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ**

2.9.2. Железнодорожный путь,
изыскание и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Савин Александр Владимирович

Москва - 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
1.1. История развития теории расчетов пути на прочность.....	11
1.2. Расчет пути на прочность.....	17
1.2.1. Нахождение динамической нагрузки от колеса на рельс	17
1.2.2. Нахождение эквивалентной нагрузки на путь	21
1.2.3. Нахождение показателей напряженно-деформированного состояния элементов конструкции верхнего строения пути	22
1.3. Расчет на прочность безбалластного пути.....	25
1.3.1. Метод расчета изгибающей нагрузки для трехслойной системы, состоящей из несущей плиты и связанного несущего слоя без связки на упругой опоре	27
1.3.2. Метод расчета изгибающей нагрузки для трехслойной системы, состоящей из несущей плиты и связанного несущего слоя со связкой на упругой опоре.....	29
1.4. Модель колебаний пути, как многослойной балки, лежащей на упругом основании Винклера, или основании, имеющем свойства основания Винклера...	31
Выводы к главе 1	36
2. НАХОЖДЕНИЕ МАТРИЦЫ ВЗАИМНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В БЕЗБАЛЛАСТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ.....	38
2.1. Алгоритм нахождения матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил в модели колебаний пути, как трехслойной балки	38
2.2. Нахождение матрицы спектральных плотностей неровностей пути	40
2.3. Нахождение частотных матриц зависимости прогибов и изгибающих моментов слоев конструкции от вертикальных динамических сил, действующих на путь	41
2.4. Нахождение параметров слоев конструкции пути	52
2.5. Нахождение частотной матрицы зависимости перемещений масс от вертикальных динамических сил, действующих на путь	53

2.5.1. Случай произвольного типа экипажа.....	53
2.5.2. Случай четырехосного грузового вагона.....	57
2.6. Нахождение матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь, в модели колебаний пути, как трехслойной балки	61
Выводы к главе 2	64
3. ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТОВ	65
3.1. Исходные данные	65
3.2. Нахождение частотных матриц зависимости прогибов и изгибающих моментов слоев конструкции от вертикальных динамических сил, действующих на путь	68
3.3. Нахождение матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь	74
3.4. Нахождение средних значений и среднеквадратических отклонений прогибов и напряжений в слоях конструкции пути	77
3.5. Результаты расчетов, выполненных при помощи модели расчета на прочность безбалластного пути, предложенной Й. Айзенманом, Г. Лейкауфом.....	86
3.6. Сравнение результатов расчетов и натуральных испытаний.....	90
Выводы к главе 3	91
4. РАСЧЕТ СРОКА СЛУЖБЫ БЕЗБАЛЛАСТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ	93
4.1. Метод расчета срока службы безбалластного пути.....	95
4.2. Модель колебаний рельса, как однослойной балки, лежащей на упругом основании	96
4.3. Расчет срока службы безбалластной конструкции.....	101
4.3.1. Расчет срока службы безбалластной конструкции с применением модели колебаний пути, как однослойной балки.....	101
4.3.2. Расчет срока службы безбалластной конструкции с применением модели колебаний пути, как трехслойной балки. Сравнение результатов расчетов на моделях.....	103

4.4. Оценка экономического эффекта от расчета срока службы безбалластной конструкции пути	108
Выводы к главе 4	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ В	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	185
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	189

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время перед железнодорожным транспортом России стоят задачи увеличения массы грузов и скорости перевозок, что требует развития тяжеловесного и высокоскоростного движения. Повышение скорости движения и нагрузки на ось, а также различные климатические условия предполагают применение новых конструкций верхнего строения пути, при условии обязательного сохранения его стабильности. Для решения подобных задач в мировой практике широко распространены безбалластные конструкции, однако проведенные исследования сфер их использования в условиях российских железных дорог продемонстрировали ограниченность их применимости. Таким образом, задача выбора оптимальных конструкций верхнего строения пути для конкретных условий эксплуатации является крайне актуальной, а её решение требует расчета стоимости жизненного цикла. При этом проведение натурных испытаний весьма затруднительно, и, зачастую, экономически нецелесообразно, что свидетельствует о необходимости применения математического моделирования. Одной из широко используемых на практике при решении данной задачи, является модель колебаний пути как трехслойной балки, лежащей на модифицированном основании Винклера. Эта модель позволяет получить вероятностные оценки таких характеристик верхнего строения пути, как углы поворота сечений, изгибающие моменты, поперечные силы, прогибы, напряжения в элементах конструкции. Знание подобных оценок позволяет решать задачи увеличения срока службы конструкции, прогнозирования ремонтов верхнего строения пути, исследования поведения конструкции при ударном взаимодействии колеса и рельса, делает возможным оценку вероятности превышения данными характеристиками существующих нормативных значений. Использование данной модели позволяет проводить расчет средних значений и среднеквадратических отклонений случайных процессов для каждого из рассматриваемых слоев, что является немаловажным для ряда задач, связанных с исследованием безбалластных конструкций.

Нахождение этих вероятностных характеристик требует расчета матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь, однако, в настоящее время отсутствует метод ее нахождения для модели трехслойной конструкции, и для решения текущих задач используется приблизительная оценка.

Степень разработанности темы. Исследования методов оценки воздействия экипажа на путь, расчета статистических характеристик случайных процессов, возникающих в конструкции верхнего строения пути, изложены в работах В.Г. Альбрехта, Е.С. Ашпиза, Е.М. Бромберга, А.Л. Васютынского, М.Ф. Вериги, В.М. Гаврилова, Б.Э. Глюзберга, А.М. Годыцкого-Цвирко, В.Н. Данилова, В.Д. Дановича, П.И. Дыдышко, В.М. Ермакова, О.П. Ершкова, Г.Г. Желнина, А.Я. Когана, Б.Г. Коренева, С.С. Кохманюка, В.П. Крачковского, С.С. Крепогорского, В.С. Лысюка, П.П. Мельникова, Г.Б. Муравского, В.О. Певзнера, Ю.Л. Пейча, Н.П. Петрова, И.В. Прокудина, Ю.С. Ромена, М.Н. Ручимского, Б.Н. Сергеева, О.А. Сулова, С.П. Тимошенко, В.Ф. Ушкалова, А.П. Филиппова, М.А. Фришмана, Г.М. Шахунянца, В.Ф. Яковлева.

Аналогичные исследования для безбалластных конструкций проводились в работах И.В. Амеличева, Н.И. Ананьева, В.Ф. Барабошина, Ю.Д. Волошко, А.В. Замуховского, С.И. Клинова, А.Ф. Колоса, Н.Д. Кравченко, А.Д. Разуваева, А.В. Савина, В.В. Третьякова.

За рубежом подобные исследования изложены в работах P.Dieter, I. Dörr, R.V. Dukkipati, I. Eisenmann, V.K. Garg, I. T. Kenney, G. Leykauf, G. Marie, P.M. Mathews, E. Winkler, H. Zimmerman.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка метода прогнозирования срока службы безбалластного пути с учетом вертикальных динамических сил, вызванных неровностями пути в профиле.

Для достижения данной цели поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Разработка метода расчета матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил через неровности пути в профиле в модели трехслойной балки, лежащей на модифицированном основании Винклера.

2) Получение характеристик случайных процессов изменения прогибов и напряжений в слоях безбалластной конструкции от воздействия вертикальных динамических сил, вызванных неровностями пути.

3) Определение влияния случайных процессов изменения прогибов и напряжений в слоях безбалластной конструкции на срок ее службы.

4) Оценка возникающих расхождений между результатами расчетов срока службы безбалластного пути, полученных при помощи предлагаемого метода по сравнению с существующим.

Объект исследования. Безбалластный путь как трехслойная балка, лежащая на модифицированном основании Винклера

Предмет исследования. Взаимодействие поездной нагрузки и безбалластного пути с учетом вертикальных динамических сил, вызванных неровностями пути.

Методы исследования. В исследовании использованы следующие методы:

1) Обобщение и анализ отечественного и зарубежного опыта в области моделирования воздействия экипажа на путь;

2) Преобразование системы дифференциальных уравнений с частными производными четвертого порядка и нахождение частотных характеристик, описывающих модель колебаний пути, как трехслойной конструкции;

3) Математическое моделирование вертикальных динамических сил, возникающих при воздействии четырехосного грузового вагона на железнодорожный путь;

4) Математический аппарат теории случайных процессов при нахождении вероятностных оценок характеристик верхнего строения пути;

5) Компьютерное моделирование при проведении численных расчетов и анализе полученных результатов.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Разработан метод расчета матрицы взаимных спектральных плотностей сил через неровности пути в профиле в модели колебаний пути, как

трехслойной балки, лежащей на модифицированном основании Винклера, для оценки срока службы БКП;

2) Найдены частотные характеристики, связывающие вектор динамических сил в контактах колес четырехосного грузового вагона и рельсов с вектором вертикальных смещений колесных центров в вагоне, что позволяет рассчитать матрицу взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь, с учетом неровностей пути в профиле;

3) Установлена зависимость расчетного значения срока службы безбалластной конструкции от скорости движения поезда, осевой нагрузки вагона и грузонапряженности линии, при заданных параметрах конструкции пути;

4) Установлено, что разница в результатах расчета срока службы безбалластной конструкции пути для существующих условий ВСМ с применением моделей однослойной балки и трехслойной балки составляет порядка 5-10%. С ростом скорости движения и нагрузки на ось расхождение между результатами расчетов на моделях увеличивается, и, при достаточно больших значениях данных параметров, может превышать 20-30%, что делает целесообразным использование метода, предложенного в настоящей работе.

Достоверность результатов. Достоверность разработанного метода проверена расчетами на ЭВМ с использованием реальных исходных данных и сравнением расчетных показателей с результатами проведенных натурных экспериментов по определению напряжений и прогибов.

На защиту выносятся:

1) Математическая модель воздействия четырехосного грузового вагона на железнодорожный путь как на трехслойную балку, лежащую на модифицированном основании Винклера, позволяющая определить срок службы БКП;

2) Метод расчета матрицы взаимных спектральных плотностей динамических сил при заданных статистических параметрах неровностей пути в профиле;

3) Найденные при помощи данного метода статистические характеристики случайных процессов изменения прогибов и напряжений в слоях исследуемой безбалластной конструкции пути с учетом вертикальных динамических сил, вызванных неровностями пути.

Практическая значимость.

Предложенная математическая модель и численные расчеты использованы для:

- определения допустимых геометрических размеров бетонной несущей плиты при разработке первой редакции ГОСТ Р Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля

- формирования предложений по изменению ГОСТ 32698-2014 Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля.

- разработки нового типа рельсового скрепления (заявки на патент № 2022112623, 2022112624, 2022112625, 2022112626, 2022112627 от 11.05.2022).

Результаты данной работы могут быть использованы при:

- оценке срока службы безбалластного пути по результатам эксперимента на опытном полигоне и обосновании выбора конструкции;

- оценке вероятности превышения допустимых значений напряжений в слоях безбалластной конструкции пути;

- расчете стоимости жизненного цикла и прогнозировании ремонтов безбалластного пути.

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

- 1) Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта «Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта», г. Москва, АО «ВНИИЖТ», 2019 г.;

2) XIX Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», г. Москва, РУТ МИИТ, 2018 г.;

3) Научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование. ИСУЖТ-2014», секция №3, г. Москва, РУТ МИИТ, 2014 г.;

Публикации. Основные материалы по теме диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 4 из рекомендованного ВАК перечня.

Структура и объем работы диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 146 наименований и 5 приложений. Объем диссертации составляет 128 страниц, включая 14 таблиц и 48 рисунков.

1. АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. История развития теории расчетов пути на прочность

«При проектировании конструкций железнодорожного пути и его элементов, выбора их геометрических форм, показателей прочности и надежности, определении наибольших допустимых нагрузок на ось и скоростей движения подвижного состава, норм устройства» [1] и содержания пути, необходимо уметь оценивать показатели его напряженно-деформированного состояния.

В период середины XIX – начала XX веков учеными были начаты исследования, «посвященные задаче нахождения величины нагрузки, передаваемой от подвижного состава на путь. В это время были разработаны первые математические модели взаимодействия экипажа и пути – модель рельса как балки на сплошном упругом основании и модель рельса как балки на многих упругих опорах» [1]. Эти направления впоследствии развивались параллельно друг другу. В то же время появились первые средства диагностики железнодорожного пути, а также были проведены первые экспериментальные исследования.

В 1835 г. «П. П. Мельников рассматривал рельс как балку, лежащую на двух жестких опорах и нагруженную вертикальной нагрузкой в своей работе “О железных дорогах”» [2].

В 1847 г. «в институте инженеров путей сообщения Ф.И. Энрольдом была предложена формула для расчета рельса на изгибную прочность, которая была использована на практике при расчетах рельсов казенных железных дорог, а в последствие применялась проектировщиками в США» [3].

В 1867 году Э. Винклером была представлена модель балки на сплошном упругом основании [4].

В 1888 г. «немецкий ученый Циммерман усложнил схему, предложенную П.П. Мельниковым, и предложил рассматривать рельс в качестве неразрезной балки, лежащей на четырех упругих опорах» [5].

В конце XIX – начале XX веков в экспериментальных работах А. Л. Васютынского [6, 7] было введено понятие коэффициента постели шпалы. Им же были исследованы различия в упругих деформациях элементов верхнего строения пути, установлено отставание во времени деформаций пути от действующих на него сил, а также собраны материалы по упругим характеристикам и деформациям пути.

«Используя результаты опытов по измерениям упругих деформаций пути, проведенных в 1890–1898 гг. И. Р. Стецевичем и А. Л. Васютынским, С. П. Тимошенко в качестве расчетной схемы железнодорожного пути была принята балка, лежащая на сплошном упругом основании. Им были предложены формулы для расчета сил взаимодействия колес и рельса и дана количественная оценка их влияния на колебания пути» [3]. В дальнейшем, данная модель получила развитие усилиями проф. А. М. Годыцким-Цвирко с учетом предположения о равномерности распределения массы пути по его протяженности, а в 1923 г. вышла в свет его работа «Взаимодействие пути и подвижного состава» [8].

«В. П. Крачковским было предложено проводить расчет пути в два этапа: на первом этапе определялись статические напряжения, а затем производился расчет динамических напряжений путем перемножения статических напряжений на динамический коэффициент» [9, 10]. Полученная величина сопоставлялась с допустимыми значениями, в результате чего делались окончательные выводы о допустимой скорости движения.

Академик Н. П. Петров внес весомый вклад в теорию взаимодействия пути и подвижного состава. В его работах «рельс рассматривается в качестве балки, имеющей бесконечную длину и лежащей на множестве точечных упругих опор или на сплошном упругом основании. Для расчетов им использовалась гипотеза о совпадении кривой прогибов рельса под действием неподвижной статической нагрузки с аналогичной кривой под действием равной по величине динамической нагрузки. Им были заложены основы применения теории вероятностей к

наблюдениям за напряжениями и деформациями в железнодорожном пути» [3]. В 1915 г. опубликована работа Н. П. Петрова «Давление колеса на рельсы железных дорог, прочность рельсов и устойчивость пути» [11].

«Создание в 1918 г. Экспериментального института путей сообщения положило начало широким исследованиям в области взаимодействия колеса и рельса. Разработанная программа исследований статических деформаций рельса включала в себя изучение изгиба рельса в зависимости от качества балласта и упругих опор, изучение влияния неровностей пути и колес подвижного состава (в частности ползунов на колесах) на возникающие вертикальные силы и деформации» [3], и многое другое. Данная программа была составлена при участии крупнейших специалистов – К. Ю. Цеглинского, П. А. Велихова, Н. Т. Митюшина, В. К. Дмоховского, Э. Э. Гековича, Р. П. Гриненко и др.

На базе работ А. Л. Васютнинского, Н. П. Петрова, К. Ю. Цеглинского, А. А. Холодецкого и др. была разработана первая «Инструкция по определению нагрузок на железнодорожный путь и скоростей движения поездов в зависимости от типа верхнего строения пути», которая затем несколько раз перебатывалась и переиздавалась. Так, в 1929г., а затем в 1931г. были введены уточненные официальные методы расчетов пути на прочность.

В 1933 г. опубликована «работа французского ученого Г. Марье, посвященная вопросам взаимодействия пути и подвижного состава, в который были приведены детальные исследования колебательного процесса подвижного состава» [12].

Значительный вклад в развитие теории динамики пути и его взаимодействия с подвижным составом в разное время внесли ученые В. Г. Альбрехт [13], Е.С. Ашпиз [14-16], Е. М. Бромберг [17], М. Ф. Вериго [17-21], В. Н. Данилов [22-24], В. Д. Данович [25, 26], И. Дёрр [27], В. М. Ермаков [28], О. П. Ершков [29], Г. Г. Желнин [30, 31], И. Кенией [32], А. Я. Коган [33-44], Б. Г. Коренев [45], С. С. Кохманюк [46], В. П. Крачковский [47, 48], С. С. Крепкогорский [49,50], В. С. Лысюк [31], Г. Б. Муравский [51, 52], П. Мэтьюз [53], В. О. Певзнер [54, 55], И. В. Прокудин [56], Ю. С. Ромен [57-59], М. Н. Ручимский [45], Б. Н. Сергеев [60], С.П. Тимошенко [61, 62], В. Ф. Ушкалов [63], А. П. Филиппов [64], М. А.

Фришман [65], Г. М. Шахунянц [66-68], В. Ф. Яковлев [24], а также коллективы научных, академических и учебных институтов.

В 1956 г. за авторством М. Ф. Вериги, В. Н. Данилова, Е. М. Бромберга и М. А. Фришмана «издан обобщающий труд по взаимодействию пути и подвижного состава» [17]. «М. Ф. Вериги разработал вероятностный анализ отдельных сил и метод композиции их результирующего действия и в 1972 г., после проведения экспериментальных и теоретических исследований, – предложения по корректировке практического метода расчета пути на прочность. М. Ф. Вериги было предложено теоретическое обоснование расчета вертикальных сил, действующих на путь от подвижного состава, основанное на методах теории вероятностей. Им была сформулирована гипотеза о равенстве сопротивления движению поезда, связанного с работой сил трения в пути при движении нагрузки, произведению вертикальной нагрузки, передаваемой от колеса на рельс, на угол поворота сечения рельса в точке контакта с колесом» [3].

В. Н. Даниловым были проведены фундаментальные исследования, «связанные с особенностями работы пути в зоне стыка рельсов, и разработана схема расчета пути в зоне стыка в виде бесконечной балки на упругом основании с упругим шарниром» [23].

Г. М. Шахунянц внес существенный вклад в теорию расчетов верхнего строения пути [66–68], уточнил гипотезу Н. П. Петрова, предложив свою «гипотезу о совпадении кривых прогибов рельса под действием движущейся динамической нагрузки и при действии такой же по величине постоянной движущейся нагрузки» [3].

В 1968 г. А. Я. Коганом «для исследования динамики балки под действием переменной во времени подвижной нагрузки был предложен принципиально новый частотный метод, что позволило найти точное аналитическое решение поставленной задачи. В его основе лежит распространение метода частотных характеристик, используемого для решения обыкновенных линейных дифференциальных уравнений [69], на определенный тип линейных дифференциальных уравнений в частных производных» [38]. В дальнейшем

данный метод был развит в работах [18, 33, 35] и распространен на основании Власова – Леонтьева [25], а также на основании с неупругим сопротивлением, удовлетворяющим гипотезе Е. С. Сорокина [70].

В 1986 г. М. Ф. Вериге и А. Я. Коганам опубликовано фундаментальное исследование «Взаимодействие пути и подвижного состава» [18]. В нем излагаются «два метода расчета пути на прочность – практический, широко применяемый при движении поездов со скоростями до 100–120 км/ч, и метод в полной постановке задачи, позволяющий проводить исследования сил, возникающих при взаимодействии пути и подвижного состава при любых скоростях движения экипажей» [18] с использованием ЭВМ.

Метод частотных характеристик успешно использовался в исследованиях горизонтального изгиба и кручения рельса под действием подвижной динамической нагрузки [71], при исследованиях колебаний многослойных балок бесконечной длины на упругом основании [72]. Также он применялся «при расчете нестационарного напряженно-деформированного состояния элементов конструкции пути в зоне стыка рельсов» [39], «напряженно-деформированного состояния грунтового подшпального основания при воздействии динамической нагрузки» [40], «в исследованиях нестационарных процессов, возникающих в однородном поезде при произвольном расположении в нем тяговых единиц» [41].

В настоящее время для оценки напряженно-деформированного состояния пути могут быть использованы программы на ЭВМ, в основе которых лежит метод конечных элементов (МКЭ). Подобный способ расчета привлекателен своей универсальностью, однако он не позволяет провести анализ внутренних связей в системе и раскрыть физическую суть происходящих в ней колебательных и волновых процессов, что может приводить к ошибочным результатам [34].

Увеличение объемов перевозимых на железных дорогах грузов, вызванное развитием российской экономики, повлекло за собой использование тяжеловесных поездов, а также вагонов с повышенной нагрузкой на ось. При этом, наблюдается рост пассажиропотока, а также «возникает потребность в конкуренции с автомобильным и авиационным транспортом. Проблема

возрастающего объема перевозок пассажиров и грузов в условиях отсутствия резервов провозной и пропускной способности ведет к необходимости использования новых конструкций пути» [73], способных обеспечить повышение массы поездов, их длины и скорости движения, а также минимизацию временных затрат на проведение всех видов путевых работ.

Одной из главных и наиболее ресурсоемких проблем, остро стоящей перед железнодорожным транспортом России, является проблема деформативности пути. Эта проблема вызывает значительные затраты на текущее содержание пути, сокращает время полезной эксплуатации, уменьшает пропускную способность железнодорожных линий, что особенно значимо в условиях роста скорости движений, веса и длины поездов. «Одним из способов повышения стабильности пути является применение безбалластных конструкций пути. За рубежом существует опыт использования высокоскоростного движения как на балластном, так и на безбалластном верхнем строении пути (БВСП). При этом среди вновь возводимых линий наблюдается существенное смещение процентного соотношения в сторону БВСП» [73].

Исследованиями безбалластных конструкций пути в разные годы занимались И. В. Амеличев [74, 75], Н. И. Ананьев [75–79], В. Ф. Барабошин [76–80], Ю. Д. Волошко [81], А. В. Замуховский [82 - 84], С. И. Клинов [85–87], А. Ф. Колос [88–90], Н. Д. Кравченко [91–96], А. Д. Разуваев [97], А. В. Савин [42,73,97-112], В. В. Третьяков [105, 106, 113], I. Eisenmann [114–118], G. Leykauf [118]. При этом, вопрос целесообразности применения безбалластных конструкций пути на сети российских железных дорог остается открытым.

В условиях эксплуатации, «когда скорость движения пассажирских поездов может превышать 300км/ч, а грузовых – 120 км/ч, и нагрузки на ось могут быть более 30 т., для обеспечения безопасности движения поездов» [73] и надежности безбалластного пути с учетом максимальной производительности транспорта и экономической эффективности его использования необходимо знать возникающие в нем динамические процессы. При этом, безбалластные конструкции пути мало исследованы, а проведение натурных испытаний связано

со значительными затратами и сложностью выбора подходящих условий. Для исследования таких показателей, как вертикальные динамические силы в контактах колес экипажа и рельсов, прогибы и напряжения, возникающие в слоях безбалластной конструкции, могут быть использованы различные математические модели [34, 36, 42, 118-122]. Остановимся подробнее на моделях, наиболее часто применяемых на практике.

1.2. Расчет пути на прочность

1.2.1. Нахождение динамической нагрузки от колеса на рельс

Для определения максимальной динамической нагрузки колеса на рельс используется формула [119, 120]:

$$P_{\text{дин}}^{\text{max}} = P_{\text{ср}} + \lambda S, \quad (1.1)$$

где $P_{\text{ср}}$ – среднее значение вертикальной нагрузки от колеса на рельс, кг;

S – среднеквадратическое отклонение вертикальной динамической нагрузки от колеса на рельс, кг;

λ – нормирующий множитель, определяющий вероятность появления максимальной вертикальной динамической нагрузки.

Среднее значение вертикальной нагрузки от колеса на рельс $P_{\text{ср}}$ рассчитывается по формуле

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{р}}^{\text{ср}}, \quad (1.2)$$

где $P_{\text{ст}}$ – статическая нагрузка от колеса на рельс, кг;

$P_{\text{р}}^{\text{ср}}$ – среднее значение динамической нагрузки от колеса на рельс, вызванной вертикальными колебаниями надрессорного строения, кг.

$$P_{\text{р}}^{\text{ср}} = 0,75P_{\text{р}}^{\text{max}}, \quad (1.3)$$

где P_p^{max} – максимальная динамическая нагрузка от колеса на рельс, вызванная вертикальными колебаниями надрессорного строения, кг.

При наличии известных экспериментальных значений коэффициента динамических добавок от вертикальных колебаний надрессорного строения k_d :

$$P_p^{max} = k_d(P_{ст} - q), \quad (1.4)$$

где q – вес необрессоренных частей, отнесенный к колесу.

В случае отсутствия известных экспериментальных данных величина k_d может быть найдена по формуле

$$k_d = 0,1 + 0,2 \frac{V}{f_{ст}}, \quad (1.5)$$

где $f_{ст}$ – статический прогиб рессорного подвешивания, мм;

V – скорость движения, км/ч.

Для расчета динамической нагрузки от колеса на рельс P_p^{max} с применением эмпирических зависимостей величин динамических прогибов рессорного подвешивания z_{max} от скоростей движения V используется формула:

$$P_p^{max} = \psi z_{max}, \quad (1.6)$$

где z_{max} – динамический прогиб рессорного подвешивания, мм;

ψ – жесткость рессорного подвешивания, приведенная к колесу, кг/мм.

Для нахождения среднеквадратического отклонения от среднего значения вертикальной динамической нагрузки от колеса на рельс S используется формула:

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{нп}^2 + \left(1 - \frac{t}{100}\right) S_{ннк}^2 + \frac{t}{100} S_{инк}^2}, \quad (1.7)$$

где t – число колес рассчитываемого типа, имеющих на поверхности катания изолированные плавные неровности, отнесенное к общему количеству колес данного типа, эксплуатируемых на участке (в %);

S_p – среднеквадратическое отклонение от среднего значения динамической нагрузки от колеса на рельс, вызванной вертикальными колебаниями надрессорного строения, кг, $S_p = 0,8P_p^{max}$;

$S_{нп}$ – среднеквадратическое отклонение от среднего значения

динамической нагрузки от колеса на рельс, вызванной силами инерции необрессоренных масс, возникающих при прохождении изолированной неровности пути, кг;

$S_{\text{ннк}}$ – среднеквадратическое отклонение от среднего значения динамической нагрузки от колеса на рельс, вызванной силами инерции необрессоренных масс, которые возникают по причине наличия на поверхности катания колес непрерывных неровностей, кг;

$S_{\text{инк}}$ – среднеквадратическое отклонение от среднего значения динамической нагрузки от колеса на рельс, вызванной силами инерции необрессоренной массы, которые возникают по причине наличия плавных изолированных неровностей на поверхности катания колес, кг.

Среднеквадратическое отклонение от среднего значения динамической нагрузки от колеса на рельс $S_{\text{нп}}$, вызванной силами инерции несбрессоренных масс $P_{\text{нп}}^{\text{max}}$, которые возникают при проходе изолированной неровности пути, рассчитываются по формуле:

$$S_{\text{нп}} = 0,707 \cdot P_{\text{нп}}^{\text{max}}, \quad (1.8)$$

$$S_{\text{нп}} = 0,565 \cdot 10^{-8} \alpha_1 \beta \varepsilon \gamma l_{\text{ш}} \sqrt{\frac{U}{k}} \sqrt{q P_{\text{cp}}} V, \quad (1.9)$$

где α_1 – коэффициент, который учитывает соотношение коэффициентов пути с деревянными и железобетонными шпалами;

β – коэффициент, учитывающий зависимость возникновения динамической неровности от типа рельсов;

ε – коэффициент, учитывающий образование динамической неровности в зависимости от конструкции и материала шпалы;

γ – коэффициент, учитывающий зависимость образования динамической неровности от рода балласта;

U – модуль упругости рельсового основания, кг/см².

$l_{\text{ш}}$ – расстояние между осями шпал, см.

Для нахождения среднеквадратического отклонения от среднего значения

динамической нагрузки от колеса на рельс $S_{\text{ннк}}$, вызванной силами инерции необрессоренной массы $P_{\text{ннк}}^{\text{max}}$, возникающими при движении колеса, имеющего на поверхности катания плавную непрерывную неровностью, используется формула:

$$S_{\text{ннк}} = 0,225P_{\text{ннк}}^{\text{max}}, \quad (1.10)$$

$$P_{\text{ннк}}^{\text{max}} = \frac{\alpha_0 K_1 UV^2 \sqrt{q}}{d^2 \sqrt{kU - 3,26k^2q}}, \quad (1.11)$$

где α_0 – коэффициент, который характеризует отношение необрессоренной массы колеса и массы пути, участвующей во взаимодействии;

K_1 – коэффициент, который характеризует неравномерность образования проката поверхности катания колес. Для тепловозов, электровозов, вагонов и моторвагонного подвижного состава K_1 принимается равным 0,23;

q – вес необрессоренных частей, отнесенный к колесу;

d – диаметр колеса, см;

k – коэффициент относительной жесткости рельсового основания и рельса, см^{-1} .

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EJ}}, \quad (1.12)$$

где E – модуль упругости рельсовой стали.

Среднеквадратическое отклонение от среднего значения динамической нагрузки от колеса на рельс $S_{\text{инк}}$, вызванной силами инерции необрессоренной массы $P_{\text{инк}}$ и возникающих по причине наличия изолированных плавных неровностей на поверхности катания рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{инк}} = 0,735\alpha_0 \frac{U}{k} e, \quad (1.13)$$

где e – расчетное значение глубины изолированной плавной неровности на поверхности катания колеса.

1.2.2. Нахождение эквивалентной нагрузки на путь

«При проведении расчетов рельса как балки, лежащей на сплошном упругом основании, происходит замена системы сосредоточенных колесных нагрузок эквивалентными одиночными нагрузками» [119, 120]. «Так как вероятные максимумы динамической нагрузки расчетного и соседних колес не совпадают в силу случайной природы, то при нахождении эквивалентных нагрузок используется максимальная вероятная нагрузка для расчетного колеса, а также среднее значение нагрузок для соседних колес. Максимальная эквивалентная нагрузка для расчетов напряжений от кручения и изгиба в рельсах рассчитывается по формуле» [119, 120]:

$$P_{\text{ЭКВ}}^I = P_{\text{ДИН}}^{\text{max}} + \sum \mu_i P_{\text{СП}i}, \quad (1.14)$$

где μ_i – ординаты линии влияния изгибающих моментов рельса в сечениях пути, расположенных под колесными нагрузками от осей экипажа, смежных с расчетной осью.

Значения μ_i находятся по формуле:

$$\mu_i = e^{-kl_i}(\cos kl_i - \sin kl_i), \quad (1.15)$$

где l_i – расстояние между центром оси расчетного колеса и колеса i оси, смежной с расчетной.

Для нахождения максимальной эквивалентной нагрузки при расчетах сил и напряжений в элементах подрельсового основания используется формула:

$$P_{\text{ЭКВ}}^{II} = P_{\text{ДИН}}^{\text{max}} + \sum \eta_i P_{\text{СП}i}, \quad (1.16)$$

где η_i – ординаты линии влияния прогибов рельса в сечениях пути, расположенных под колесными нагрузками от осей экипажа, смежных с расчетной осью.

$$\eta_i = e^{-kl_i}(\cos kl_i + \sin kl_i) \quad (1.17)$$

1.2.3. Нахождение показателей напряженно-деформированного состояния элементов конструкции верхнего строения пути

«Для нахождения изгибающего момента в рельсах при воздействии эквивалентной нагрузки используется формула» [82, 83]:

$$M = \frac{P_{\text{ЭКВ}}^I}{4k} \quad (1.18)$$

Для нахождения максимальной нагрузки на шпалу используется формула:

$$Q = \frac{kl_{\text{ш}}}{2} P_{\text{ЭКВ}}^{II} \quad (1.19)$$

Для нахождения максимального прогиба рельса используется формула:

$$y = \frac{k}{2U} P_{\text{ЭКВ}}^{II} \quad (1.20)$$

Максимальные значения напряжений, возникающих в элементах верхнего строения пути, рассчитываются по формулам:

– под действием момента M в подошве рельса от изгиба:

$$\sigma_0 = \frac{P_{\text{ЭКВ}}^I}{4kW}; \quad (1.21)$$

– в кромках подошвы рельса:

$$\sigma_0 = f\sigma_{\text{л}}; \quad (1.22)$$

– при железобетонной шпале в прокладке, на смятие под подкладкой в деревянной шпале:

$$\sigma_0 = \frac{kl_{\text{ш}}}{2\omega} P_{\text{ЭКВ}}^{II}; \quad (1.23)$$

– в балласте под шпалой:

$$\sigma_0 = \frac{kl_{\text{ш}}}{2\Omega_{\alpha}} P_{\text{ЭКВ}}^{II}, \quad (1.24)$$

где W – момент сопротивления рельса относительно подошвы, см³;

f – коэффициент перехода к кромочным напряжениям в подошве рельса от осевых напряжений, который учитывает эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки и воздействие на рельс горизонтальных нагрузок;

Ω_α – площадь полушпалы с учетом поправки на изгиб, см³;

ω – площадь рельсовой подкладки, см².

Нормальные напряжений σ_h в балласте, в т. ч. на основной площадке земляного полотна, на глубине h от подошвы шпалы по расчетной вертикали рассчитываются как сумма:

$$\sigma_h = \sigma_{h_1} + \sigma_{h_2} + \sigma_{h_3}, \quad (1.25)$$

где σ_{h_1} и σ_{h_3} – напряжения от воздействия первой и третьей шпал соответственно, которые лежат по обе стороны от расчетной;

σ_{h_2} – напряжения под расчетным колесом от воздействия второй (расчетной) шпалы в сечении пути.

Нормальные вертикальные напряжения под расчетной шпалой рассчитываются по формуле:

$$\sigma_{h_2} = \sigma_{бр} \varphi (2,55C_2 + m(0,635C_1 - 1,275C_2)), \quad (1.26)$$

где $C_1 = \frac{b}{2h} - \frac{b^3}{24h^3}$;

$C_2 = \frac{bh}{b^2 + 4h^2}$;

$m = \frac{8,9}{\sigma_{бр} + 4,35}$;

$\sigma_{бр}$ – напряжение на балласте под расчетной шпалой, осредненное по ширине, кг/см²;

h – глубина балластного слоя от подошвы шпалы, см;

b – ширина нижней постели шпалы, см;

φ – коэффициент, который учитывает пространственность приложения нагрузки и неравномерность распределения давления вдоль шпалы;

m – переходный коэффициент от давления на балласт, осредненного по ширине шпалы, к давлению под осью шпалы.

Для нахождения напряжений под расчетной шпалой на глубине h , вызванных воздействием соседних шпал с расчетной, используются формулы:

$$\sigma_{h_1} = 0,25\sigma_{Б12}A; \quad (1.27)$$

$$\sigma_{h_3} = 0,25\sigma_{Б32}A, \quad (1.28)$$

где $\sigma_{Б12}$ и $\sigma_{Б32}$ - среднее значение напряжений по подошве в соседних шпалах с расчетной, кг/см²;

A – коэффициент, который учитывает глубину шпалы h , ее ширину b и расстояние между шпалами $l_{ш}$.

Для нахождения возникающих в балласте напряжений под расчетной шпалой $\sigma_{бр}$ используется формула:

$$\sigma_{бр} = \frac{kl_{ш}}{2\Omega_{\alpha}} P_{II}^{экв}. \quad (1.29)$$

Определение напряжений «в балласте под шпалами, соседними с расчетной, производится исходя из условия максимальной динамической нагрузки от расчетного колеса, которое находится над расчетной шпалой и средних значений нагрузок от остальных колес» [123] по формуле (1.29).

Максимальное вероятное динамическое напряжение в зависимости от поездной нагрузки под подошвой расчетной $\sigma_{Бп}$ и соседних шпал $\sigma_{Бсп}$ находится по формулам:

$$\sigma_{Бп} = \sigma_{Бп}^{cp} + 2,5S_{Бп}, \quad (1.30)$$

$$\sigma_{Бсп} = \sigma_{Бсп}^{cp} + 2,5S_{Бсп}, \quad (1.31)$$

где $\sigma_{Бп}^{cp} = \frac{\sum \eta_i \sigma_{Би}^{cp}}{\sum \eta_i}$ – среднее напряжение от поездной нагрузки под расчетной шпалой;

$\sigma_{Бсп}^{cp} = \frac{\sum \eta_i \sigma_{Бси}^{cp}}{\sum \eta_i}$ – среднее напряжение от поездной нагрузки под шпалой, соседней (смежной) с расчетной;

$S_{Бп} = \sqrt{\frac{\sum \eta_i S_{Би}^2}{\sum \eta_i}}$ – среднеквадратическое отклонение напряжений от поездной нагрузки под соседней шпалой;

$S_{Бп} = \sqrt{\frac{\sum \eta_i S_{Би}^2}{\sum \eta_i}}$ – среднеквадратическое отклонение напряжений от поездной нагрузки под расчетной шпалой;

$$\sigma_{Би}^{cp} = \frac{kl_{ш}}{2\Omega_{\alpha}} P_{cp} \left(1 + \sum \eta\right), \quad (1.32)$$

$$S_{\text{Би}}^2 = \frac{kl_{\text{ш}}}{2\Omega_{\alpha}} S_i, \quad (1.33)$$

$$\sigma_{\text{Бси}}^{\text{ср}} = \frac{kl_{\text{ш}}}{2\Omega_{\alpha}} P_{\text{ср}} \sum \eta_{\text{с}}, \quad (1.34)$$

$$S_{\text{Бси}}^2 = \frac{kl_{\text{ш}}}{2\Omega_{\alpha}} \cdot 2\eta_{l_{\text{ш}}} S_i. \quad (1.35)$$

Здесь S_i находится из формулы (1.7), ординаты линии влияния прогибов рельсов η находятся по формуле (1.17) в зависимости от количества осей в тележках экипажей.

При этом по результатам исследований «безбалластных конструкций пути на Экспериментальном кольце в 2010–2014 г. было установлено, что основной причиной их выхода из строя является разрушение несущей бетонной плиты из-за образования пустот на стыке» [73] со слоем тощего бетона [73,124]. Это связано с попаданием воды в зазор, образующийся при проходе поезда из-за разницы прогибов слоев конструкции, что подтверждается и зарубежными исследованиями, а также результатами натурных испытаний. Таким образом, целесообразным является рассмотрение отдельно второго слоя безбалластной конструкции пути, что не предусмотрено представленным расчетом пути на прочность.

1.3. Расчет на прочность безбалластного пути

«В работе «Безбалластный путь для рельсовых путей» Й. Айзенманом и Г. Лейкауфом (Технический университет, г. Мюнхен) был предложен следующий вариант математической модели для безбалластного пути» [118].

Допустимая сжимающая нагрузка на грунт определяется по формуле:

$$\text{zul}\sigma_z = \frac{0,006E_{\text{dyn}}}{1+0,7\lg(n)}. \quad (1.36)$$

В соответствии с теорией балок с упругим опиранием, для нахождения сил в точках опирания используются следующие уравнения:

Эластичная длина рельса L определяется по формуле:

$$L = \left[\frac{4EI}{bC} \right]^{0,25}. \quad (1.37)$$

Прогиб рельса y находится по формуле:

$$y = \frac{1}{2bCL} \sum (Q_i \cdot \eta_i), \quad (1.38)$$

$$\eta_i = \frac{\sin \xi_i + \cos \xi_i}{e^{\xi_i}}, \quad (1.39)$$

$$\xi_i = \frac{x_i}{L}. \quad (1.40)$$

Сила в точке опоры S находится по формуле:

$$S = b \cdot C \cdot a \cdot y, \quad (1.41)$$

где E – модуль упругости рельса, Н/мм²;

I – Момент инерции рельса, мм⁴;

b – Ширина воображаемой продольной балки, мм;

C – Модуль балластной постели, Н/мм³;

Q_i – Сила, действующая на колесо, Н;

η_i – Фактор влияния для учета соседних осей;

x_i – Расстояние соседних осей от опорной оси, мм;

a – Расстояние между опорными точками, мм;

E_{dyn} – динамическая сила.

«Поскольку произведение $b \cdot C$ входит в формулы в качестве постоянного коэффициента, то можно произвести замену $b \cdot C = c/a$, где c – пружинная постоянная скрепления с рельсом, Н/мм» [73].

Для «случая двухслойных несущих плит необходимо различать систему I с отсутствием связи между несущей бетонной плитой сплошного армирования или асфальтовой несущей плитой и гидравлически-связанным несущим слоем («без связки») и систему II со связью между слоями («со связкой»). Для проведения расчета системных данных для этих систем может быть использован метод» [118],

предложенный профессором Айзенманом. В этом случае происходит преобразование реальной трехслойной системы в фиктивную двухслойную. Затем проводится «расчет упругой длины замененной балки L_E и изгибающих моментов для систем I и II от сил в точках опирания. При этом учет сил в опорных точках происходит только в положительной области линии моментов. Последним этапом является расчет нормальных растягивающих напряжений при изгибе σ_1, σ_2 на нижней стороне обоих слоев [73].

1.3.1. Метод расчета изгибающей нагрузки для трехслойной системы, состоящей из несущей плиты и связанного несущего слоя без связки на упругой опоре

На рисунке 1.1 показана система, которая состоит из несущей плиты и связанного несущего слоя без связки на упругой опоре.

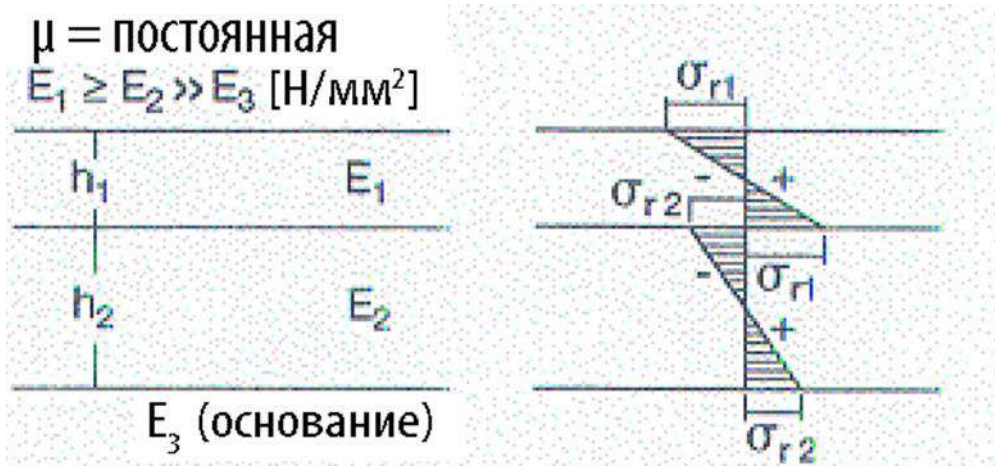


Рисунок 1.1 – Система I «без связки»

Для нахождения упругой длины замененной балки L_E используется формула:

$$L_E = \left[\frac{4E_E I_E}{b_E C} \right]^{0,25}, \text{ [мм]}. \quad (1.42)$$

Для нахождения момента инерции замененной балки I_E используется формула:

$$I_E = \frac{b_E * h_{I,II}^3}{12}, [\text{мм}^4]. \quad (1.43)$$

Момент изгиба $M_{I,II}$ на замененной балке находится по формулам:

$$M_{I,II} = \frac{L_E}{4} \cdot \sum (S_i * \mu_i), [\text{Н} * \text{мм}], \quad (1.44)$$

$$\mu_i = \frac{-\sin \xi_i + \cos \xi_i}{e^{\xi_i}}, \quad (1.45)$$

$$\xi_i = \frac{x_i}{L}, \quad (1.46)$$

где E_E - модуль упругости замененной балки, (Н/мм²);

b_E - половинная ширина лотка, мм;

S_i - силы в точках опирания, Н;

μ_i - фактор влияния для учета соседних осей.

Фиктивный модуль балластной постели k находится по формуле:

$$k = \frac{E_3}{h^x} \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}^3} \right], \quad (1.47)$$

$$h^x = 0,83 * h_1 * \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}} + c * h_2 * \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}, [\text{мм}]. \quad (1.48)$$

Здесь значение c принимается равным 0,83 в случае гидравлически связующих веществ и $c = 0,90$ для битумных связующих веществ.

Для нахождения толщины заменяющей системы с равной жесткостью используется формула:

$$h_I = \sqrt[3]{\frac{E_1 * h_1^3 * E_2 * h_2^3}{E_1}}, [\text{мм}]. \quad (1.49)$$

Нормальное растягивающее напряжение при изгибе в слоях 1 и 2 находится по формулам:

$$M_1 = M_I * \frac{E_1 * h_1^3}{E_1 * h_1^3 * E_2 * h_2^3}, [\text{Н} * \text{мм}] \quad (1.50)$$

$$M_2 = M_I * \frac{E_2 * h_2^3}{E_1 * h_1^3 * E_2 * h_2^3}, [\text{Н} * \text{мм}] \quad (1.51)$$

$$\sigma_{r1} = 6 * \frac{M_1}{h_1^2}; \sigma_{r2} = 6 * \frac{M_2}{h_2^2}, [\text{Н} * \text{мм}]. \quad (1.52)$$

Упругая длина рассчитывается по формуле:

$$l_I = \sqrt[4]{\frac{E_1 * h_1^3}{12 * (1 - \mu^2) * k}}, [\text{мм}] \quad (1.53)$$

где μ – коэффициент поперечного расширения;

Для бетона коэффициент μ принимается равным 0,15, для асфальта – $\mu = 0,50$.

Нормальные растягивающие напряжения при изгибе на нижней стороне несущей плиты находятся по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{6 * \beta_1 * M_1}{B_1 * h_1^2}, \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right] \quad (1.54)$$

$$\sigma_2 = \frac{6 * \beta_2 * M_1}{B_1 * h_2^2}, \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right]. \quad (1.55)$$

Нормальные растягивающие напряжения на нижней стороне несущего слоя рассчитываются по формулам:

$$\beta_1 = \frac{E * h_1^3}{E_1 * h_1^3 + E_2 * h_2^3}; \quad (1.56)$$

$$\beta_2 = (1 - \beta_1). \quad (1.57)$$

1.3.2. Метод расчета изгибающей нагрузки для трехслойной системы, состоящей из несущей плиты и связанного несущего слоя со связкой на упругой опоре

«На рисунке 1.2 показана система, которая состоит из несущей плиты и связанного несущего слоя со связкой на упругой опоре» [73].

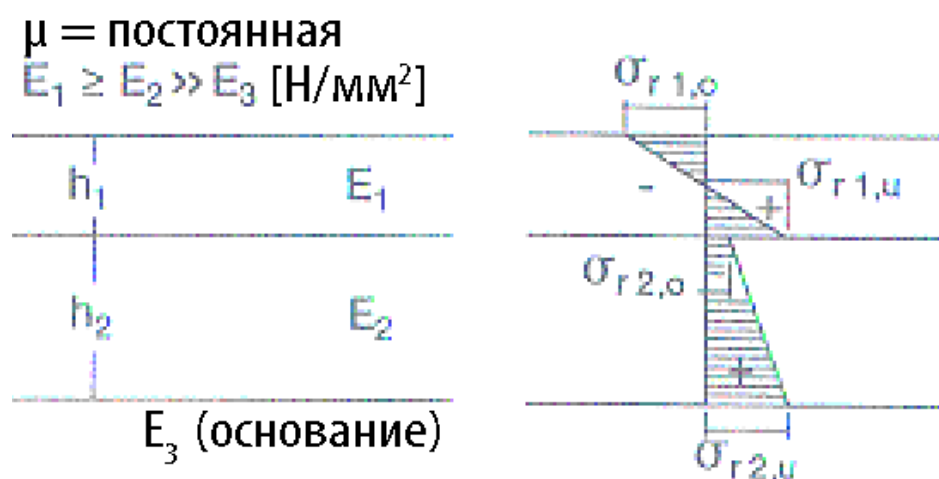


Рисунок 1.2 – Система II «со связкой»

Нахождение упругой длины замененной балки L_E , момента инерции I_E , момента изгиба M_{II} на замененной балке, фиктивного модуля балластной постели основания – аналогично расчетам для системы I.

Для нахождения толщины заменяющей системы с равной жесткостью используется формула:

$$h_{II} = h_1 + 0,9 * h_2 * \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}}, \text{ [мм]}. \quad (1.58)$$

Для нахождения нормального растягивающего напряжения при изгибе в первом и втором слоях для одной балки плиты с равной жесткостью используются формулы:

$$\chi = \frac{E_2}{E_1}; E = E_1, \quad (1.59)$$

$$I = \sum (I_i + F_i * x_i^2); e_0 = \frac{\sum F_i * x_i}{\sum F_i}, \quad (1.60)$$

где I – момент инерции балки плиты, мм^4 ;

$$e_0 = \frac{h}{2} * \frac{E_2 * h_2}{E_1 * h_1 + E_2 * h_2} + \frac{h_1}{2}, \text{ [мм]} \quad (1.61)$$

$$e_u = h - e_0, \text{ [мм]} \quad (1.62)$$

$$\sigma_{r1,0} = \frac{M_{II}}{I} * e_0; \sigma_{r1,u} = \frac{M_{II}}{I} * (h_1 - e_0), \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right] \quad (1.63)$$

$$\sigma_{r2,0} = \chi * \frac{M_{II}}{I} * (h_1 - e_0), \quad (1.64)$$

$$\sigma_{r2,u} = \chi * \frac{M_{II}}{I} * e_u, \left[\frac{H}{\text{мм}^2} \right]. \quad (1.65)$$

Упругая длина находится по формуле:

$$l_{II} = \sqrt[4]{\frac{E_1 * h_{II}^3}{12 * (1 - \mu^2) * k}}, [\text{мм}]. \quad (1.66)$$

Нормальные растягивающие напряжения при изгибе на нижней стороне несущей плиты находятся по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{M_{II} * (h_1 - e_o)}{B_1 * I}, \left[\frac{H}{\text{мм}^2} \right]. \quad (1.67)$$

Нормальные растягивающие напряжения на нижней стороне несущего слоя рассчитываются по формулам:

$$\sigma_2 = \frac{E_2 * M_{II} * e_u}{E_1 * B_2 * I}, \left[\frac{H}{\text{мм}^2} \right]. \quad (1.68)$$

Таким образом, применение модели, предложенной проф. Айзенманом и Лейкауфом дает возможность получить оценки прогибов и напряжений, возникающих в бетонной плите безбалластной конструкции пути, однако ее применение не позволяет учесть динамику совместных колебаний пути и подвижного состава, стохастический характер их взаимодействия.

1.4. Модель колебаний пути, как многослойной балки, лежащей на упругом основании Винклера, или основании, имеющем свойства основания Винклера

«Модель колебаний пути, как трехслойной балки, лежащей на модифицированном основании Винклера была предложена» [34, 36] А.Я. Коганом. Позднее, данная модель была использована А. В. Савиным для безбалластных конструкций пути [42,73].

«Основным фактором стабильности безбалластного пути является стабильность его основания в существенно большей степени, чем для

традиционного пути на балласте, так как устранение проблемы с подрельсовым основанием крайне трудоемко» [99]. «В связи с этим крайне необходимо иметь представление о параметрах не только верхнего, но и нижних слоев безбалластного пути. Исследования на Экспериментальном кольце, проведенные в 2010–2014 г. показали, что основной причиной, приводящей к неисправности БКП, является разрушение несущей бетонной плиты, возникающее из-за образования пустот на стыке второго и третьего слоев конструкции» [73, 99, 124]. «Это происходит по причине периодического образования зазора между несущей бетонной плитой и тощим бетоном, связанное с разницей в величинах прогибов слоев при проходе поезда, куда попадает вода в периоды дождей или таяния снега» [42]. «Испытания различных типов безбалластных конструкций, которые были проведены на Экспериментальном кольце в 2014–2016 гг., подтверждают, что основной причиной выхода из строя безбалластного пути является повреждаемость несущего бетонного слоя ввиду образования под ним пустот. Данный факт также нашел подтверждение в зарубежных исследованиях» [99, 100, 125, 126]. «В связи с этим, для оценки прогибов и напряжений в слоях безбалластных конструкций пути при различных условиях эксплуатации, авторами была использована модель колебаний пути как трехслойной балки, лежащей на модифицированном основании Винклера» [34, 36].

«Формально модель Винклера является недостаточно строгой» [127–130]. Проведенные экспериментальные исследования работы фундаментов и оснований, а также наблюдения за сооружениями демонстрируют зависимость осадок основания от нагрузки как в данной точке, так и в соседних; «осадка грунта происходит не только под фундаментом, но также и по соседству; значение коэффициента постели зависит от формы и величины загруженной площади, а не только от типа грунта» [73], а также тот факт, что грунт не работает на растяжение. Данные формальные недостатки привели к ряду предложений об использовании вместо нее модели упругого полупространства в практических расчетах, а также к возникновению новых, отличных от Винклеровской, моделей грунтового основания, устраняющих в большей или меньшей степени присущие

ей недостатки. Однако степень погрешности, возникающая при расчетах конструкций на грунтовом основании по причине использования гипотезы коэффициента постели, достаточно мала. Таким образом:

1) Испытания показали, что «грунты обладают довольно малой распределительной способностью, что связано с быстрым затуханием деформаций поверхности грунта за пределами загруженной части» [127]. Модель упругого полупространства существенно преувеличивает распределительную способность грунта, что не подтверждается проведенными экспериментами.

2) Проведенные сравнительные расчеты [127] демонстрируют практически полное совпадение результатов, полученных при расчете усилий и прогибов в плитах при помощи модели П. Л. Пастернака и модели Винклера, несмотря на то, что последняя полностью пренебрегает осадками вне грузовой площади. Таким образом, модель Винклера может быть использована при проведении практических расчетов для конструкций на грунтовом основании.

3) «Вывод о допустимости использования модели Винклера в практических расчетах также подтверждается исследованиями действительной работы балок, лежащих на разных грунтовых основаниях (уплотненный илистый грунт, насыпной песок)» [127]. Полученные на основе теоретических и опытных данных эпюры изгибающих моментов и осадок продемонстрировали, «что действительные условия работы системы «балка–основание» лучше всего отражает модель Винклера» [73].

4) «Результаты проведенных опытов свидетельствуют о зависимости значения коэффициента жесткости основания, как от вида грунта, так и от формы и размеров подошвы фундамента. Однако, этот факт не является поводом для критики данной модели в целом» [127], поскольку размеры и форма плиты могут быть учтены при определении коэффициента жесткости [127].

Помимо этого, следует отметить, что при проведении инженерно-геологических изысканий могут возникнуть неточности при нахождении характеристик основания, что, в свою очередь, не даёт возможности проведения

точных нелинейных расчетов [127]. В ходе строительства и последующей за ним эксплуатации здания могут изменяться свойства грунтов основания.

Э. Р. Терегулова [128] в своей работе указывает, что «экспериментальные исследования, посвященные определению осадок в окрестности грузового штампа и охватившие более двухсот испытаний грунтов в естественном залегании показали, что модель упругого полупространства значительно преувеличивает распределительную способность грунта по экспериментальным данным объем осадочной лунки вне грузового штампа составляет не менее 10% от того же объема теоретической осадочной лунки упругого полупространства, если даже пренебречь той частью теоретической осадочной лунки, где осадки составляют менее 5% от осадки под штампом» [128].

«Е. А. Палатников [131] непосредственным сравнением показал, что гипотеза Винклера, полностью пренебрегающая осадками вне грузовой площадки, приводит к совпадающим результатам по схеме упругого слоя в весьма широких пределах, то есть наличие достаточно быстро затухающих осадок вне грузовой площадки не вносит заметных возмущений в работу плиты, определенную без учета этих осадок» [131].

«Значения расчетных величин по гипотезе Винклера и для упругого слоя в ряде случаев совпадают с необходимой точностью для практических задач. Это, в свою очередь означает возможность проведения расчетов с применением гипотезы коэффициента постели даже в случае нахождения мощного слоя упругого тела, коим не является грунт, в основании плиты. Таким образом, модифицированное основание Винклера принимается в качестве расчетной модели; расчетная схема приведена на рисунке 1.3. Следует также отметить, что гипотеза Винклера в настоящее время включена в действующие нормативные документы» [119, 132].

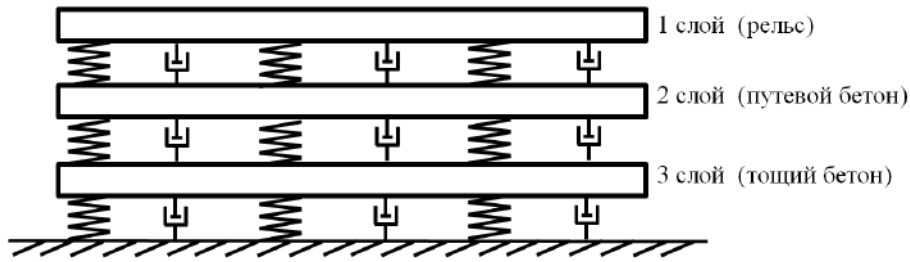


Рисунок 1.3 – Физическая модель

Система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая данную модель, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} E_1 I_1 \frac{\partial^4 z_1}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} + f_1 \left(\frac{\partial z_1}{\partial t} - \frac{\partial z_2}{\partial t} \right) + U_1 (z_1 - z_2) = 0; \\ E_2 I_2 \frac{\partial^4 z_2}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 z_2}{\partial t^2} + f_1 \left(\frac{\partial z_2}{\partial t} - \frac{\partial z_1}{\partial t} \right) + f_2 \left(\frac{\partial z_2}{\partial t} - \frac{\partial z_3}{\partial t} \right) + \\ + U_1 (z_2 - z_1) + U_2 (z_2 - z_3) = 0; \\ E_3 I_3 \frac{\partial^4 z_3}{\partial x^4} + m_3 \frac{\partial^2 z_3}{\partial t^2} + f_2 \left(\frac{\partial z_3}{\partial t} - \frac{\partial z_2}{\partial t} \right) + f_3 \frac{\partial z_3}{\partial t} + U_2 (z_3 - z_2) + U_3 z_3 = 0, \end{cases} \quad (1.69)$$

где z_i – вертикальный прогиб i -го слоя в подрельсовом сечении;

E_i – модуль упругости материала i -го слоя;

I_i – момент инерции i -го слоя при его изгибе относительно поперечной горизонтальной оси, отнесенный к одной рельсовой нити;

m_i – распределенная приведенная масса i -го слоя, отнесенная к одной рельсовой нити;

f_i – распределенное приведенное демпфирование i -го слоя, отнесенное к одной рельсовой нити;

U_i – приведенный модуль упругости основания i -го слоя при вертикальном изгибе, отнесенный к одной рельсовой нити;

x – абсцисса текущего сечения балки, отсчитываемая от некоторого неподвижного начала координат;

t – время;

$Q(t)$ – переменная нагрузка;

v – скорость движения переменной нагрузки.

Используя систему (1.69) и задавая граничные условия, могут быть найдены частотные характеристики прогибов, изгибающих моментов, углов поворотов сечений и поперечных сил для безбалластной конструкции. Зная данные частотные характеристики, а также «матрицу взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь S_Q , могут быть найдены средние значения и среднеквадратические отклонения динамических процессов прогибов и напряжений, возникающих в слоях БКП. Для нахождения точного значения S_Q необходимо проведение испытаний, использующих не менее 4 тензометрических колесных пар. При этом подобные испытания требуется проводить при различных скоростях движения вагона, что связано со значительными финансовыми и временными затратами. Альтернативным способом является нахождение матрицы S_Q при помощи программы «Взаимодействие экипажа и пути» (ВЭИП) [43], использованной автором для проведения расчетов [42, 73], однако заложенный в ней алгоритм реализован для модели однослойной балки, в связи с чем, полученные результаты не являются достаточно строгими» [133, 134].

Выводы к главе 1

1) Применение классического расчета пути на прочность не позволяет провести расчет статистических характеристик динамических процессов, возникающих в слоях безбалластной конструкции, что критически важно в случае исследования БКП.

2) Модель расчета на прочность безбалластного пути, предложенная проф. Айзенманом, проф. Лейкауфом не учитывает динамику совместных колебаний пути и подвижного состава, стохастический характер их взаимодействия.

3) Совокупность данных факторов делает целесообразным применение для безбалластных конструкций модели колебаний пути, как трехслойной балки,

лежащей на модифицированном основании Винклера, позволяющей исследовать динамические процессы, возникающие в каждом из слоев БКП. При этом не ставилась задача точного нахождения матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил S_Q , используемой для проведения расчетов, что делает полученные результаты недостаточно строгими.

Таким образом, целью настоящего исследования является строгое нахождение статистических характеристик динамических процессов, возникающих в слоях безбалластных конструкций пути.

Для достижения цели исследования необходимо решение следующих задач:

1) Разработка метода расчета матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил через неровности пути в профиле в модели трехслойной балки, лежащей на модифицированном основании Винклера.

2) Получение характеристик случайных процессов изменения прогибов и напряжений в слоях безбалластной конструкции от воздействия вертикальных динамических сил, вызванных неровностями пути.

3) Определение влияния случайных процессов изменения прогибов и напряжений в слоях безбалластной конструкции на срок ее службы.

4) Оценка возникающих расхождений между результатами расчетов срока службы безбалластного пути, полученных при помощи предлагаемого метода по сравнению с существующим.

2. НАХОЖДЕНИЕ МАТРИЦЫ ВЗАИМНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В БЕЗБАЛЛАСТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ

2.1. Алгоритм нахождения матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил в модели колебаний пути, как трехслойной балки

В настоящей главе приводится метод нахождения матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил S_Q для модели колебаний пути как трехслойной балки, лежащей на упругом основании Винклера. Структура алгоритма данного метода представлена на рисунке 2.1.

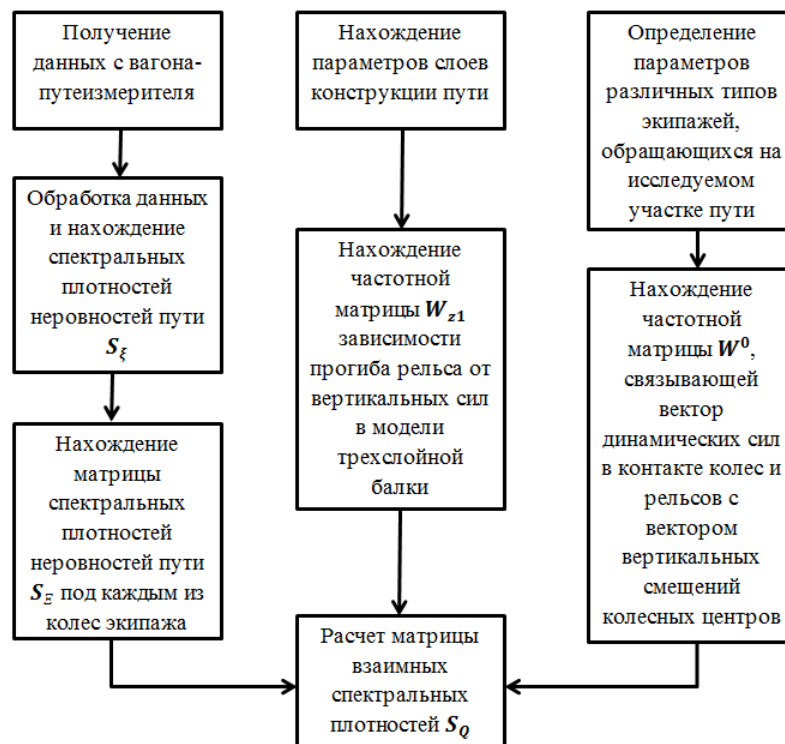


Рисунок 2.1 – Алгоритм нахождения матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь

На первом этапе находятся спектральные плотности неровностей пути. Они могут быть получены по результатам обработки данных, полученных вагоном-

путеизмерителем, аппроксимированы аналитической функцией в зависимости от класса пути [135], либо, в качестве приблизительной оценки могут быть использованы спектральные плотности типовых неровностей пути, характерных для сети российских железных дорог [43]. Используя эти данные, может быть найдена матрица спектральных плотностей неровностей пути S_E по формулам, приведенным в разделе 2.2.

Для нахождения частотной матрицы прогибов рельса W_{Z_1} используется модель колебаний пути, как трехслойной балки. Предварительно, для проведения расчетов, определяются параметры слоев конструкции пути, такие как модуль упругости материала, момент инерции, распределенная приведенная масса слоев, приведенный модуль упругости при изгибе относительно поперечной оси, распределенное приведенное демпфирование. Способ их нахождения представлен в разделе 2.4, а также описан в [100].

Частотная матрица W^0 зависимости перемещений масс от вертикальных динамических сил, действующих на путь, находится по формулам, приведенным в разделе 2.5. Для ее нахождения требуются данные об экипажах, обращающихся на исследуемом участке, а также скоростях движения. В работе рассматривается случай четырехосного грузового вагона.

На последнем этапе, для нахождения «матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь S_Q используется модель для нахождения частотной характеристики, определяющей динамическую систему с входом по неровности пути и выходом по динамической силе в контакте колеса и рельса» [34, 36], а также найденные матрицы S_E, W_{Z_1}, W^0 . Соответствующие формулы приводятся в разделе 2.6.

Предложенный метод позволяет провести расчет матрицы S_Q при движении различных типов экипажей по пути с неровностями, используя данные, полученные при помощи вагона-путеизмерителя, и не прибегая к проведению иных натурных испытаний.

При помощи матрицы S_Q с использованием модели колебаний пути, как трехслойной балки, могут быть рассчитаны средние значения и среднеквадратические отклонения случайных процессов изменения прогибов и изгибающих моментов в слоях конструкции пути. С их помощью могут быть рассчитаны вероятностные характеристики возникающих в конструкции напряжений, которые, в свою очередь, используются при оценке срока службы пути [42, 73].

2.2. Нахождение матрицы спектральных плотностей неровностей пути

«Матрица спектральных плотностей неровности пути $S_E(\omega)$ может быть приближенно найдена в следующем виде» [36]:

$$S_E(\omega) = S_\xi(\omega) \cdot R = \frac{1}{v} S_\xi(\Omega) \cdot R, \quad (2.1)$$

$$\Omega = \frac{\omega}{v}, \quad (2.2)$$

где $S_\xi(\Omega)$ – спектральная плотность неровности как функции протяженности пути.

Осцилляционная матрица R имеет вид:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & e^{i\Omega(a_2-a_1)} & e^{i\Omega(a_3-a_1)} & \dots & e^{i\Omega(a_n-a_1)} \\ e^{i\Omega(a_1-a_2)} & 1 & e^{i\Omega(a_3-a_2)} & \dots & e^{i\Omega(a_n-a_2)} \\ e^{i\Omega(a_1-a_3)} & e^{i\Omega(a_2-a_3)} & 1 & \dots & e^{i\Omega(a_n-a_3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{i\Omega(a_1-a_n)} & e^{i\Omega(a_2-a_n)} & e^{i\Omega(a_3-a_n)} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.3)$$

где a_i – расстояние между i -м колесом и началом подвижной системы координат, движущейся вместе с экипажем с постоянной скоростью v .

В частном случае, для четырехосного грузового вагона имеем:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & e^{-i\Omega d} & e^{-i\Omega l} & e^{-i\Omega(l+d)} \\ e^{i\Omega d} & 1 & e^{i\Omega(d-l)} & e^{-i\Omega l} \\ e^{i\Omega l} & e^{i\Omega(l-d)} & 1 & e^{-i\Omega d} \\ e^{i\Omega(l+d)} & e^{i\Omega l} & e^{i\Omega d} & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

где d – расстояние между колесными парами;

l – расстояние между центрами тележек.

Значения функции $S_{\xi}(\Omega)$ могут быть найдены в результате обработки данных, полученных при помощи вагона-путеизмерителя для конкретного участка. Альтернативным способом является аппроксимация спектральной плотности неровностей пути $S_{\xi}(\Omega)$ для типового пути по формуле [135]:

$$S_{\xi}(\Omega) = \frac{A\Omega_2^2(\Omega^2 + \Omega_1^2)}{\Omega^4(\Omega^2 + \Omega_2^2)}. \quad (2.5)$$

Значения параметров A, Ω_1, Ω_2 в зависимости от класса пути представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения параметров для типового пути

Параметр	Класс пути				
	5	4	3	2	1
$A \cdot 10^6$ мм ² /цикл/м	1,6	2,8	4,9	8,9	15,6
$\Omega_1 \cdot 10^4$ цикл/м	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
$\Omega_2 \cdot 10^3$ цикл/м	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

Так, строящуюся линию безбалластного пути можно принять за путь первого класса и провести расчеты, исходя из соответствующих этому типу значений констант.

2.3. Нахождение частотных матриц зависимости прогибов и изгибающих моментов слоев конструкции от вертикальных динамических сил, действующих на путь

«Для нахождения частотных матриц зависимости прогибов слоев конструкции от вертикальных динамических сил, действующих на путь $W_{z_1}^Q$ воспользуемся моделью колебаний пути, как трехслойной балки, лежащей на многослойном модифицированном» [73] (имеющем присоединенные к балке

массу и демпфирование) основании с входом по переменной динамической нагрузке $Q(t)$ и выходом по прогибам слоев конструкции z_i (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Модель колебаний пути, как трехслойной балки, лежащей на многослойном модифицированном основании с входом по переменной динамической нагрузке $Q(t)$ и выходом по прогибам слоев конструкции z_i

«Для данной модели справедлива следующая система дифференциальных уравнений в частных производных» [34]:

$$\begin{cases} E_1 I_1 \frac{\partial^4 z_1}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} + f_1 \left(\frac{\partial z_1}{\partial t} - \frac{\partial z_2}{\partial t} \right) + U_1 (z_1 - z_2) = 0; \\ E_2 I_2 \frac{\partial^4 z_2}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 z_2}{\partial t^2} + f_1 \left(\frac{\partial z_2}{\partial t} - \frac{\partial z_1}{\partial t} \right) + f_2 \left(\frac{\partial z_2}{\partial t} - \frac{\partial z_3}{\partial t} \right) + \\ + U_1 (z_2 - z_1) + U_2 (z_2 - z_3) = 0; \\ E_3 I_3 \frac{\partial^4 z_3}{\partial x^4} + m_3 \frac{\partial^2 z_3}{\partial t^2} + f_2 \left(\frac{\partial z_3}{\partial t} - \frac{\partial z_2}{\partial t} \right) + f_3 \frac{\partial z_3}{\partial t} + U_2 (z_3 - z_2) + U_3 z_3 = 0, \end{cases} \quad (2.6)$$

где z_i – вертикальный прогиб i -го слоя в подрельсовом сечении;

E_i – модуль упругости материала i -го слоя;

I_i – момент инерции i -го слоя при его изгибе относительно поперечной горизонтальной оси, отнесенный к одной рельсовой нити;

m_i – распределенная приведенная масса i -го слоя, отнесенная к одной рельсовой нити;

f_i – распределенное приведенное демпфирование i -го слоя, отнесенное к одной рельсовой нити;

U_i – приведенный модуль упругости основания i -го слоя при вертикальном изгибе, отнесенный к одной рельсовой нити;

x – абсцисса текущего сечения балки, отсчитываемая от некоторого неподвижного начала координат;

t – время;

$Q(t)$ – переменная нагрузка;

v – скорость движения переменной нагрузки.

Переходя к подвижной системе координат, делаем замену $u = x - vt$, где u – расстояние от силы до рассматриваемого сечения пути.

Считая функции $z_i(u, t)$ реакциями динамической системы, на вход которой подается периодическое воздействие $Q(t)$ вида $Q(t) = e^{i\omega t}$, ввиду линейности оператора, функции $z_i(u, t)$ будем искать в виде:

$$z_i(u, t) = e^{i\omega t} \cdot W_{z_i}^Q(u, t), \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial^4 z_j}{\partial x^4} = W_{z_j}^{IV} e^{i\omega t}, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial^2 z_j}{\partial t^2} = W_{z_j}^{II} \cdot (-v)^2 e^{i\omega t} - 2i\omega v W_{z_j}^I e^{i\omega t} - \omega^2 e^{i\omega t} W_{z_j}, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial z_j}{\partial t} = -v W_{z_j}^I \cdot e^{i\omega t} + i\omega W_{z_j} \cdot e^{i\omega t}. \quad (2.10)$$

Подставляя (2.7), (2.8), (2.9), (2.10) в уравнения системы (2.6) имеем:

$$E_1 I_1 W_{z_1}^{IV} e^{i\omega t} + m_1 e^{i\omega t} (v^2 W_{z_1}^{II} - 2i\omega v W_{z_1}^I - \omega^2 W_{z_1}) + f_1 e^{i\omega t} (-v W_{z_1}^I + i\omega W_{z_1}) - \\ - f_1 e^{i\omega t} (-v W_{z_2}^I + i\omega W_{z_2}) + U_1 e^{i\omega t} (W_{z_1} - W_{z_2}) = 0,$$

$$E_2 I_2 W_{z_2}^{IV} e^{i\omega t} + m_2 e^{i\omega t} (v^2 W_{z_2}^{II} - 2i\omega v W_{z_2}^I - \omega^2 W_{z_2}) - f_1 e^{i\omega t} (-v W_{z_1}^I + i\omega W_{z_1}) + \\ + f_1 e^{i\omega t} (-v W_{z_2}^I + i\omega W_{z_2}) + f_2 e^{i\omega t} (-v W_{z_2}^I + i\omega W_{z_2}) - f_2 e^{i\omega t} (-v W_{z_3}^I + i\omega W_{z_3}) + \\ + U_1 e^{i\omega t} (W_{z_2} - W_{z_1}) + U_2 e^{i\omega t} (W_{z_2} - W_{z_3}) = 0,$$

$$E_3 I_3 W_{z_3}^{IV} e^{i\omega t} + m_3 e^{i\omega t} (v^2 W_{z_3}^{II} - 2i\omega v W_{z_3}^I - \omega^2 W_{z_3}) + f_2 e^{i\omega t} (-v W_{z_2}^I + i\omega W_{z_2}) - \\ - f_2 e^{i\omega t} (-v W_{z_3}^I + i\omega W_{z_3}) + f_3 e^{i\omega t} (-v W_{z_3}^I + i\omega W_{z_3}) + U_2 e^{i\omega t} (W_{z_3} - W_{z_2}) + \\ + U_3 e^{i\omega t} W_{z_3} = 0.$$

С учетом этого, можно записать:

$$E_1 I_1 W_{z_1}^{IV} + m_1 v^2 W_{z_1}^{II} + W_{z_1}^I (-2i\omega v m_1 - f_1) + f_1 v W_{z_2}^I + W_{z_1} (U_1 - m_1 \omega^2 + \\ + f_1 \omega i) + W_{z_2} (-U_1 - f_1 \omega i) = 0,$$

$$E_2 I_2 W_{z_2}^{IV} + m_1 v^2 W_{z_2}^{II} + W_{z_2}^I (-2i\omega v m_1 - v f_1 - v f_2) + f_1 v W_{z_1}^I + f_2 v W_{z_3}^I + \\ + W_{z_2} (U_1 + U_2 - m_2 \omega^2 + i\omega f_1 + i\omega f_2) + W_{z_1} (-U_1 - i\omega f_1) + W_{z_3} (-U_2 - \\ - i\omega f_2) = 0,$$

$$E_3 I_3 W_{z_3}^{IV} + m_3 v^2 W_{z_3}^{II} + W_{z_3}^I (-2i\omega v m_1 - v f_1 - v f_2) + f_2 v W_{z_2}^I + W_{z_3} (U_2 + U_3 - \\ - m_3 \omega^2 + i\omega f_2 + i\omega f_3) + W_{z_2} (-U_2 - i\omega f_2) = 0.$$

Таким образом, начальная система преобразуется к виду:

$$\begin{cases} W_{z_1}^{IV} + a_1 W_{z_1}^{II} + a_2 W_{z_1}^I + a_3 W_{z_1} + b_1 W_{z_2}^I + b_2 W_{z_2} = 0, \\ W_{z_2}^{IV} + b_3 W_{z_2}^{II} + b_4 W_{z_2}^I + b_5 W_{z_2} + a_4 W_{z_1}^I + a_5 W_{z_1} + c_1 W_{z_3}^I + c_2 W_{z_3} = 0, \\ W_{z_3}^{IV} + c_3 W_{z_3}^{II} + c_4 W_{z_3}^I + c_5 W_{z_3} + b_6 W_{z_2}^I + b_7 W_{z_2} = 0. \end{cases} \quad (2.11)$$

$$a_1 = \frac{m_1 v^2}{E_1 I_1}; \quad a_2 = -\frac{v(f_1 + 2m_1 \omega i)}{E_1 I_1}; \quad a_3 = \frac{U_1 - m_1 \omega^2 + f_1 \omega i}{E_1 I_1};$$

$$a_4 = \frac{f_1 v}{E_2 I_2}; \quad a_5 = -\frac{U_1 + f_1 \omega i}{E_2 I_2}; \quad b_1 = \frac{f_1 v}{E_1 I_1}; \quad b_2 = -\frac{U_1 + f_1 \omega i}{E_1 I_1}; \quad b_3 = \frac{m_1 v^2}{E_2 I_2};$$

$$b_4 = -\frac{v(f_1 + f_2 + 2m_2 \omega i)}{E_2 I_2}; \quad b_5 = \frac{U_1 + U_2 - m_2 \omega^2 + \omega(f_1 + f_2)i}{E_2 I_2}; \quad b_6 = \frac{f_2 v}{E_3 I_3};$$

$$b_7 = -\frac{U_2 + f_2 \omega i}{E_3 I_3}; \quad c_1 = \frac{f_2 v}{E_2 I_2}; \quad c_2 = -\frac{U_2 + f_2 \omega i}{E_2 I_2}; \quad c_3 = \frac{m_3 v^2}{E_3 I_3};$$

$$c_4 = -\frac{v(f_2 + f_3 + 2m_3 \omega i)}{E_3 I_3}; \quad c_5 = \frac{U_2 + U_3 - m_3 \omega^2 + \omega(f_2 + f_3)i}{E_3 I_3}.$$

Для построения частотных характеристик с входом по силе в контакте колеса и рельса и выходами по прогибам слоев и напряжениями в них принимаются нулевые начальные условия ($t=0$).

Колебания пути рассматриваются в подвижной системе координат, движущейся вместе с силой $z_i = z_i(u, t)$, где u – расстояние от силы до рассматриваемого сечения пути; t – время. При $u \rightarrow \pm\infty$ z_i принимается равными нулю: $z_i(-\infty, t) = z_i(\infty, t) = 0$.

Решение системы представляется в виде:

$$\begin{cases} W_{z1}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^{12} D_i e^{\lambda_i u}, \\ W_{z2}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^{12} E_i e^{\lambda_i u}, \\ W_{z3}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^{12} F_i e^{\lambda_i u}, \end{cases} \quad (2.12)$$

здесь величины λ_i – корни характеристического уравнения системы (2.11) – определяются из уравнения $\Delta = 0$, где:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \lambda^4 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 & b_1 \lambda + b_2 & 0 \\ a_4 \lambda + a_5 & \lambda^4 + b_3 \lambda^2 + b_4 \lambda + b_5 & c_1 \lambda + c_2 \\ 0 & b_6 \lambda + b_7 & \lambda^4 + c_3 \lambda^2 + c_4 \lambda + c_5 \end{vmatrix} \quad (2.13)$$

Пользуясь группой граничных условий на бесконечности и представив функцию $W_{zi}^Q(u, i\omega)$ в виде:

$$W_{zi}^Q(u, i\omega) = \begin{cases} W_{zi+}^Q(u, i\omega) & \text{при } u \geq 0; \\ W_{zi-}^Q(u, i\omega) & \text{при } u \leq 0. \end{cases} \quad (2.14)$$

Получаем:

$$\begin{cases} W_{z1+}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 A_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} & \text{при } u \geq 0; \\ W_{z1-}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 A_{2i} e^{\lambda_{2i} u} & \text{при } u \leq 0; \\ W_{z2+}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 B_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} & \text{при } u \geq 0; \\ W_{z2-}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 B_{2i} e^{\lambda_{2i} u} & \text{при } u \leq 0; \\ W_{z3+}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 C_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} & \text{при } u \geq 0; \\ W_{z3-}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 C_{2i} e^{\lambda_{2i} u} & \text{при } u \leq 0, \end{cases} \quad (2.15)$$

причем λ_i «рассортированы таким образом, что $Re\lambda_{(2i-1)} \geq 0, Re\lambda_{2i} \leq 0$.

Четные индексы при $u \geq 0$ и нечетные при $u \leq 0$ «выброшены», поскольку в противном случае краевые условия на бесконечности не были бы выполнены.

Таким образом, система трех дифференциальных уравнений 4-го порядка сводится к трем независимым уравнениям 12-го порядка с взаимосвязанными граничными условиями. Для каждого из данных уравнений необходимо 12 граничных условий.

1) Граничные условия для функции и ее производных до 3-го порядка в точке приложения силы получаем из условий равенства прогибов, углов поворота сечения и изгибающих моментов в слоях конструкции, а также поперечных сил во втором и третьем слоях справа и слева от точки приложения силы. Поперечная сила в рельсе имеет разрыв в точке приложения силы, равный $\frac{1}{E_1 I_1}$.

$$W_{z1+}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} - W_{z1-}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} = \alpha_j, \quad (2.16)$$

$$W_{z2+}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} - W_{z2-}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} = \beta_j, \quad (2.17)$$

$$W_{z3+}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} - W_{z3-}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} = \gamma_j, \quad (2.18)$$

где $j = \overline{0,3}$ обозначает j -ю производную.

Таким образом,

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0,$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{E_1 I_1},$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0,$$

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0.$$

2) Оставшиеся 24 граничных условия для производных с 4-й по 11-ю получаются из системы (2.11) путем дифференцирования ее уравнений и подстановки граничных условий группы 1).

Имеем:

$$W_{z1+}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} - W_{z1-}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} = \alpha_j, j = \overline{4,11}, \quad (2.19)$$

$$W_{z2+}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} - W_{z2-}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} = \beta_j, j = \overline{4,11}, \quad (2.20)$$

$$W_{z3+}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} - W_{z3-}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} = \gamma_j, j = \overline{4,11}. \quad (2.21)$$

Найдем значения $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$:

$$\begin{aligned}
W_{z_{1+}}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} - W_{z_{1-}}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} &= a_1 W_{z_{1-}}^{Q(j-2)}|_{u=0} + a_2 W_{z_{1-}}^{Q(j-3)}|_{u=0} + \\
&+ a_3 W_{z_{1-}}^{Q(j-4)}|_{u=0} + b_1 W_{z_{2-}}^{Q(j-3)}|_{u=0} + b_2 W_{z_{2-}}^{Q(j-4)}|_{u=0} - \left(a_1 W_{z_{1+}}^{Q(j-2)}|_{u=0} + \right. \\
&+ a_2 W_{z_{1+}}^{Q(j-3)}|_{u=0} + a_3 W_{z_{1+}}^{Q(j-4)}|_{u=0} + b_1 W_{z_{2+}}^{Q(j-3)}|_{u=0} + b_2 W_{z_{2+}}^{Q(j-4)}|_{u=0} \Big), \\
W_{z_{1+}}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} - W_{z_{1-}}^{Q(j)}(u, i\omega)|_{u=0} &= -a_1 \left(W_{z_{1+}}^{Q(j-2)}|_{u=0} - \right. \\
W_{z_{1-}}^{Q(j-2)}|_{u=0} \Big) - a_2 \left(W_{z_{1+}}^{Q(j-3)}|_{u=0} - W_{z_{1-}}^{Q(j-3)}|_{u=0} \right) - a_3 \left(W_{z_{1+}}^{Q(j-4)}|_{u=0} - \right. \\
W_{z_{1-}}^{Q(j-4)}|_{u=0} \Big) - b_1 \left(W_{z_{2+}}^{Q(j-3)}|_{u=0} - W_{z_{2-}}^{Q(j-3)}|_{u=0} \right) - b_1 \left(W_{z_{2+}}^{Q(j-4)}|_{u=0} - \right. \\
W_{z_{2-}}^{Q(j-4)}|_{u=0} \Big).
\end{aligned}$$

Отсюда $\alpha_0 = 0, \beta_0 = 0, \gamma_0 = 0$,

$$\alpha_j = -(a_1 \alpha_{j-2} + a_2 \alpha_{j-3} + a_3 \alpha_{j-4} + b_1 \beta_{j-3} + b_2 \beta_{j-4}). \quad (2.22)$$

Аналогично получим:

$$\beta_j = -(b_3 \beta_{j-2} + b_4 \beta_{j-3} + b_5 \beta_{j-4} + a_4 \alpha_{j-3} + a_5 \alpha_{j-4} + c_1 \gamma_{j-3} + c_2 \gamma_{j-4}), \quad (2.23)$$

$$\gamma_j = -(c_3 \gamma_{j-2} + c_4 \gamma_{j-3} + c_5 \gamma_{j-4} + b_6 \beta_{j-3} + b_7 \beta_{j-4}). \quad (2.24)$$

Таким образом, воспользовавшись формулами (2.22), (2.23), (2.24), получаем:

$$\alpha_4 = 0; \beta_4 = 0; \gamma_4 = 0; \alpha_5 = -a_1 \alpha_3 = -\frac{a_1}{E_1 I_1}; \beta_5 = 0; \gamma_5 = 0;$$

$$\alpha_6 = -a_2 \alpha_3 = -\frac{a_2}{E_1 I_1}; \beta_6 = -a_4 \alpha_3 = -\frac{a_4}{E_1 I_1}; \gamma_6 = 0;$$

$$\alpha_7 = -a_1 \alpha_5 - a_3 \alpha_3 = \frac{a_1^2 - a_3}{E_1 I_1}; \beta_7 = -a_5 \alpha_3 = -\frac{a_5}{E_1 I_1}; \gamma_7 = 0;$$

$$\alpha_8 = -a_1 \alpha_6 - a_2 \alpha_5 = \frac{2a_1 a_2}{E_1 I_1};$$

$$\beta_8 = -b_3 \beta_6 - a_4 \alpha_5 = \frac{a_4 b_3 + a_1 a_4}{E_1 I_1} = \frac{a_4 (b_3 + a_1)}{E_1 I_1}; \gamma_8 = 0;$$

$$\alpha_9 = -a_1 \alpha_7 - a_2 \alpha_6 - a_3 \alpha_5 - b_1 \beta_6 = \frac{a_3 - a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_3 + a_4 b_1}{E_1 I_1};$$

$$\beta_9 = -b_3 \beta_7 - b_4 \beta_6 - a_4 \alpha_6 - a_5 \alpha_5 = \frac{a_5 b_3 + a_4 b_4 + a_2 a_4 + a_1 a_5}{E_1 I_1};$$

$$\gamma_9 = -b_6 \beta_6 = \frac{a_4 b_6}{E_1 I_1};$$

$$\alpha_{10} = -a_1\alpha_8 - a_2\alpha_7 - a_3\alpha_6 - b_1\beta_7 - b_2\beta_6 = \frac{2a_2a_3 - 2a_1a_2 - a_2a_1^2 + a_5b_1 + a_4b_2}{E_1I_1},$$

$$\begin{aligned}\beta_{10} &= -b_3\beta_8 - b_4\beta_7 - b_5\beta_6 - a_4\alpha_7 - a_5\alpha_6 = \\ &= \frac{-b_3a_4(b_3+a_1) + a_5b_4 + a_4b_5 + a_3a_4 - a_4a_1^2 + a_2a_5}{E_1I_1},\end{aligned}$$

$$\gamma_{10} = -b_6\beta_7 - b_7\beta_6 = \frac{a_5b_6 + a_4b_7}{E_1I_1},$$

$$\begin{aligned}\alpha_{11} &= -a_1\alpha_9 - a_2\alpha_8 - a_3\alpha_7 - b_1\beta_8 - b_2\beta_7 = \\ &= \frac{a_1(-a_3 + a_1^2 - a_2^2 - a_1a_3 - a_4b_1) - 2a_1a_2^2 - a_3a_1^2 + a_3^2 - b_1a_4(b_3+a_1) + a_5b_2}{E_1I_1},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\beta_{11} &= -b_3\beta_9 - b_4\beta_8 - b_5\beta_7 - a_4\alpha_8 - a_5\alpha_7 = \\ &= \frac{a_5(a_3 - a_1^2) - b_3(a_5b_3 + a_4b_4 + a_2a_4 + a_1a_5) - a_4b_4(b_3+a_1) + a_5b_5 - 2a_1a_2a_4}{E_1I_1},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\gamma_{11} &= -c_3\gamma_9 - b_6\beta_8 - b_7\beta_7 = \frac{-a_4b_6c_3 - b_6(a_4b_3 + a_1a_4) + a_5b_7}{E_1I_1} = \\ &= \frac{a_5b_7 - a_4b_6(a_1 + b_3 + c_3)}{E_1I_1}.\end{aligned}$$

Подставив в граничные условия члены $W_{zi}^{Q(j)}(u, i\omega)$ получаем систему из 36 линейных относительно коэффициентов A_i, B_i, C_i уравнений, в матричной форме имеющей вид:

$$\lambda\Gamma = \Phi,$$

где λ – матрица 12×12 , составленная из корней характеристического уравнения системы (2.11),

$$\lambda_{i+1, j+1} = (-1)^j \lambda_{j+1}^i, i = \overline{0, 11}, j = \overline{0, 11}, \quad (2.25)$$

$$\Gamma = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{12} & B_{12} & C_{12} \end{pmatrix},$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \beta_0 & \gamma_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{11} & \beta_{11} & \gamma_{11} \end{pmatrix}.$$

Пользуясь формулами, представленными в [34], находим значения C_i :

$$C_i = (-1)^{i+1} \prod_{1 \leq l \leq 12} (\lambda_i - \lambda_l)^{-1} \times$$

$$\times \left\{ \gamma_{11} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{12} \lambda_j^{11} \prod_{\substack{1 \leq l \leq 12 \\ l \neq i, j}} (\lambda_j - \lambda_l)^{-1} \left[\gamma_{10} - \gamma_9 \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i, j}}^{12} \lambda_n^{10} \prod_{\substack{1 \leq l \leq 12 \\ l \neq i, j, n}} (\lambda_n - \lambda_l)^{-1} \right] \right\},$$

$$A_i = C_i \frac{(\lambda_i^4 + c_3 \lambda_i^2 + c_4 \lambda_i + c_5)(\lambda_i^4 + b_3 \lambda_i^2 + b_4 \lambda_i + c_5) - (b_6 \lambda_i + b_7)(c_1 \lambda_i + c_2)}{(b_6 \lambda_i + b_7)(a_4 \lambda_i + a_5)},$$

$$B_i = -C_i \frac{\lambda_i^4 + c_3 \lambda_i^2 + c_4 \lambda_i + c_5}{b_6 \lambda_i + b_7}.$$

Компоненты частотной матрицы $W_{z_i}^Q$ определяются равенствами [34]:

$$W_{z_{ijs}}^Q = \begin{cases} W_{z_{i+}}^Q(a_j - a_s, i\omega), & a_j \geq a_s \\ W_{z_{i-}}^Q(a_j - a_s, i\omega), & a_j \leq a_s \end{cases}. \quad (2.26)$$

Для вагона имеем $n = 4$ и [42,100]:

$$W_{z_i}^Q = \begin{pmatrix} W_{z_i}^Q(0, i\omega) & W_{z_{i-}}^Q(-d, i\omega) & W_{z_{i-}}^Q(-l, i\omega) & W_{z_{i-}}^Q(-l-d, i\omega) \\ W_{z_{i+}}^Q(d, i\omega) & W_{z_{i+}}^Q(0, i\omega) & W_{z_{i-}}^Q(d-l, i\omega) & W_{z_{i-}}^Q(-l, i\omega) \\ W_{z_{i+}}^Q(l, i\omega) & W_{z_{i+}}^Q(l-d, i\omega) & W_{z_{i+}}^Q(0, i\omega) & W_{z_{i-}}^Q(-d, i\omega) \\ W_{z_{i+}}^Q(l+d, i\omega) & W_{z_{i+}}^Q(l, i\omega) & W_{z_{i+}}^Q(d, i\omega) & W_{z_{i+}}^Q(0, i\omega) \end{pmatrix}, \quad (2.27)$$

где $W_{z_i}^Q$ – матрица частотных характеристик, определяющих прогибы i -го слоя балки под воздействием вектора вертикальных сил;

a_i – расстояние между i -м колесом и началом подвижной системы координат, движущейся вместе с экипажем с постоянной скоростью v ;

d – расстояние между колесными парами;

l – расстояние между центрами тележек.

Для нахождения частотных матриц изгибающих моментов в слоях конструкции пути также применяется модель колебаний пути, как трехслойной балки, лежащей на многослойном модифицированном основании (рисунок 2.3).

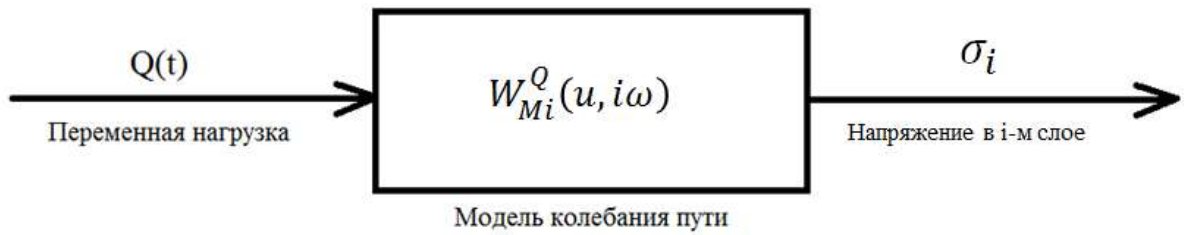


Рисунок 2.3 – Модель колебаний пути, как трехслойной балки, лежащей на многослойном модифицированном основании с входом по переменной динамической нагрузке $Q(t)$ и выходом по изгибающим моментам слоев конструкции M_i

При этом для частотных характеристик изгибающих моментов W_{Mi}^Q справедливо равенство [34]:

$$W_{Mi}^Q(u, i\omega) = -E_i I_i \frac{\partial^2 W_{zi}^Q(u, i\omega)}{\partial u^2}. \quad (2.28)$$

Таким образом, с учетом граничных условий на бесконечности, частотные характеристики W_{Mi}^Q находятся по формулам:

$$W_{Mi}^Q(u, i\omega) = \begin{cases} W_{Mi+}^Q(u, i\omega) & \text{при } u \geq 0; \\ W_{Mi-}^Q(u, i\omega) & \text{при } u \leq 0, \end{cases} \quad (2.29)$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{M1+}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{(2i-1)}^2 A_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при } u \geq 0; \\ W_{M1-}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{2i}^2 A_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \quad \text{при } u \leq 0; \\ W_{M2+}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{(2i-1)}^2 B_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при } u \geq 0; \\ W_{M2-}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{2i}^2 B_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \quad \text{при } u \leq 0; \\ W_{M3+}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{(2i-1)}^2 C_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при } u \geq 0; \\ W_{M3-}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{2i}^2 C_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \quad \text{при } u \leq 0. \end{array} \right. \quad (2.30)$$

Компоненты частотной матрицы $W_{M_i}^Q$ определяются равенствами [34]:

$$W_{M_{ijs}}^Q = \begin{cases} W_{M_{i+}}^Q(a_j - a_s, i\omega), & a_j \geq a_s \\ W_{M_{i-}}^Q(a_j - a_s, i\omega), & a_j \leq a_s \end{cases}, \quad (2.31)$$

$$W_{M_i}^Q = \begin{pmatrix} W_{M_i}^Q(0, i\omega) & W_{M_i-}^Q(-d, i\omega) & W_{M_i-}^Q(-l, i\omega) & W_{M_i-}^Q(-l-d, i\omega) \\ W_{M_{i+}}^Q(d, i\omega) & W_{M_{i+}}^Q(0, i\omega) & W_{M_{i-}}^Q(d-l, i\omega) & W_{M_{i-}}^Q(-l, i\omega) \\ W_{M_{i+}}^Q(l, i\omega) & W_{M_{i+}}^Q(l-d, i\omega) & W_{M_{i+}}^Q(0, i\omega) & W_{M_{i-}}^Q(-d, i\omega) \\ W_{M_{i+}}^Q(l+d, i\omega) & W_{M_{i+}}^Q(l, i\omega) & W_{M_{i+}}^Q(d, i\omega) & W_{M_{i+}}^Q(0, i\omega) \end{pmatrix}, \quad (2.32)$$

где $W_{M_i}^Q$ – матрица частотных характеристик, определяющих изгибающие моменты i -го слоя балки под воздействием вектора вертикальных сил;

a_i – расстояние между i -м колесом и началом подвижной системы координат, движущейся вместе с экипажем с постоянной скоростью v ;

d – расстояние между колесными парами;

l – расстояние между центрами тележек.

Аналогично, можно определить частотные матрицы для углов поворотов сечений и поперечных сил, исходя из соотношений:

$$W_{\chi_i}^Q(u, i\omega) = \frac{\partial W_{zi}^Q(u, i\omega)}{\partial u}, \quad (2.33)$$

$$W_{Pi}^Q(u, i\omega) = -E_i I_i \frac{\partial^3 W_{zi}^Q(u, i\omega)}{\partial u^3}. \quad (2.34)$$

2.4. Нахождение параметров слоев конструкции пути

Для нахождения матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь S_Q необходимы значения констант m_i, E_i, I_i, U_i, f_i , входящих в систему уравнений (2.6).

Распределенная приведенная масса m_i , модуль упругости материала E_i и «моменты инерции I_i определяются из размеров слоев и свойств материалов.

Распределенное приведенное демпфирование слоев f_i принимается таким, чтобы коэффициент динамичности, равный отношению амплитуды прогиба слоя под нагрузкой от колеса в динамике к амплитуде прогиба под нагрузкой от колеса в статике не превышал величины 1,2» [100].

«Значения приведенного модуля упругости основания U_2, U_3 для БКП определяются как модуль балластной постели основания, умноженный на площадь и распределенный на метр длины» [100, 118]. «Таким образом, U_2, U_3 находим из следующих соотношений» [100]:

$$U_2 = b_2 \cdot h_2, \quad (2.35)$$

$$U_3 = b_3 \cdot h_3, \quad (2.36)$$

где h_2, h_3 – ширина 2-го и 3-го слоев соответственно, м;

b_2, b_3 – модуль балластной постели основания, Н/м³.

«Значение U_1 нельзя определить подобным методом, поскольку между рельсом и вторым слоем конструкции находятся прокладка, резиновая подкладка. Для нахождения U_1 можно воспользоваться измеренным в статике прогибом верхнего слоя БКП на опытном полигоне y_1 и следующим соотношением» [100]:

$$y_1 = \sum_{i=1}^n W_{z_{1i}}(0,0) \cdot Q_i, \quad (2.37)$$

где n – номер колесной пары.

Так как прогиб y_1 и сила, действующая на рельс Q известны, то необходимо взять такое U_1 , чтобы данное соотношение выполнялось.

2.5. Нахождение частотной матрицы зависимости перемещений масс от вертикальных динамических сил, действующих на путь

2.5.1. Случай произвольного типа экипажа

Для произвольного экипажа решение может быть найдено при помощи математической модели колебаний экипажа под действием вертикальных сил [36]. «Данная модель определяется следующим:

- экипаж представляет собой плоскую колебательную систему с многими степенями свободы;
- в зависимости от типа экипажа число уровней подвешивания изменяется от 1 до m ;
- различные тележки экипажа могут иметь разное число уровней подвешивания;
- число колес экипажа изменяется от 1 до n ;
- число колес в различных тележках одного экипажа может быть различным» [34];
- элементы подвешивания характеризуются независимыми параметрами – массой, моментом инерции относительно горизонтальной поперечной оси, проходящей через центр масс элемента, жесткостью, параметром демпфирования, числом элементов низшего уровня подвешивания, координатой центра масс элемента, координатой точки подвешивания сверху;
- однотипные элементы могут иметь различные значения параметров;

- модель допускает возможность предельных переходов для случаев шарнирного соединения элементов подвешивания различных ступеней;
- модель требует отсутствия непосредственной связи между элементами одного уровня подвешивания. В случае наличия подобной связи, модель такого экипажа должна быть приведена к эквивалентной схеме без связей.

Для рассматриваемой математической модели на рисунке 2.4 представлена расчетная схема для составления уравнений колебаний экипажа под действием вертикальных сил:

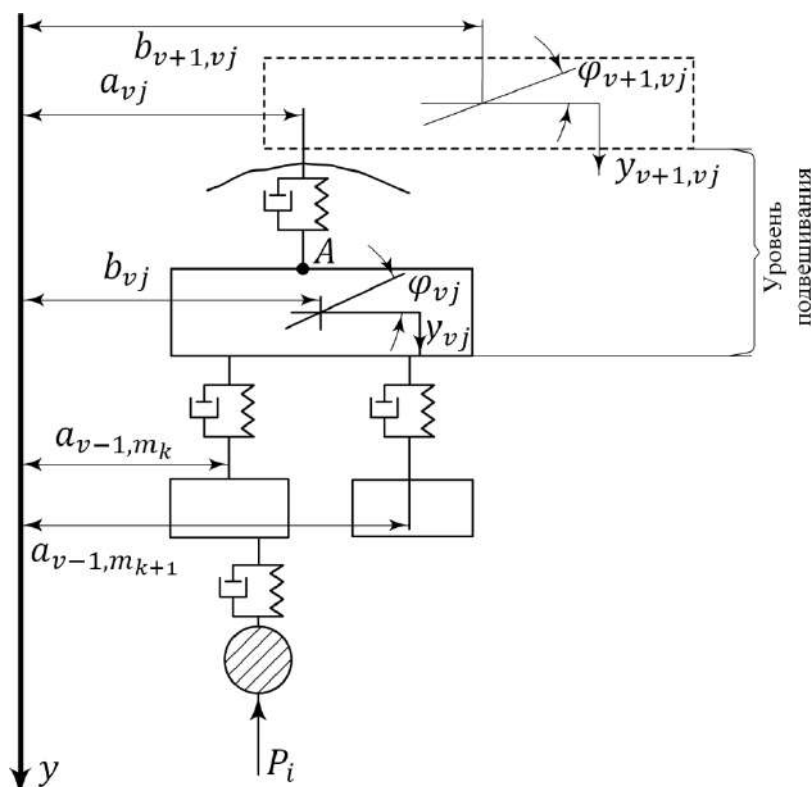


Рисунок 2.4 – Расчетная схема для составления уравнений колебаний экипажа под действием вертикальных сил

Запишем условия равенства вертикальных сил, действующих на элемент j уровня подвешивания v и равновесия моментов системы относительно точки подвешивания A [36]:

$$\begin{aligned}
 & [z_{v+1,vj} + (a_{v+1,vj} - a_{zvj})\chi_{v+1,vj} - z_{vj} - (a_{vj} - a_{zvj})\chi_{vj}]c_{vj} + \\
 & + [\dot{z}_{v+1,vj} + (a_{v+1,vj} - a_{zvj})\dot{\chi}_{v+1,vj} - \dot{z}_{vj} - (a_{vj} - a_{zvj})\dot{\chi}_{vj}]k_{vj} - \\
 & - M_{vj}\ddot{z}_{vj} - \sum_{r=1}^{v-1} \sum_{n=m_{rvj}}^{l_{rvj}} M_{rn}\ddot{z}_{rn} - \sum_{n=m_{1vj}}^{l_{1vj}} Q_{dn} = 0, \quad (2.38)
 \end{aligned}$$

$$-I_{vj}\ddot{\chi}_{vj} - (a_{zvj} - a_{vj})M_{vj}\ddot{z}_{vj} - \sum_{n=m_{v-1,vj}}^{l_{v-1,vj}} \sum_{r=1}^{v-1} (a_{zvj} - a_{zv-1,n}) \cdot \quad (2.39)$$

$$\cdot \left[M_{v-1,n}\ddot{z}_{v-1,n} + \sum_{R=m_{r,v-1,n}}^{l_{r,v-1,n}} M_{rR}\ddot{z}_{rR} \right] - \sum_{n=m_{v-1,vj}}^{l_{v-1,vj}} (a_{zvj} - a_{zv-1,n}) \cdot \sum_{R=m_{1,v-1,n}}^{l_{1,v-1,n}} Q_{dR} = 0,$$

где z_{vj} – вертикальное перемещение элемента j уровня подвешивания v ;

χ_{vj} – угловое перемещение элемента j уровня подвешивания v ;

a_{zvj} – абсцисса точки подвешивания элемента j уровня подвешивания v ;

I_{vj} – момент инерции элемента j уровня подвешивания v относительно

горизонтальной поперечной оси, проходящей через центр масс элемента;

a_{vj} – абсцисса центра масс элемента j уровня подвешивания v ;

M_{vj} – масса элемента j уровня подвешивания v ;

Q_{dj} – сила в контакте колеса и элемента j первого уровня подвешивания;

c_{vj} – жесткость подвешивания элемента j уровня подвешивания v ;

k_{vj} – демпфирование подвешивания элемента j уровня подвешивания v ;

m_{rvj} и l_{rvj} – первый и последний элементы уровня подвешивания r , передающие вертикальные динамические нагрузки на элемент j уровня подвешивания v снизу;

$z_{v+1,vj}$ – перемещение элемента уровня $v + 1$, связанного упругодиссипативной связью с элементом j уровня подвешивания v

$\chi_{v+1,vj}$ – угловое перемещение элемента уровня $v + 1$, связанного упругодиссипативной связью с элементом j уровня подвешивания v

$a_{v+1,vj}$ – абсцисса центра масс элемента уровня $v + 1$, связанного упругодиссипативной связью с элементом j уровня подвешивания v .

В приведенных формулах все абсциссы отсчитывают от некоторого начала подвижной системы координат, движущейся со скоростью v вместе с экипажем.

Применив преобразование Фурье получаем:

$$a_{avj} \left(F(z_{v+1,vj}) - F(z_{vj}) + (a_{v+1,vj} - a_{zvj})F(\chi_{v+1,vj}) + (a_{vj} - a_{zvj})F(\chi_{vj}) \right) +$$

$$+M_{vj}b_{\alpha vj}F(z_{vj}) + b_{\alpha vj} \sum_{r=1}^{v-1} \sum_{n=m_{rvj}}^{l_{rvj}} M_{rn}F(z_{rn}) = b_{\alpha vj}\omega^{-2} \sum_{n=m_{1vj}}^{l_{1vj}} F(Q_{\text{дн}}), \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} I_{vj}F(\chi_{vj}) + M_{vj}(a_{zvj} - a_{vj})F(z_{vj}) + \sum_{n=m_{v-1,vj}}^{l_{v-1,vj}} \sum_{r=1}^{v-1} (a_{zvj} - a_{zv-1,n}) \cdot \\ \cdot \left[M_{v-1,n}F(z_{v-1,j}) + \sum_{R=m_{r,v-1,n}}^{l_{r,v-1,n}} M_{rR}F(z_{zR}) \right] = \\ = \omega^{-2} \sum_{n=m_{v-1,vj}}^{l_{v-1,vj}} (a_{zvj} - a_{zv-1,n}) \cdot \sum_{R=m_{1,v-1,n}}^{l_{1,v-1,n}} F(Q_{\text{дR}}) = 0, \quad (2.41) \end{aligned}$$

где:

$$F(z_{vj}) = \int_{-\infty}^{\infty} z_{vj}(t)e^{-i\omega t} dt,$$

$$F(\chi_{vj}) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi_{vj}(t)e^{-i\omega t} dt,$$

$$F(Q_{\text{дн}}) = \int_{-\infty}^{\infty} Q_{\text{дн}}(t)e^{-i\omega t} dt,$$

а величины $a_{\alpha vj}, b_{\alpha vj}$ находятся по формулам:

$$a_{\alpha vj} = \begin{cases} 0, & \alpha_{vj} \neq 0 \\ 1, & \alpha_{vj} = 0 \end{cases},$$

$$b_{\alpha vj} = \begin{cases} 0, & \alpha_{vj} = \infty \\ 1, & \alpha_{vj} = 0, \\ \omega^2 \alpha_{vj}^{-1}, & \alpha_{vj} \neq 0, \alpha_{vj} \neq \infty \end{cases},$$

$$\alpha_{vj} = c_{vj} + i\omega k_{vj}.$$

Данные уравнения могут быть записаны в матричной форме:

$$A\tilde{z}^* = B\tilde{Q}_{\text{д}}, \quad (2.42)$$

где \tilde{z}^* – преобразованный по Фурье вектор смещений элементов системы;

$\tilde{Q}_{\text{д}}$ – преобразованный по Фурье вектор динамических сил в контактах колес

экипажа и рельса.

A и B – матрицы, получающиеся в результате записи условий равенства вертикальных сил и равновесия моментов системы, а также перехода в частотную область.

Отсюда имеем:

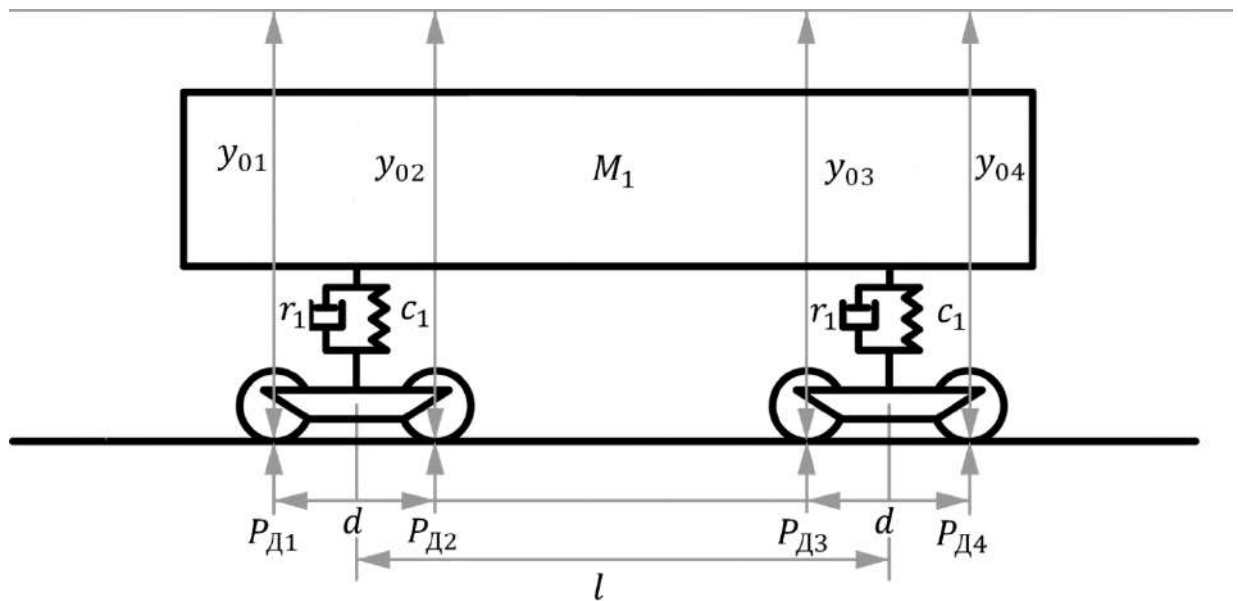
$$\tilde{z}^* = W^0(i\omega)\tilde{Q}_d, \quad (2.43)$$

и, таким образом, частотная матрица $W^0(i\omega)$ может быть найдена по формуле:

$$W^0(i\omega) = A^{-1}B. \quad (2.44)$$

2.5.2. Случай четырехосного грузового вагона

Найдем частотную матрицу $W^0(i\omega)$ для случая четырехосного грузового вагона, кинематическая модель которого представлена на рисунке 2.5:



M_0 – масса тележки, M_1 – масса кузова, I_0 – момент инерции тележки, I_1 – момент инерции кузова, c_1 – жесткость, r_1 – демпфирование, $P_{Дi}$ – динамическая сила в точке контакта i -го колеса с рельсом, d – расстояние между колесными парами, l – расстояние между центрами тележек

Рисунок 2.5 – Кинематическая схема четырехосного грузового вагона

Запишем обобщенные координаты системы [33, 34, 136]:

$$q_1 = y_1; q_2 = y_2,$$

где y_i – смещение в вертикальной плоскости элементов экипажа;

$$q_3 = \frac{y_{01} + y_{02}}{2}; q_4 = \frac{y_{01} - y_{02}}{d}; q_5 = \frac{y_{03} + y_{04}}{2}; q_6 = \frac{y_{03} - y_{04}}{d},$$

и обобщенные силы:

$$\begin{aligned}
Q_1 &= 0; \quad Q_2 = 0; \\
Q_3 &= -(P_{Д1} + P_{Д2}); \quad Q_4 = -\frac{d}{2}(P_{Д1} - P_{Д2}); \\
Q_5 &= -(P_{Д3} + P_{Д4}); \quad Q_6 = -\frac{d}{2}(P_{Д3} - P_{Д4}).
\end{aligned}$$

Кинетическая энергия системы:

$$T = \frac{1}{2}M_1 \left(\frac{\dot{q}_1 + \dot{q}_2}{2} \right)^2 + \frac{1}{2}I_1 \left(\frac{\dot{q}_1 - \dot{q}_2}{l} \right)^2 + \frac{1}{2}M_0 \dot{q}_3^2 + \frac{1}{2}I_0 \dot{q}_4^2 + \frac{1}{2}M_0 \dot{q}_5^2 + \frac{1}{2}I_0 \dot{q}_6^2. \quad (2.45)$$

Потенциальная энергия системы:

$$\Pi = \frac{1}{2}c_1(q_1 - q_3)^2 + \frac{1}{2}c_1(q_2 - q_5)^2. \quad (2.46)$$

Функция рассеивания энергии:

$$\Phi = \frac{1}{2}r_1(\dot{q}_1 - \dot{q}_3)^2 + \frac{1}{2}r_1(\dot{q}_2 - \dot{q}_5)^2. \quad (2.47)$$

Уравнения Лагранжа второго рода для системы [136]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \quad (2.48)$$

$$\left\{ \begin{aligned}
M_1 \frac{\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2}{4} + I_1 \frac{\ddot{q}_1 - \ddot{q}_2}{l^2} + c_1(q_1 - q_3) + r_1(\dot{q}_1 - \dot{q}_3) &= 0, \\
M_1 \frac{\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2}{4} - I_1 \frac{\ddot{q}_1 - \ddot{q}_2}{l^2} + c_1(q_2 - q_5) + r_1(\dot{q}_2 - \dot{q}_5) &= 0, \\
M_0 \ddot{q}_3 - c_1(q_1 - q_3) - r_1(\dot{q}_1 - \dot{q}_3) &= -(P_{Д1} + P_{Д2}), \\
I_0 \ddot{q}_4 &= -\frac{d}{2}(P_{Д1} - P_{Д2}), \\
M_0 \ddot{q}_5 - c_1(q_2 - q_5) - r_1(\dot{q}_2 - \dot{q}_5) &= -(P_{Д3} + P_{Д4}), \\
I_0 \ddot{q}_6 &= -\frac{d}{2}(P_{Д3} - P_{Д4}).
\end{aligned} \right.$$

Преобразуя по Фурье получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\omega^2}{4}M_1(q_1^* + q_2^*) - \frac{\omega^2}{l^2}I_1(q_1^* - q_2^*) + c_1(q_1^* - q_3^*) + i\omega r_1(q_1^* - q_3^*) = 0, \\ -\frac{\omega^2}{4}M_1(q_1^* + q_2^*) + \frac{\omega^2}{l^2}I_1(q_1^* - q_2^*) + c_1(q_2^* - q_5^*) + i\omega r_1(q_2^* - q_5^*) = 0, \\ -\omega^2 M_0 q_3^* - c_1(q_1^* - q_3^*) - i\omega r_1(q_1^* - q_3^*) = -(P_{Д1} + P_{Д2}), \\ -\omega^2 I_0 q_4^* = -\frac{d}{2}(P_{Д1} - P_{Д2}), \\ -\omega^2 M_0 q_5^* - c_1(q_2^* - q_5^*) - i\omega r_1(q_2^* - q_5^*) = -(P_{Д3} + P_{Д4}), \\ -\omega^2 I_0 q_6^* = -\frac{d}{2}(P_{Д3} - P_{Д4}). \end{array} \right.$$

Рассмотрим первые два уравнения системы и перепишем их в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\omega^2}{2}M_1(q_1^* + q_2^*) + c_1(q_1^* - q_3^*) + c_1(q_2^* - q_5^*) + i\omega r_1(q_1^* - q_3^*) + i\omega r_1(q_2^* - q_5^*) = 0, \\ -\frac{2\omega^2}{l^2}I_1(q_1^* - q_2^*) + c_1(q_1^* - q_3^*) - c_1(q_2^* - q_5^*) + i\omega r_1(q_1^* - q_3^*) - i\omega r_1(q_2^* - q_5^*) = 0, \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{q_1^* + q_2^*}{2}\right)(-\omega^2 M_1 + 2i\omega r_1 + 2c_1) - (c_1 + i\omega r_1)(q_3^* + q_5^*) = 0, \\ \left(\frac{q_1^* - q_2^*}{2}\right)\left(-\frac{4\omega^2 I_1}{l^2} + 2i\omega r_1 + 2c_1\right) - (c_1 + i\omega r_1)(q_3^* - q_5^*) = 0, \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1^* = \frac{(c_1 + i\omega r_1)(q_3^* + q_5^*)}{(-\omega^2 M_1 + 2i\omega r_1 + 2c_1)} + \frac{(c_1 + i\omega r_1)(q_3^* - q_5^*)}{(-4\omega^2 I_1/l^2 + 2i\omega r_1 + 2c_1)}, \\ q_2^* = \frac{(c_1 + i\omega r_1)(q_3^* + q_5^*)}{(-\omega^2 M_1 + 2i\omega r_1 + 2c_1)} - \frac{(c_1 + i\omega r_1)(q_3^* - q_5^*)}{\left(-\frac{4\omega^2 I_1}{l^2} + 2i\omega r_1 + 2c_1\right)}, \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1^* = (q_3^* + q_5^*) \frac{i\omega r_1 + c_1}{-\omega^2 M_1 + 2i\omega r_1 + 2c_1} + (q_3^* - q_5^*) \frac{i\omega r_1 + c_1}{-4\omega^2 I_1/l^2 + 2i\omega r_1 + 2c_1}, \\ q_2^* = (q_3^* + q_5^*) \frac{i\omega r_1 + c_1}{-\omega^2 M_1 + 2i\omega r_1 + 2c_1} - (q_3^* - q_5^*) \frac{i\omega r_1 + c_1}{-4\omega^2 I_1/l^2 + 2i\omega r_1 + 2c_1}, \\ (-\omega^2 M_0 + i\omega r_1 + c_1)q_3^* - (i\omega r_1 + c_1)q_1^* = -(P_{Д1} + P_{Д2}), \\ q_4^* = \frac{d}{2\omega^2 I_0}(P_{Д1} - P_{Д2}), \\ (-\omega^2 M_0 + i\omega r_1 + c_1)q_5^* - (i\omega r_1 + c_1)q_2^* = -(P_{Д3} + P_{Д4}), \\ q_6^* = \frac{d}{2\omega^2 I_0}(P_{Д3} - P_{Д4}). \end{array} \right.$$

Обозначим:

$$\begin{cases} x = \frac{i\omega r_1 + c_1}{-\omega^2 M_1 + 2i\omega r_1 + 2c_1}, \\ y = \frac{i\omega r_1 + c_1}{-\frac{4\omega^2 I_1}{l^2} + 2i\omega r_1 + 2c_1}, \\ z = -\omega^2 M_0 + i\omega r_1 + c_1, \end{cases}$$

и подставим значения q_1^*, q_2^* в 3-е и 5-е уравнения системы:

$$\begin{cases} zq_3^* - (i\omega r_1 + c_1)((q_3^* + q_5^*)x + (q_3^* - q_5^*)y) = -(P_{Д1} + P_{Д2}) \\ zq_5^* - (i\omega r_1 + c_1)((q_3^* + q_5^*)x - (q_3^* - q_5^*)y) = -(P_{Д3} + P_{Д4})' \\ \begin{cases} z(q_3^* + q_5^*) - 2(i\omega r_1 + c_1)x(q_3^* + q_5^*) = -(P_{Д1} + P_{Д2} + P_{Д3} + P_{Д4}) \\ z(q_3^* - q_5^*) - 2(i\omega r_1 + c_1)y(q_3^* - q_5^*) = -(P_{Д1} + P_{Д2}) + (P_{Д3} + P_{Д4}) \end{cases} \\ \begin{cases} q_3^* + q_5^* = \frac{-(P_{Д1} + P_{Д2} + P_{Д3} + P_{Д4})}{z - 2(i\omega r_1 + c_1)x} \\ q_3^* - q_5^* = \frac{-(P_{Д1} + P_{Д2}) + (P_{Д3} + P_{Д4})}{z - 2(i\omega r_1 + c_1)y} \end{cases} \end{cases}$$

И в итоге имеем:

$$\begin{cases} q_3^* + q_5^* = \frac{-(P_{Д1} + P_{Д2} + P_{Д3} + P_{Д4})(-\omega^2 M_1 + 2i\omega r_1 + 2c_1)}{(-\omega^2 M_0 + i\omega r_1 + c_1)(-\omega^2 M_1 + 2i\omega r_1 + 2c_1) - 2(i\omega r_1 + c_1)^2} \\ q_3^* - q_5^* = \frac{(P_{Д3} + P_{Д4} - P_{Д1} - P_{Д2})(-4\omega^2 I_1/l^2 + 2i\omega r_1 + 2c_1)}{(-\omega^2 M_0 + i\omega r_1 + c_1)(-4\omega^2 I_1/l^2 + 2i\omega r_1 + 2c_1) - 2(i\omega r_1 + c_1)^2} \end{cases},$$

Обозначая:

$$\begin{cases} W^1(i\omega) = \frac{\omega^2 M_1 - 2i\omega r_1 - 2c_1}{\omega^4 M_0 M_1 - ir_1(2M_0 + M_1)\omega^3 - c_1(2M_0 + M_1)\omega^2} \\ W^2(i\omega) = \frac{4\omega^2 I_1 - 2i\omega r_1 l^2 - 2c_1 l^2}{4\omega^4 M_0 I_1 - ir_1(2M_0 l^2 + 4I_1)\omega^3 - c_1(2M_0 l^2 + 4I_1)\omega^2} \end{cases},$$

$$\begin{cases} q_3^* = \frac{1}{2}(W^1 + W^2)(P_{Д1} + P_{Д2}) + \frac{1}{2}(W^1 - W^2)(P_{Д3} + P_{Д4}) \\ q_5^* = \frac{1}{2}(W^1 - W^2)(P_{Д1} + P_{Д2}) + \frac{1}{2}(W^1 + W^2)(P_{Д3} + P_{Д4}) \end{cases}.$$

И, делая замену $q_3 = \frac{y_{01} + y_{02}}{2}$; $q_4 = \frac{y_{01} - y_{02}}{d}$; $q_5 = \frac{y_{03} + y_{04}}{2}$; $q_6 = \frac{y_{03} - y_{04}}{d}$, имеем:

$$\begin{cases} y_{01} = \frac{1}{2}(W^1 + W^2)(P_{Д1} + P_{Д2}) + \frac{1}{2}(W^1 - W^2)(P_{Д3} + P_{Д4}) + \frac{d^2}{4\omega^2 I_0}(P_{Д1} - P_{Д2}) \\ y_{02} = \frac{1}{2}(W^1 + W^2)(P_{Д1} + P_{Д2}) + \frac{1}{2}(W^1 - W^2)(P_{Д3} + P_{Д4}) - \frac{d^2}{4\omega^2 I_0}(P_{Д1} - P_{Д2}) \\ y_{03} = \frac{1}{2}(W^1 - W^2)(P_{Д1} + P_{Д2}) + \frac{1}{2}(W^1 + W^2)(P_{Д3} + P_{Д4}) + \frac{d^2}{4\omega^2 I_0}(P_{Д3} - P_{Д4}) \\ y_{04} = \frac{1}{2}(W^1 - W^2)(P_{Д1} + P_{Д2}) + \frac{1}{2}(W^1 + W^2)(P_{Д3} + P_{Д4}) - \frac{d^2}{4\omega^2 I_0}(P_{Д3} - P_{Д4}) \end{cases},$$

откуда матрица частотных характеристик имеет вид:

$$W^0(i\omega) = \begin{pmatrix} W_{11}(i\omega) & W_{12}(i\omega) & W_{13}(i\omega) & W_{14}(i\omega) \\ W_{21}(i\omega) & W_{22}(i\omega) & W_{23}(i\omega) & W_{24}(i\omega) \\ W_{31}(i\omega) & W_{32}(i\omega) & W_{33}(i\omega) & W_{34}(i\omega) \\ W_{41}(i\omega) & W_{42}(i\omega) & W_{43}(i\omega) & W_{44}(i\omega) \end{pmatrix}, \quad (2.49)$$

где

$$W_{11}(i\omega) = W_{22}(i\omega) = W_{33}(i\omega) = W_{44}(i\omega) = \frac{1}{2}(W^1 + W^2) + \frac{d^2}{4\omega^2 I_0} \quad (2.50)$$

$$W_{12}(i\omega) = W_{21}(i\omega) = W_{34}(i\omega) = W_{43}(i\omega) = \frac{1}{2}(W^1 + W^2) - \frac{d^2}{4\omega^2 I_0} \quad (2.51)$$

$$W_{13}(i\omega) = W_{31}(i\omega) = W_{14}(i\omega) = W_{41}(i\omega) = \frac{1}{2}(W^1 - W^2) \quad (2.52)$$

$$W_{23}(i\omega) = W_{32}(i\omega) = W_{24}(i\omega) = W_{42}(i\omega) = \frac{1}{2}(W^1 - W^2) \quad (2.53)$$

2.6. Нахождение матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь, в модели колебаний пути, как трехслойной балки

Рассмотрим схему взаимодействия пути и экипажа при вертикальных колебаниях, представленную на рисунке 2.6.

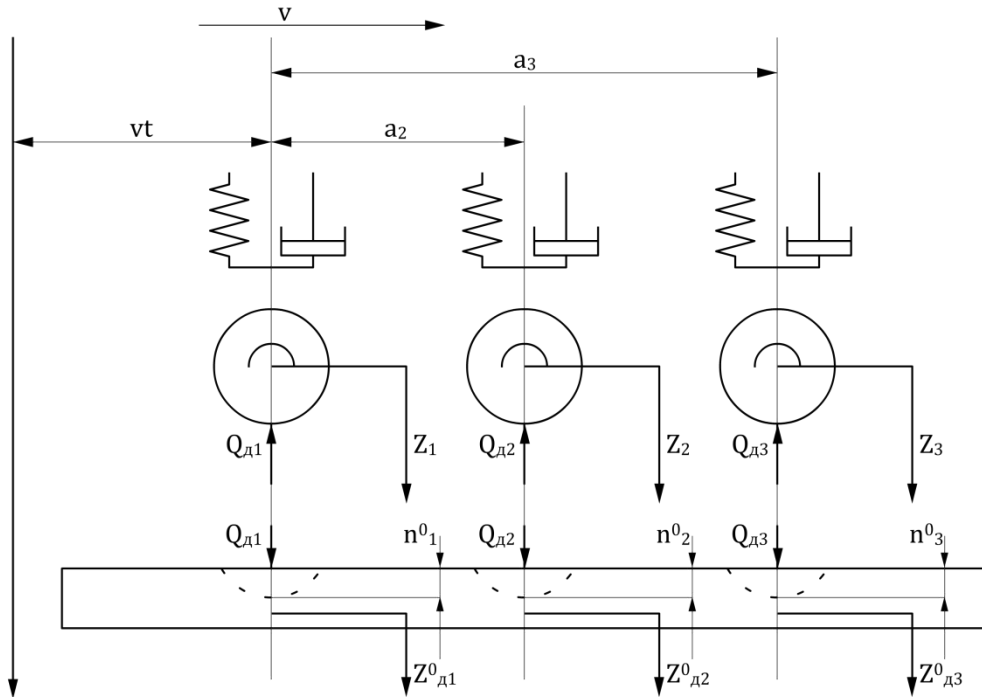


Рисунок 2.6 – Схема взаимодействия пути и экипажа при вертикальных колебаниях (колебаниях подпрыгивания и галопирования)

Из уравнения, связывающего компоненты вектора смещений колес с векторами прогиба рельса имеем [36]:

$$z_i(t) - z_{di}^0(t) - \eta_i^0(t) = \xi_i^0(vt), \quad (2.54)$$

где $z_i(t)$ – смещение i -го колеса под нагрузкой $Q_d(t)$;

$z_d^0(t)$ – местная деформация в точке контакта колеса и рельса, вызванная действием вертикальной нагрузки $Q_d(t)$;

$\eta^0(t)$ – контактная деформация в точке контакта колеса с рельсом;

$\xi_i^0(vt)$ – неровность под i -м колесом:

$$\xi_i^0(vt) = \xi_p^0(a_i + vt) + \xi_l^0(a_i + vt) + \xi_{ki}^0(vt), \quad (2.55)$$

где $\xi_p^0(a_i + vt)$ – неровность на поверхности катания рельса;

$\xi_l^0(a_i + vt)$ – неровность, обусловленная зазором между рельсом и основанием;

$\xi_{ki}^0(vt)$ – неровность колеса;

a_i – расстояние между i -м колесом и началом подвижной системы координат, движущейся вместе с экипажем с постоянной скоростью v .

Таким образом, можно записать [34]:

$$\tilde{z}(t) = W^0(i\omega) \cdot \tilde{Q}_d, \quad (2.56)$$

$$z_d^0(t) = W_{z_1}^Q(0, i\omega) \cdot \tilde{Q}_d, \quad (2.57)$$

$$\eta^0(t) = \frac{1}{C_K^0} \cdot \tilde{Q}_d, \quad (2.58)$$

где $W^0(i\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика, связывающая вектор динамических сил в контактах колес и рельсов с вектором вертикальных смещений колесных центров;

$W_{z_1}(i\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика прогибов первого слоя конструкции пути;

C_K^0 – контактная жесткость пары колесо–рельс.

Таким образом,

$$\tilde{Q}_d = W_p(i\omega) \cdot \tilde{\xi}, \quad (2.59)$$

где

$$W_p(i\omega) = \left(W^0(i\omega) - W_{z_1}^Q(0, i\omega) - \frac{1}{C_K^0} E \right)^{-1}. \quad (2.60)$$

Отсюда, пользуясь формулой для спектральной плотности случайных процессов, получаем [137]:

$$S_Q = \overline{W_p(i\omega)} S_E(\omega) W_p(i\omega)^T, \quad (2.61)$$

где S_E – матрица спектральных плотностей неровностей пути;

$\overline{W_p(i\omega)}$ – матрица, комплексно сопряженная к матрице $W_p(i\omega)$;

$W_p(i\omega)^T$ – транспонированная матрица $W_p(i\omega)$.

Помимо $W_p(i\omega)$, для проведения расчетов также может быть использована частотная матрица $W_q(i\omega)$, в таком случае:

$$\tilde{Q}_d = W_q(i\omega) \cdot \tilde{\xi}, \quad (2.62)$$

где

$$W_q(i\omega) = -\frac{1}{\omega^2} W_p(i\omega), \quad (2.63)$$

а формула (2.61) примет вид:

$$S_Q = \overline{W_q(i\omega)} S_{\Xi}(\omega) W_q(i\omega)^T. \quad (2.64)$$

Таким образом, для нахождения матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил для трехслойной конструкции пути достаточно нахождения частотной матрицы $W_p(i\omega)$ и матрицы спектральных плотностей неровностей пути S_{Ξ} .

Выводы к главе 2

1) Найдены частотные характеристики, связывающие вектор динамических сил в контактах колес и рельсов с вектором вертикальных смещений колесных центров, в математической модели воздействия четырехосного грузового вагона на железнодорожный путь как трехслойную балку, лежащую на модифицированном основании Винклера.

2) Разработан алгоритм расчета матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на безбалластный путь.

3) Представленный алгоритм позволяет найти средние значения и среднеквадратические отклонения для прогибов, изгибающих моментов, поворотов сечений, поперечных сил в слоях безбалластной конструкции пути.

3. ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТОВ

3.1. Исходные данные

Для проведения расчетов была выбран безбалластный путь NBT (New Ballastless Track) компании Alstom (Франция), испытанный на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» в 2014–2016г. Данный путь представляет собой железобетонное монолитное основание. «В основе конструкции лежат две уложенные друг на друга скользящие бетонные плиты; одна из них имеет продольный «шип», другая – продольный «паз». Таким образом, исключается поперечное смещение плит относительно друг друга, но при этом, допускается продольное перемещение. Путевая плита и плита основания выполнены из армированного бетона. Ширина путевой плиты составляет 2,5 м, ее высота – 0,24 м. Для плиты основания данные параметры равны 2,8 м и 0,3 м соответственно. Поперечные стыки плит располагаются через 4,8 м (рисунок 3.1)» [73]. Параметры безбалластной конструкции пути приведены в таблице 3.1.

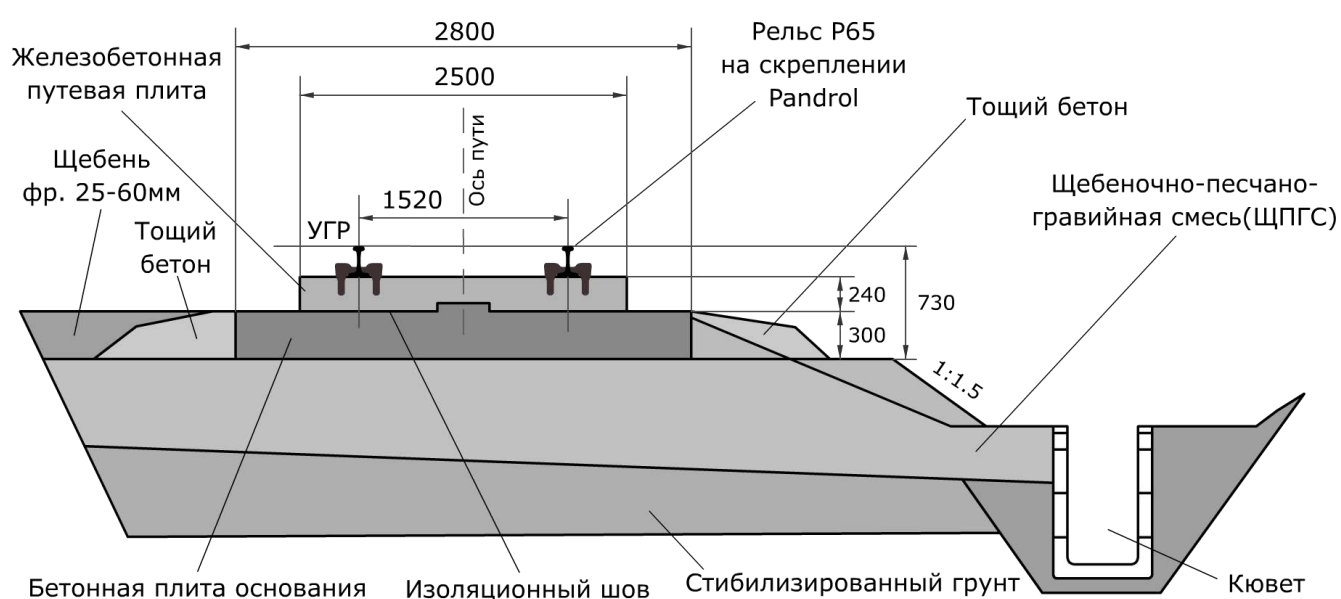


Рисунок 3.1 – Безбалластный путь Alstom

Таблица 3.1 – Параметры безбалластной конструкции пути

№ слоя	Материал	Толщина, мм	Ширина, мм	Объем в 1 погонном метре, м ³	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, E, Н/м ²	Момент инерции (верт.) I, м ⁴	Распределенная приведенная масса m, кг/м
1	Рельс со скреплением	180				$2,1 \cdot 10^{11}$	$3,55 \cdot 10^{-5}$	90
2	Путевая плита	240	2500	0,6	2300	$3,3 \cdot 10^{10}$	0,00144	690
3	Плита основания	300	2800	0,84	2300	$3,3 \cdot 10^{10}$	0,00315	966
4	Тощий бетон	300	3500	1,05	1800	$1,8 \cdot 10^{10}$	0,00788	945
5	ЩПГС	700	7000	4,9	1500	$1,7 \cdot 10^8$	0,2	3675

Значения констант U_2, U_3 находим по формулам (2.35), (2.36):

$$U_2 = b_2 \cdot h_2 = 6,5 \cdot 10^7 \cdot 2,67 \cdot \frac{1}{2} = 8,7 \cdot 10^7$$

$$U_3 = b_3 \cdot h_3 = 5,8 \cdot 10^7 \cdot 3,5 \cdot \frac{1}{2} = 10,1 \cdot 10^7$$

Зная величину прогиба, измеренную экспериментально и равную 3,1 мм при нагрузке на ось 23,5 т, находим значение величины $U_1 = 3,4 \cdot 10^7$ такое, чтобы соотношение (2.37) выполнялось. График зависимости $W_{z1}(0,0)$ от U_1 представлен на рисунке 3.2.

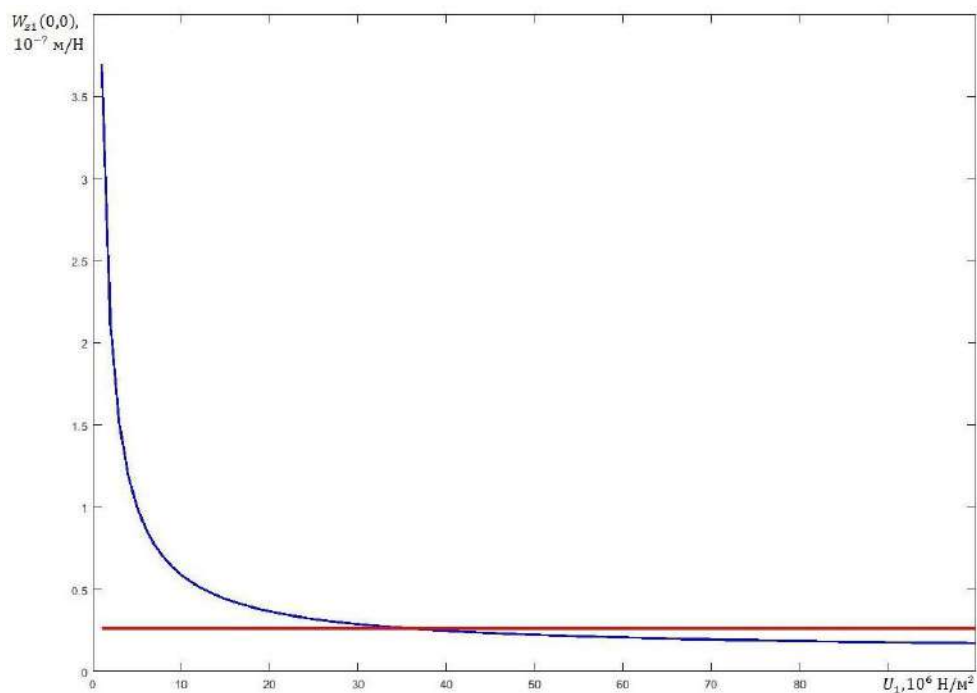


Рисунок 3.2 – График зависимости амплитудно-частотной характеристики $|W_{z1}(0,0)|$ от U_1 .

С учетом условия на коэффициент динамичности, находим значения распределенного приведенного демпфирования в слоях конструкции пути: $f_1 = 2,7 \cdot 10^4$, $f_2 = 2,2 \cdot 10^5$, $f_3 = 5 \cdot 10^5$. Итоговые данные, необходимые для проведения расчета, представлены в таблице 3.2. Спектральные плотности неровностей пути на Экспериментальном кольце представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Исходные данные

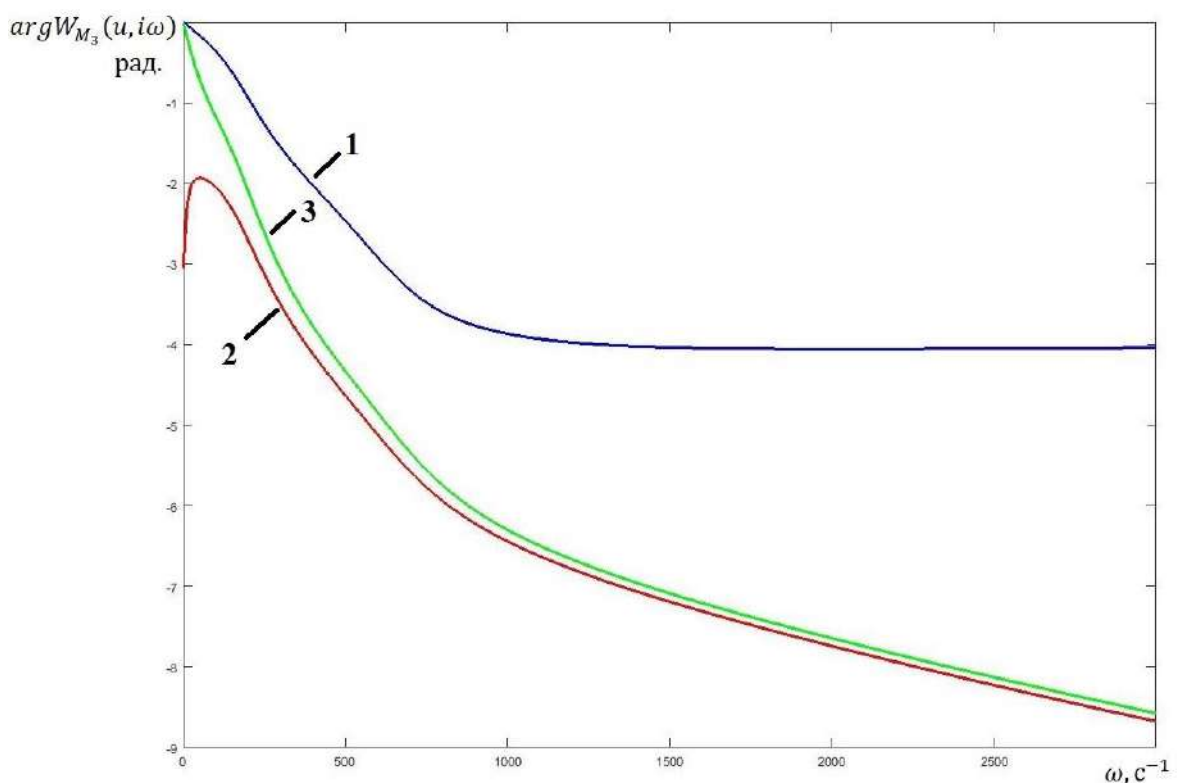
№ слоя	Материал	Распределенная приведенная масса m , кг/м	Модуль упругости, E , Н/м ²	Момент инерции (верт.) I , м ⁴	Приведенный модуль упругости, U , Н/м ²	Распределенное приведенное демпфирование f , Н·с/м ²
1	Рельс со креплением	90	$2,1 \cdot 10^{11}$	$3,55 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^4$
2	Бетонный слой	1656	$3,3 \cdot 10^{10}$	0,00459	$8,7 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^5$
3	Тощий бетон	945	$1,8 \cdot 10^{10}$	0,00788	$10,1 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^5$

Таблица 3.3 – Спектральные плотности неровностей пути на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»

Частота Ω , см ⁻¹	Спектральная плотность S_p , см ³	Частота Ω , см ⁻¹	Спектральная плотность S_p , см ³
0,00025	4000	0,02	0,7
0,000375	2000	0,0209	0,4
0,0005	1300	0,0262	0,2
0,000625	800	0,0314	0,1
0,00125	200	0,0349	0,06
0,0025	50	0,0449	0,03
0,00375	20	0,0628	0,008
0,005	13	0,0785	0,0026
0,00625	7	0,105	0,001
0,007	5,5	0,115	0,0009
0,00785	3,6	0,12	0,00064
0,00848	3	0,125	0,00062
0,0105	1,8	0,25	0,000082
0,0125	2	0,375	0,000084
0,0157	1	0,5	0,000104

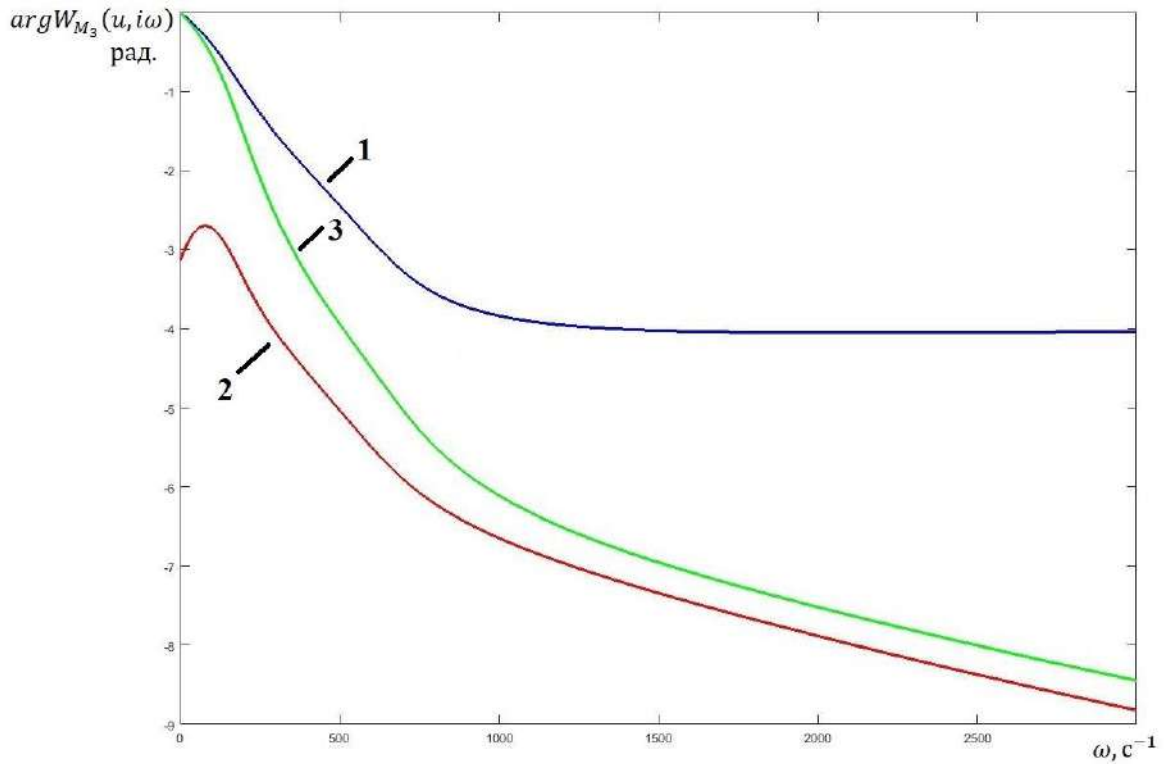
3.2. Нахождение частотных матриц зависимости прогибов и изгибающих моментов слоев конструкции от вертикальных динамических сил, действующих на путь

Воспользовавшись формулами (2.14), (2.15), (2.30), (2.31), находим частотные характеристики прогибов и изгибающих моментов в слоях конструкции пути. На рисунках 3.3–3.14 приводятся амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики прогибов и изгибающих моментов в различных слоях БКП при различных скоростях движения экипажа. Остальные графики частотных характеристик представлены в приложении А, листинг разработанной для проведения расчетов программы на MATLAB представлен в приложении Б.



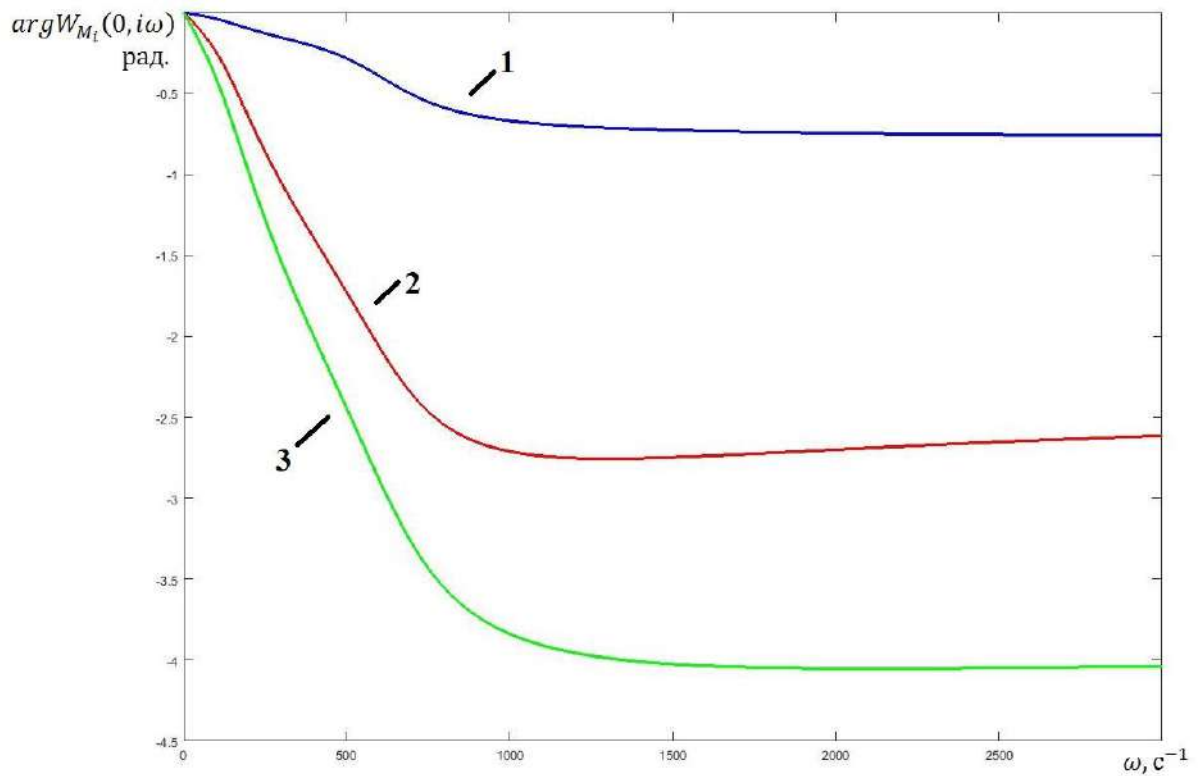
1 – $u = 0$; 2 – $u = 185$ см; 3 – $u = -185$ см

Рисунок 3.3 – Графики фазово-частотных характеристик $argW_{M_3}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



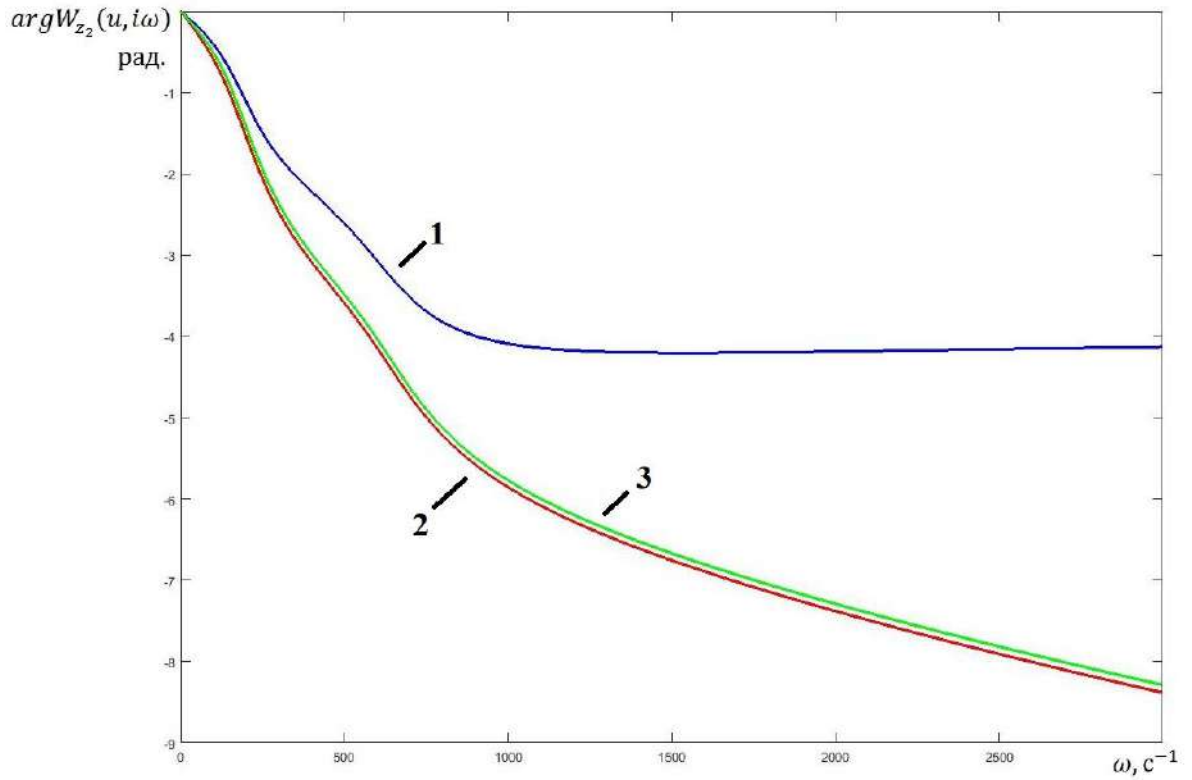
1 – рельс; 2 – бетон; 3 – тощий бетон

Рисунок 3.4 – Графики фазово-частотных характеристик $argW_{M_3}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



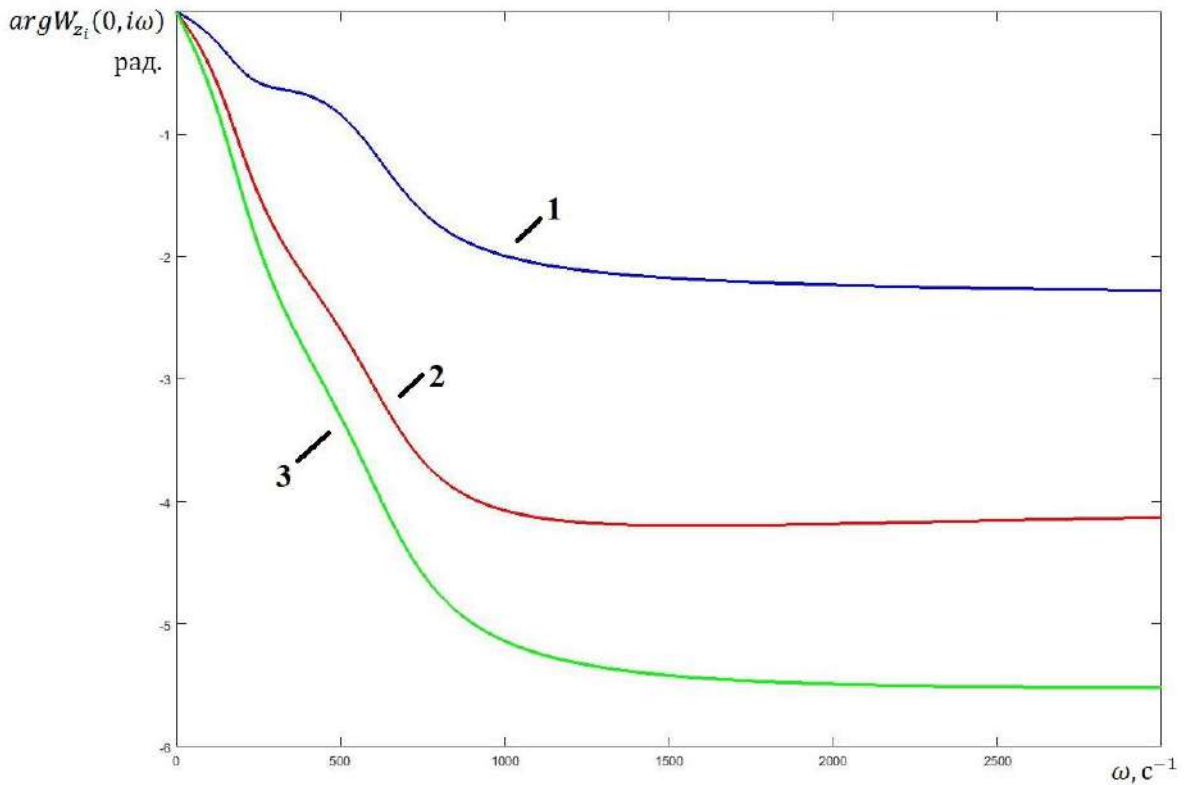
1 – рельс; 2 – бетон; 3 – тощий бетон

Рисунок 3.5 – Графики фазово-частотных характеристик $argW_{M_t}(0, \omega)$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



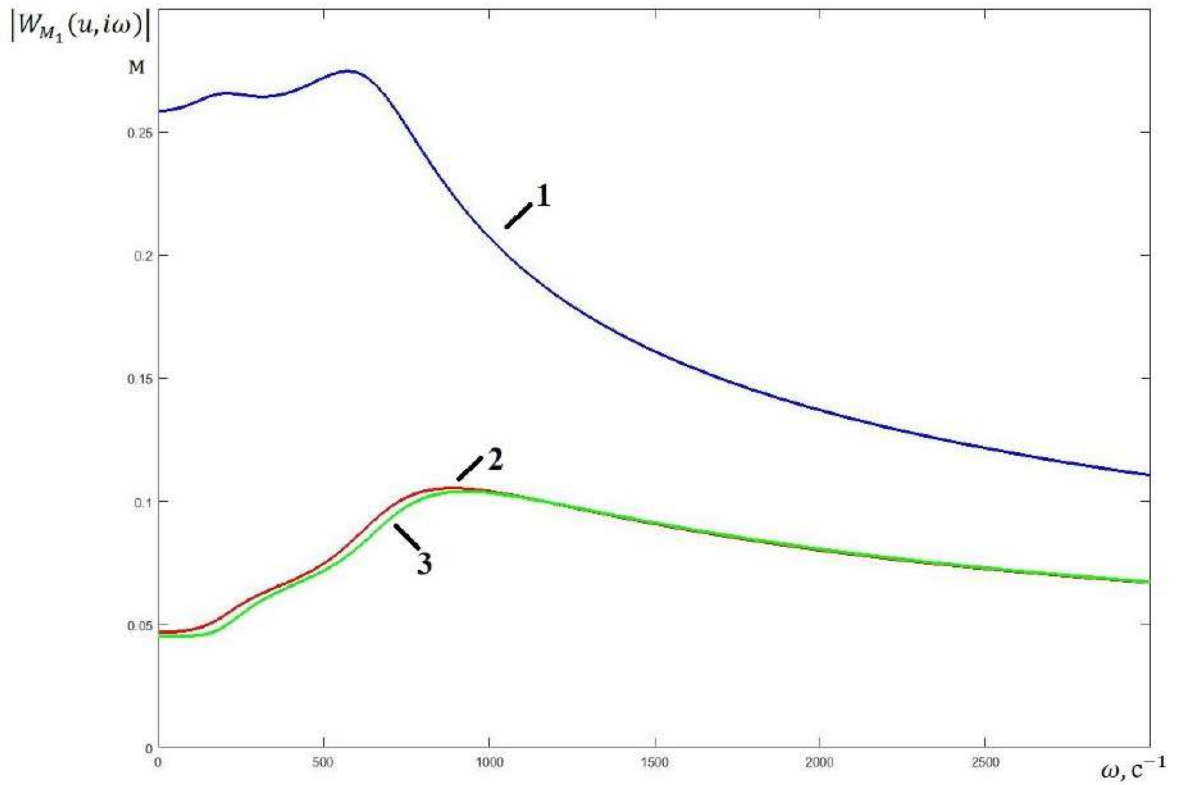
1 – $u = 0$; 2 – $u = 185$ см; 3 – $u = -185$ см

Рисунок 3.6 – Графики фазово-частотных характеристик $argW_{z2}(0, \omega)$ и скорости движения $v = 80$ км/ч



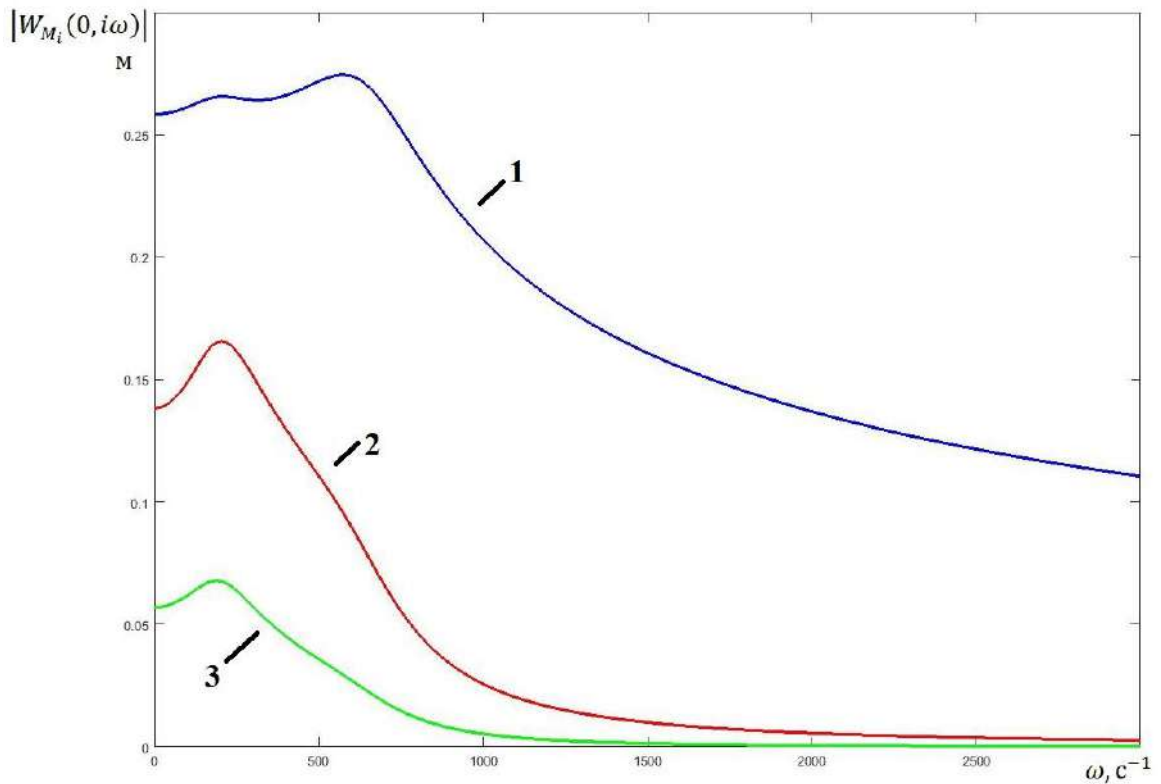
1 – рельс; 2 – бетон; 3 – тощий бетон

Рисунок 3.7 – Графики фазово-частотных характеристик $argW_{zi}(0, \omega)$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



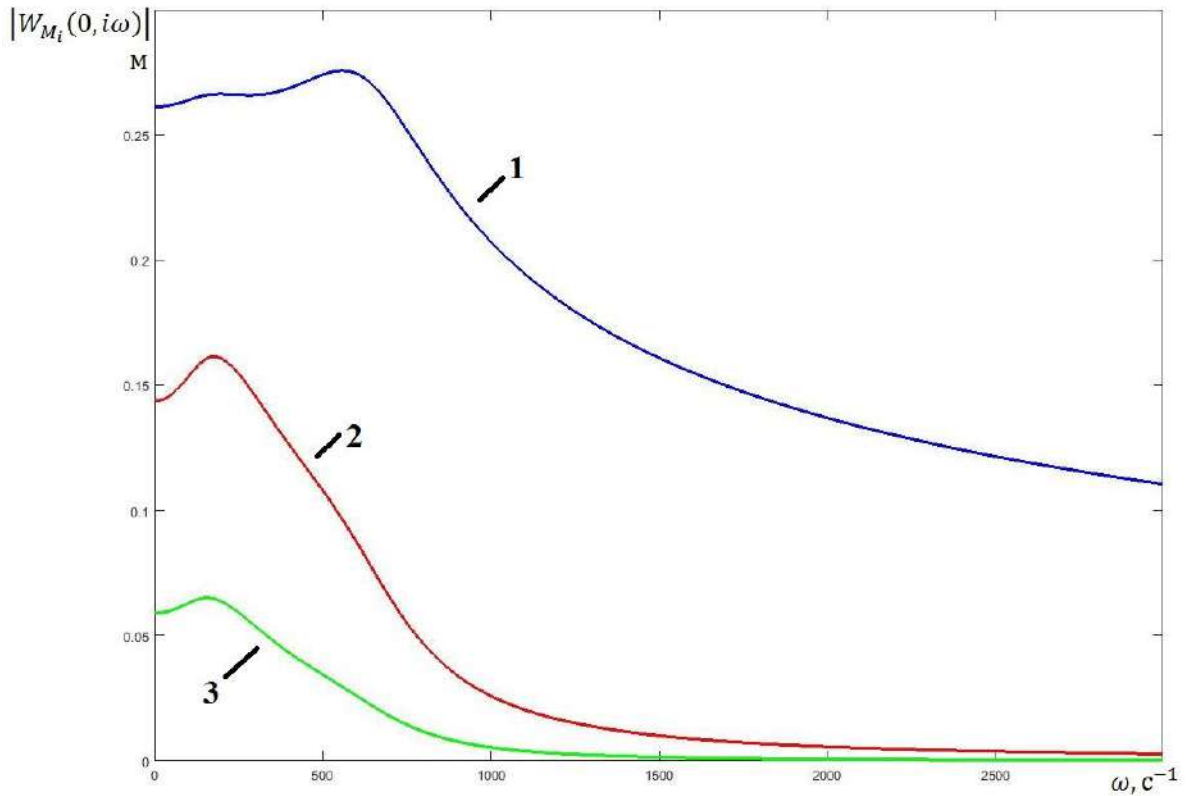
1 – $u = 0$; 2 – $u = 185$ см; 3 – $u = -185$ см

Рисунок 3.8 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{M_1}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



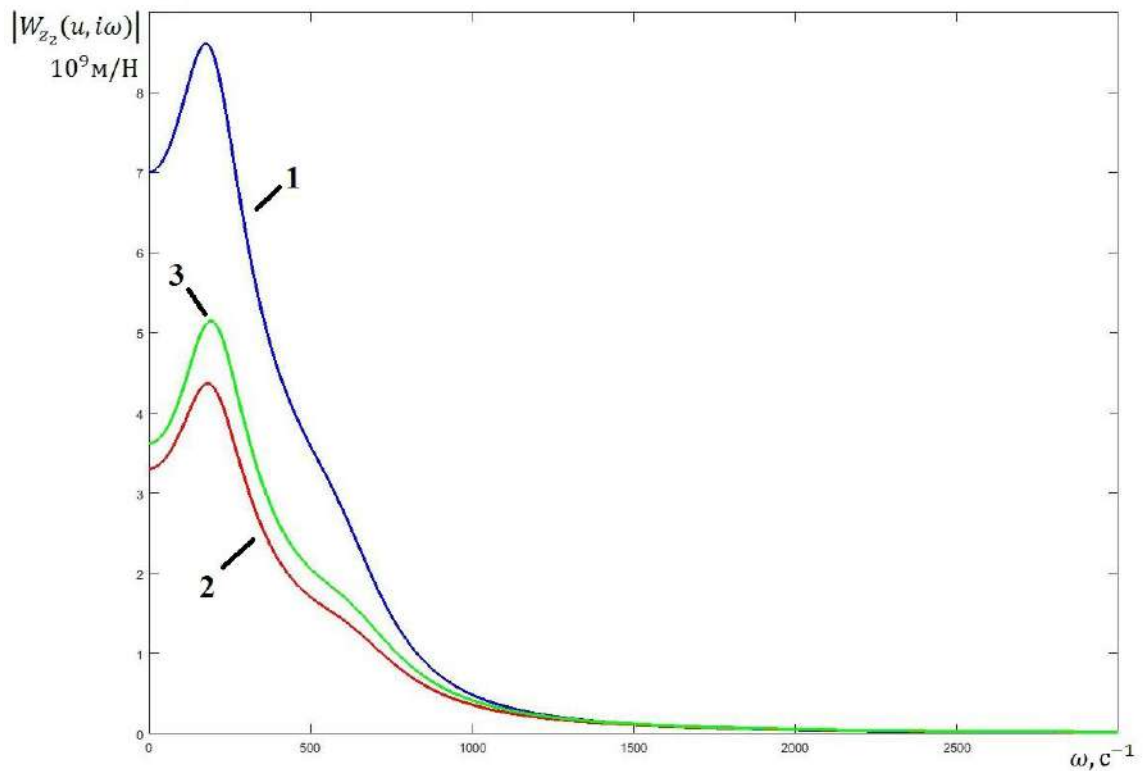
1 – рельс; 2- бетон; 3 – тощий бетон

Рисунок 3.9 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{M_i}(0, \omega)|$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



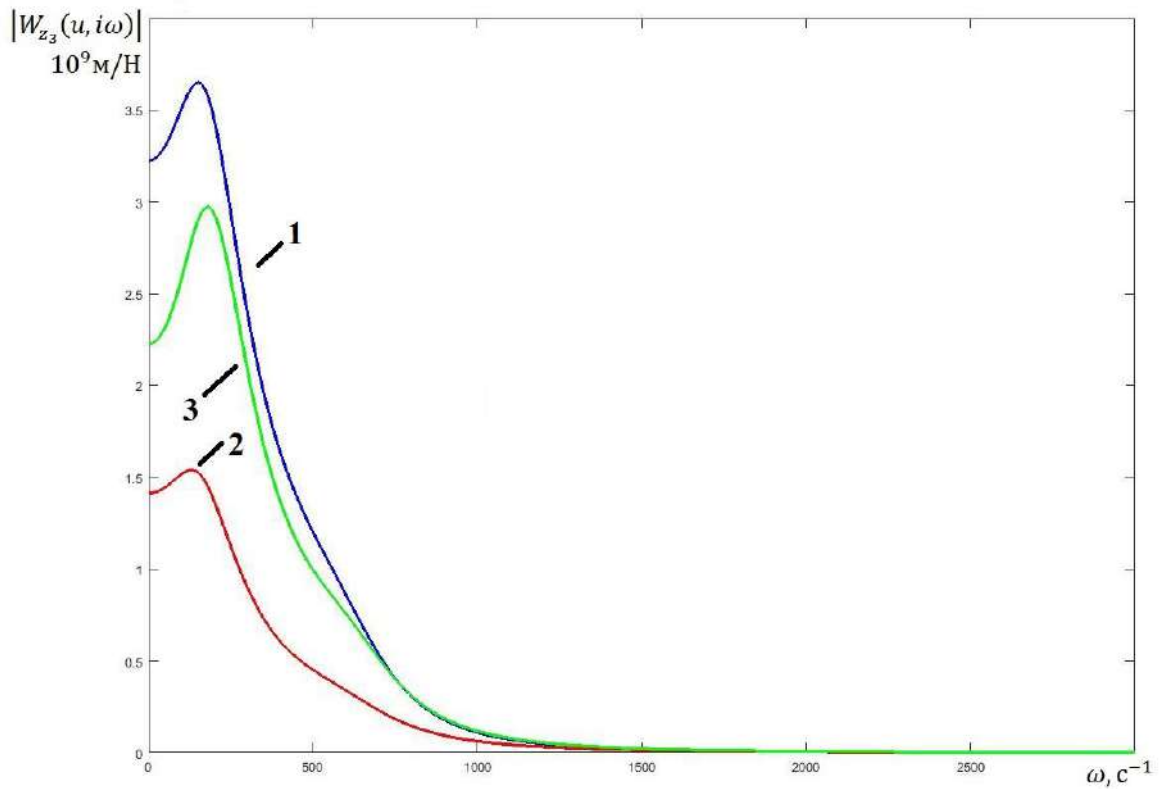
1 – рельс; 2 – бетон; 3 – тощий бетон

Рисунок 3.10 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{Mi}(0, \omega)|$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



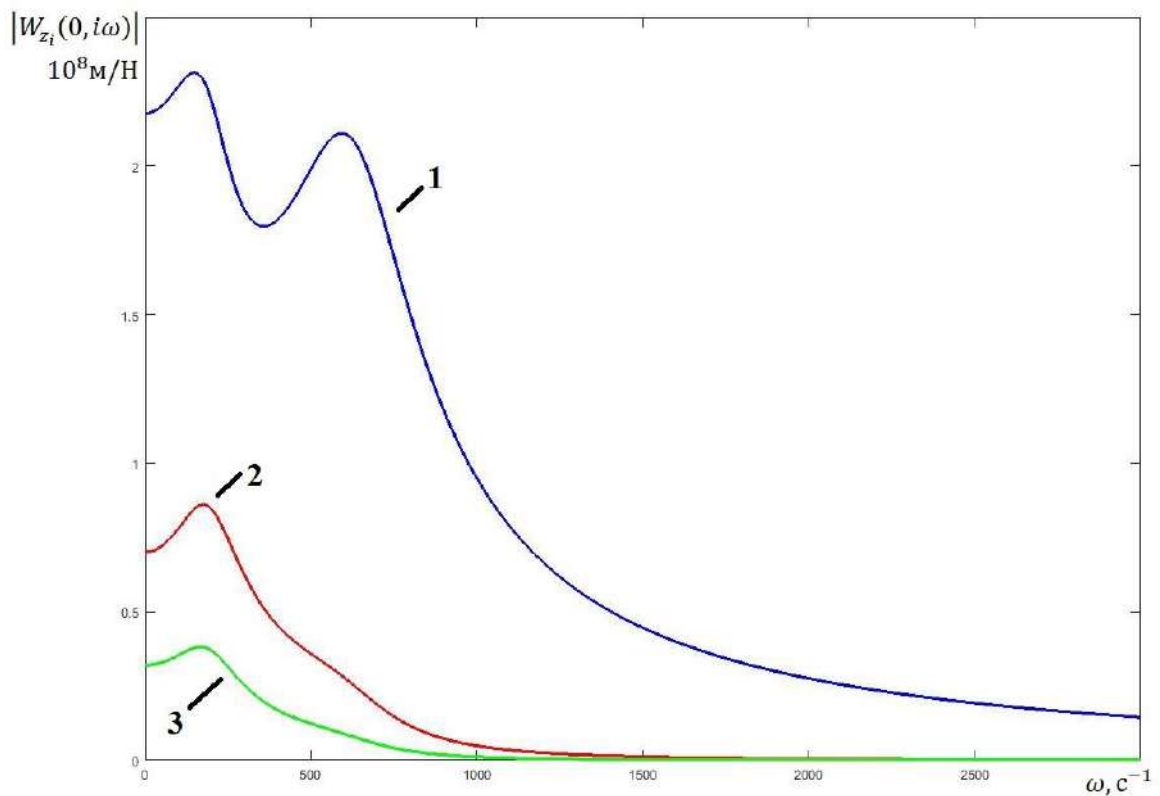
1 – $u = 0$; 2 – $u = 185$ см; 3 – $u = -185$ см

Рисунок 3.11 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{z2}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



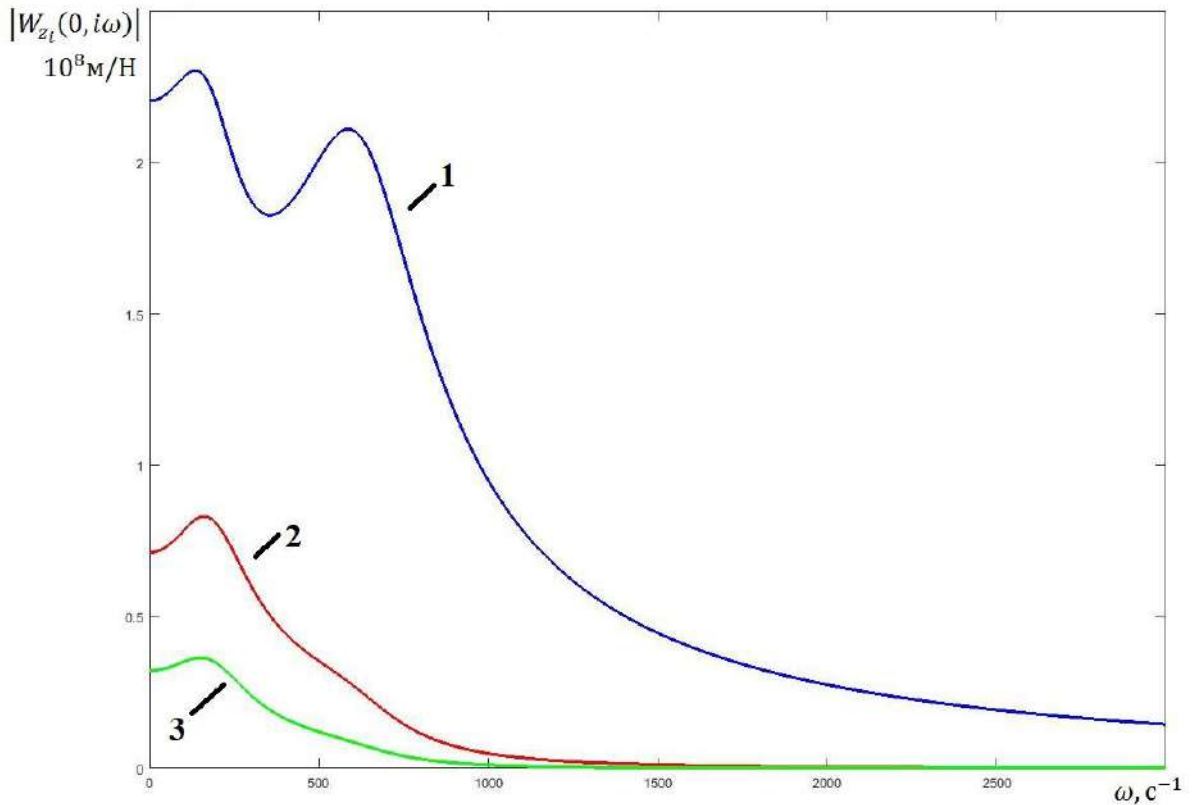
1 – $u = 0$; 2 – $u = 185 \text{ см}$; 3 – $u = -185 \text{ см}$

Рисунок 3.12 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{z_3}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 300 \text{ км/ч}$



1 – рельс; 2 – бетон; 3 – тощий бетон

Рисунок 3.13 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{z_i}(0, \omega)|$ при скорости движения $v = 80 \text{ км/ч}$



1 – рельс; 2 – бетон; 3 – тощий бетон

Рисунок 3.14 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{zi}(0, \omega)|$ при скорости движения $v = 300$ км/ч

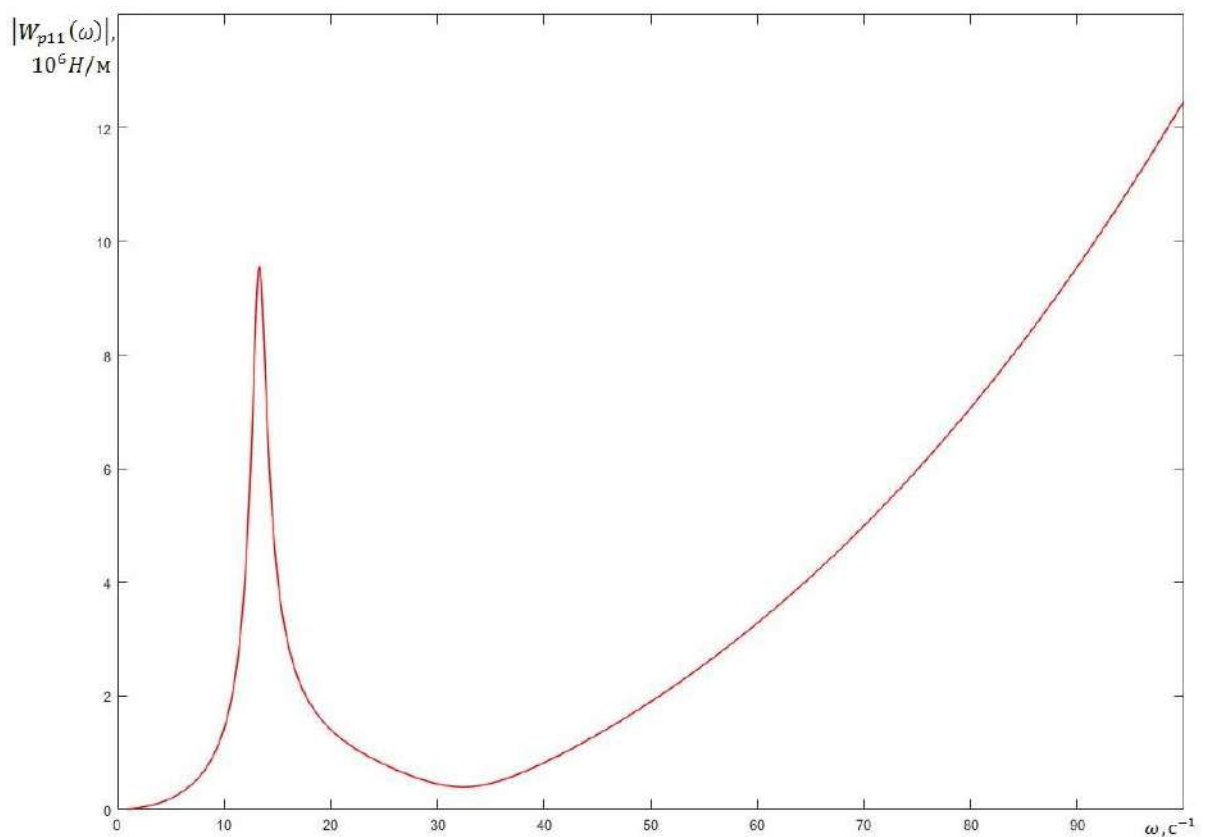
3.3. Нахождение матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь

Для нахождения частотной матрицы W_p , связывающей вектор неровностей пути с вектором вертикальных сил, возникающих при движении четырехосного грузового вагона, и матрицы взаимных спектральных плотностей S_Q использована модель четырехосного грузового вагона со следующими параметрами (таблица 3.4):

Таблица 3.4 – Параметры модели грузового вагона

Название	Обозначение	Значение	Единица измерения
Масса тележки	M_0	2750	кг
Масса кузова	M_1	91400	кг
Момент инерции тележки	I_0	133	кг · м ²
Момент инерции кузова	I_1	12900	кг · м ²
Жесткость	c_1	$8,55 \cdot 10^6$	кг/м
Демпфирование	r_1	71500	кг · с/м

Воспользовавшись частотными характеристиками W_{zi}^Q и W^0 по формулам (2.60), (2.63) находим частотные матрицы $W_p(\omega)$ и $W_q(\omega)$. График амплитудно-частотной характеристики ее диагонального элемента $W_{p11}(\omega)$ представлен на рисунке 3.15, график амплитудно-частотной характеристики диагонального элемента $W_{q11}(\omega)$ представлен на рисунке 3.16.

Рисунок 3.15 – Амплитудно-частотная характеристика $|W_{p11}(\omega)|$ при $0 \leq \omega \leq 100$

Воспользовавшись формулами (2.61), (2.64), находим матрицу взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь S_Q . Амплитудно-частотные характеристики ее диагональных элементов представлены на рисунке 3.17.

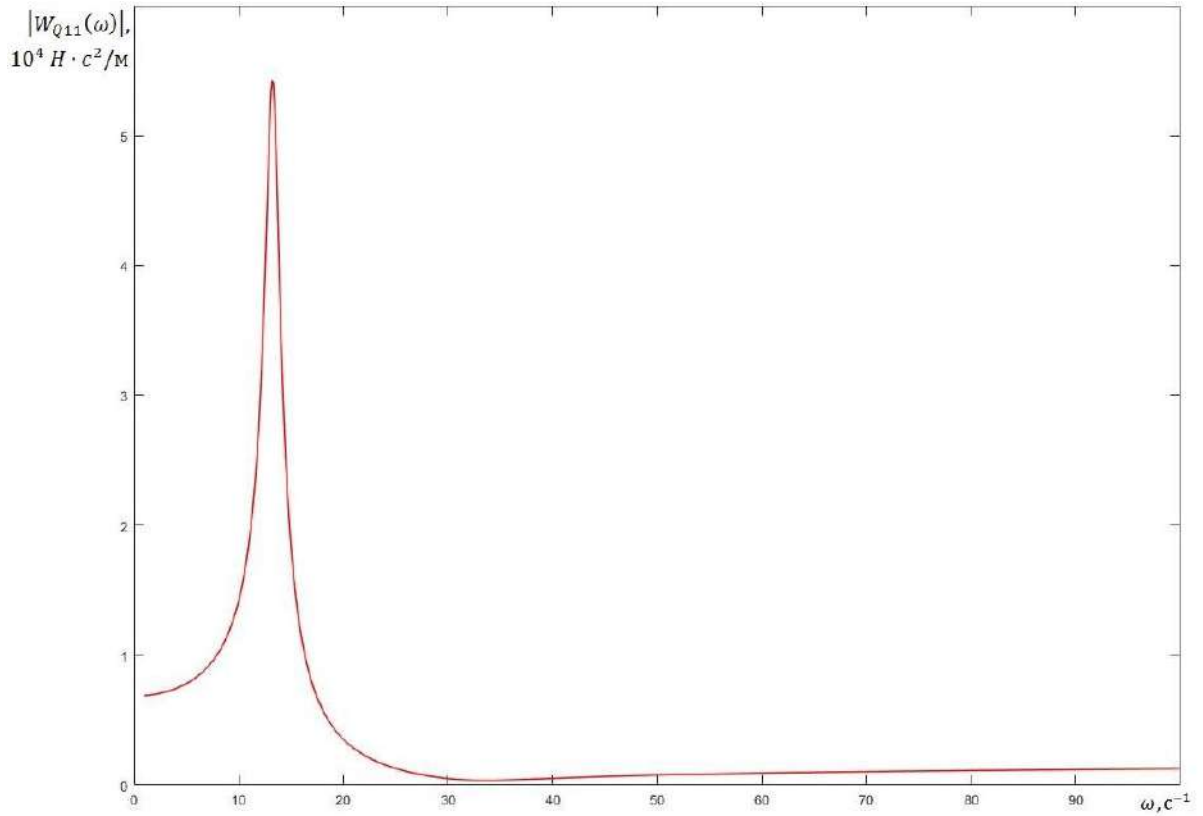


Рисунок 3.16 – Амплитудно-частотная характеристика $|W_{Q11}(\omega)|$ при $0 \leq \omega \leq 100$

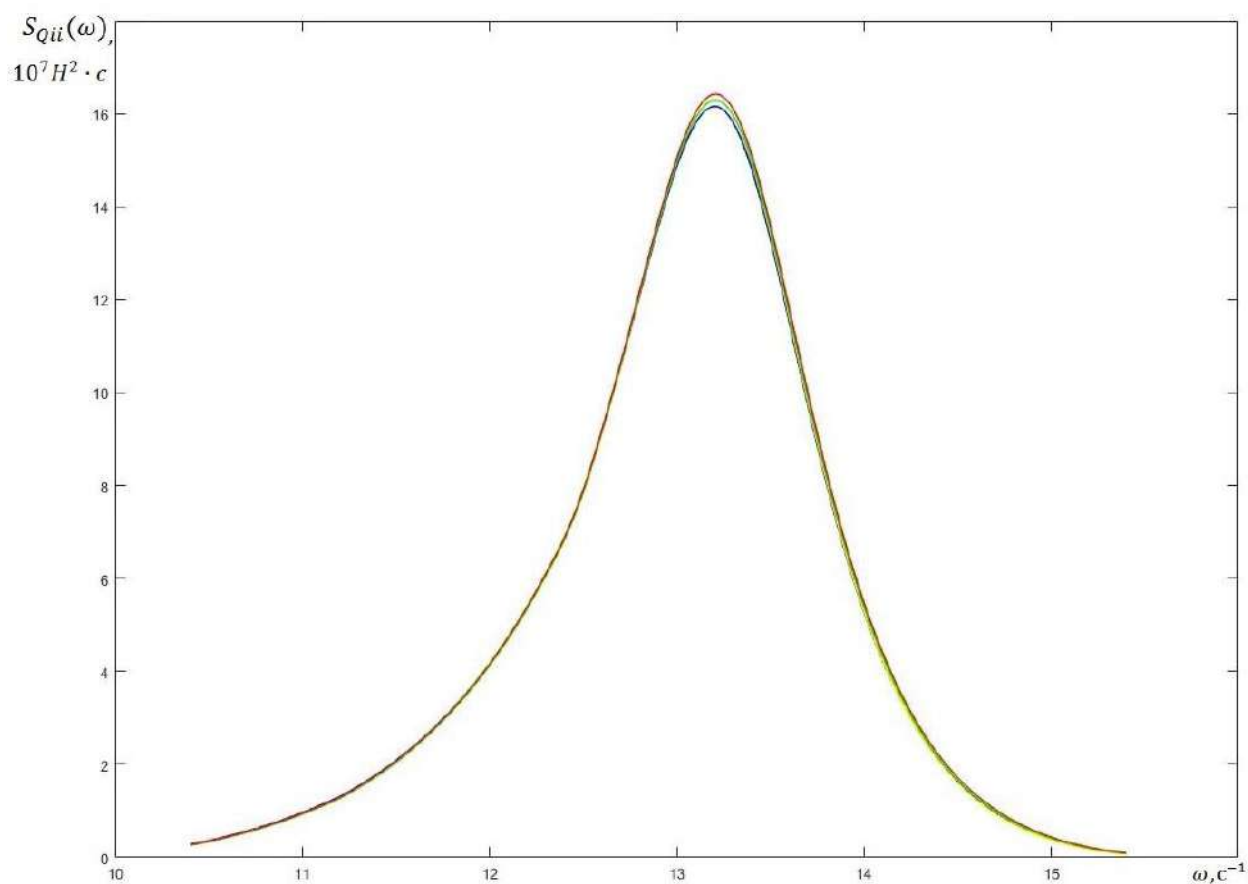


Рисунок 3.17 – Амплитудно-частотные характеристики $S_{Qii}(\omega)$ при $10 \leq \omega \leq 16$

3.4. Нахождение средних значений и среднеквадратических отклонений прогибов и напряжений в слоях конструкции пути

При расчете срока службы безбалластных конструкций пути возникает задача оценки средних значений и среднеквадратических отклонений от средних значений прогибов и напряжений в слоях конструкции пути, поскольку за весь жизненный цикл БКП происходят многократные воздействия на безбалластный путь. Данные статистические оценки могут быть найдены при помощи частотных матриц W_{zi}^Q, W_{Mi}^Q , а также матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил S_Q .

Средняя величина векторов прогибов $\langle z_i \rangle$ и напряжений под действием вектора нагрузки $Q(t)$ находится по формулам [34,42,138]:

$$\langle z_i \rangle = W_{z_i}^Q(0) \cdot \langle Q \rangle; \quad i = \overline{1,3} \quad (3.1)$$

где $\langle Q \rangle$ – вектор-столбец средних значений вертикальных сил Q .

Среднеквадратическое отклонение величин прогибов от их средних значений определяется диагональными членами матрицы спектральных плотностей прогибов слоев балки [34,100]:

$$\sigma_{z_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\int_0^{\infty} S_{z_{ij}j}(\omega) d\omega \right), \quad (3.2)$$

где $n \times n$ – размерность матрицы спектральных плотностей прогибов i -го слоя $S_{z_i}(\omega)$.

$$S_{z_i}(\omega) = \bar{W}_{z_i}^Q(\omega) \cdot S_Q(\omega) \cdot W_{z_i}^{Q^T}(\omega), \quad (3.3)$$

где $\bar{W}_{z_i}^Q(\omega)$ – матрица, комплексно сопряженная с матрицей $W_{z_i}^Q(i\omega)$;

$W_{z_i}^{Q^T}(\omega)$ – транспонированная матрица к $W_{z_i}^Q(i\omega)$;

$S_Q(\omega)$ – матрица взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь;

ω – круговая частота.

На Рисунках 3.18–3.21 представлены графики зависимости средних значений и среднеквадратических отклонений прогибов во втором слое безбалластной конструкции от скорости движения и нагрузки на ось.

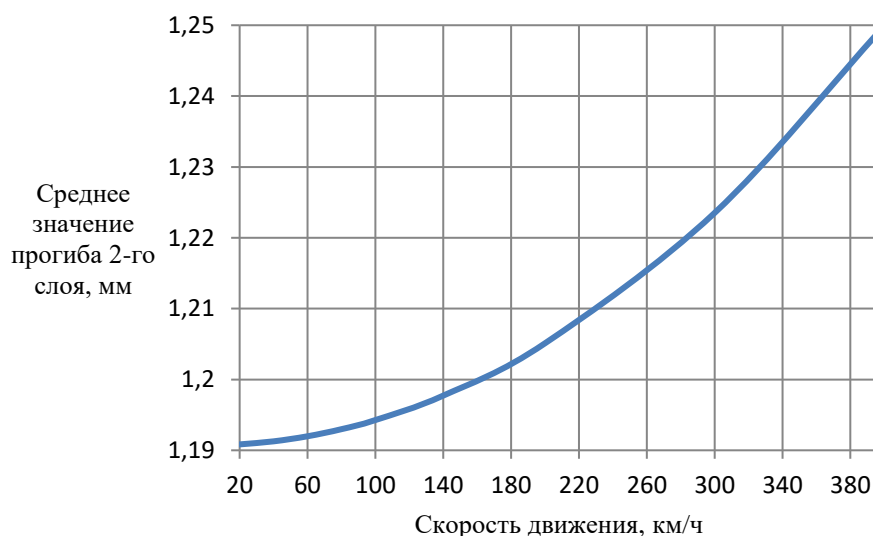


Рисунок 3.18 – График зависимости среднего значения прогиба 2-го слоя конструкции $\langle z_2 \rangle$ от скорости движения

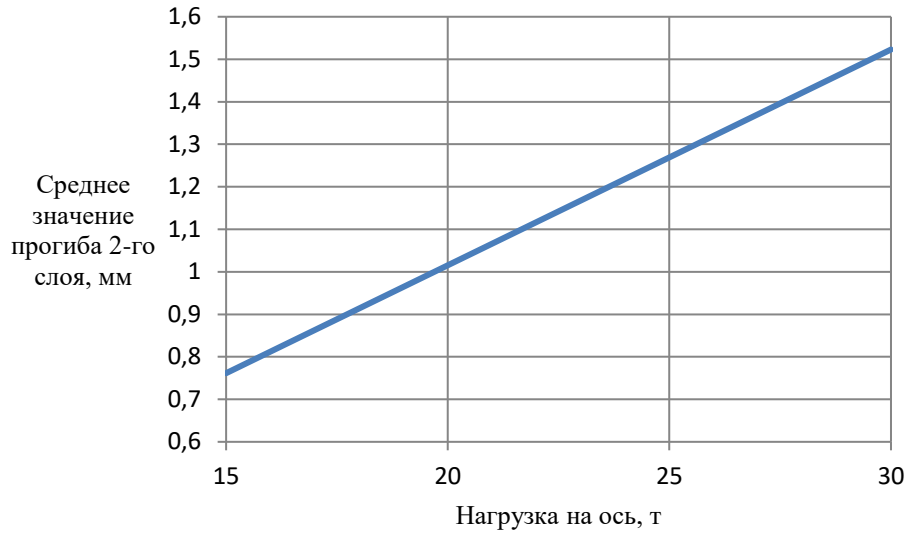


Рисунок 3.19 – График зависимости среднего значения прогиба 2-го слоя конструкции $\langle z_2 \rangle$ от нагрузки на ось

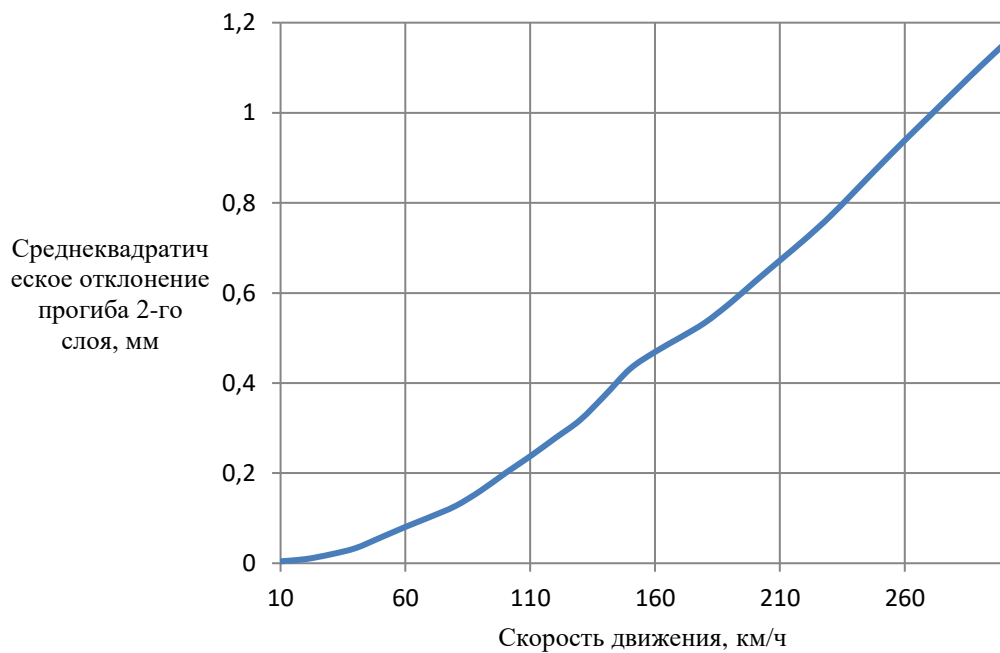


Рисунок 3.20 – График зависимости среднеквадратического отклонения прогиба 2-го слоя конструкции σ_{z_2} от скорости движения

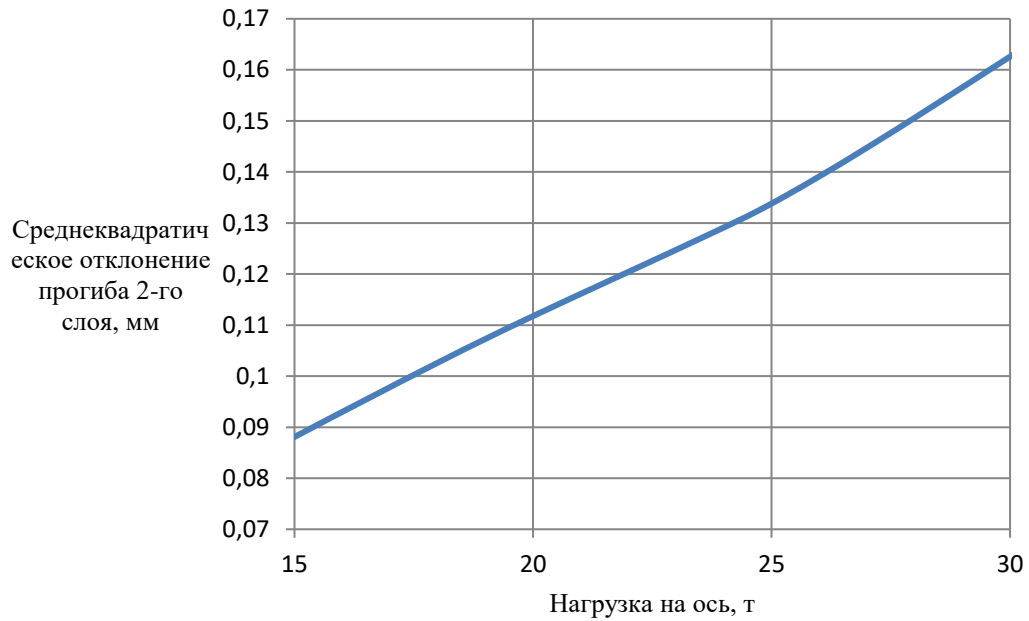


Рисунок 3.21 – График зависимости среднеквадратического отклонения прогиба 2-го слоя конструкции σ_{z_2} от нагрузки на ось

Средние значения напряжений $\langle \sigma_i \rangle$ и среднеквадратических отклонений σ_{σ_i} в слоях конструкции определяются аналогичным образом при помощи частотных характеристик $W_{M_i}^Q(u, i\omega)$ [34,100]:

$$\langle \sigma_i \rangle = W_{M_i}^Q(0) \cdot \frac{\bar{W}_{M_i}^Q(\omega)}{W_i}; \quad i = \overline{1,3}; \quad (3.4)$$

$$\sigma_{\sigma_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\int_0^{\infty} S_{\sigma_{ijj}}(\omega) d\omega \right), \quad (3.5)$$

где:

$$S_{\sigma_i}(\omega) = \frac{\bar{W}_{M_i}^Q(\omega)}{W_i} \cdot S_Q(\omega) \cdot \frac{W_{M_i}^{Q^T}(\omega)}{W_i} \quad (3.6)$$

$W_{M_i}^Q(\omega)$ – частотная матрица изгибающих моментов, определяемая при помощи модели колебаний пути, как трехслойной балки [70];

$\bar{W}_{M_i}^Q(\omega)$ – матрица, комплексно сопряженная к матрице $W_{M_i}^Q(\omega)$;

$W_{M_i}^{Q^T}(\omega)$ – матрица, транспонированная к матрице $W_{M_i}^Q(\omega)$;

W_i – момент сопротивления в заданной точке i -го слоя, м^3 ;

$S_Q(\omega)$ – матрица взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь;

ω – круговая частота.

На Рисунках 3.22–3.25 представлены графики зависимости средних значений и среднеквадратических отклонений напряжений во втором слое безбалластной конструкции от скорости движения и нагрузки на ось.

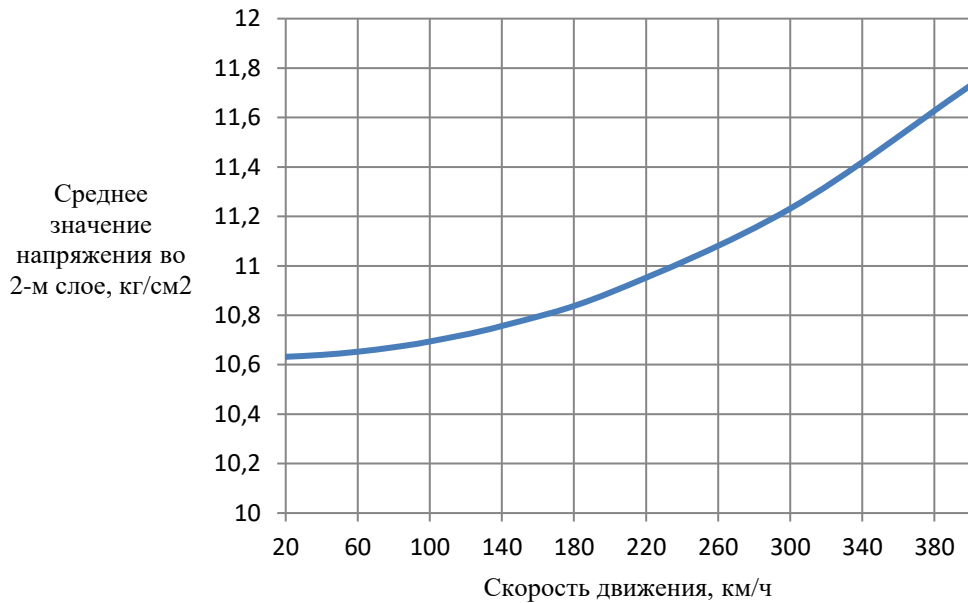


Рисунок 3.22 – График зависимости среднего значения напряжений во 2-м слое конструкции $\langle \sigma_2 \rangle$ от скорости движения

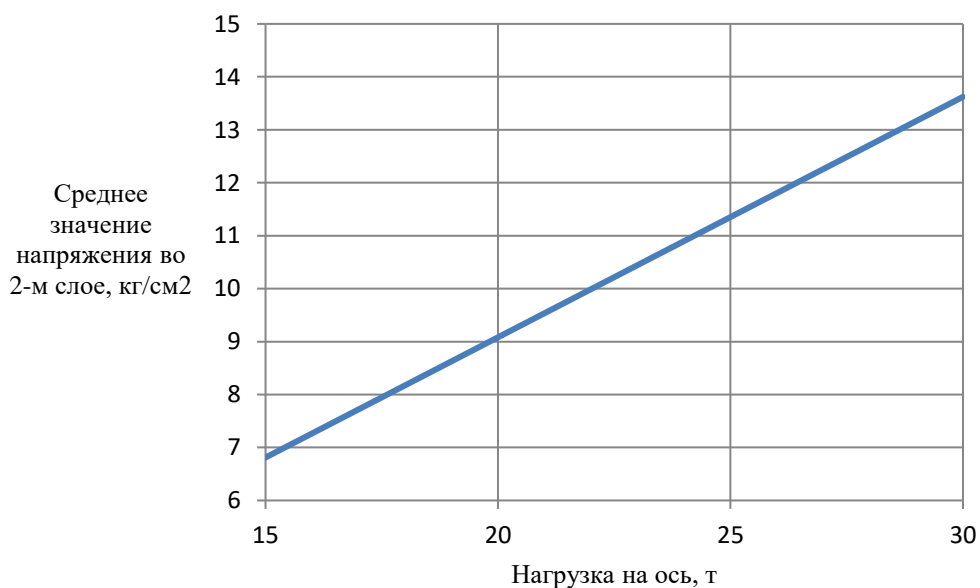


Рисунок 3.23 – График зависимости среднего значения напряжений во 2-м слое конструкции $\langle \sigma_2 \rangle$ от нагрузки на ось

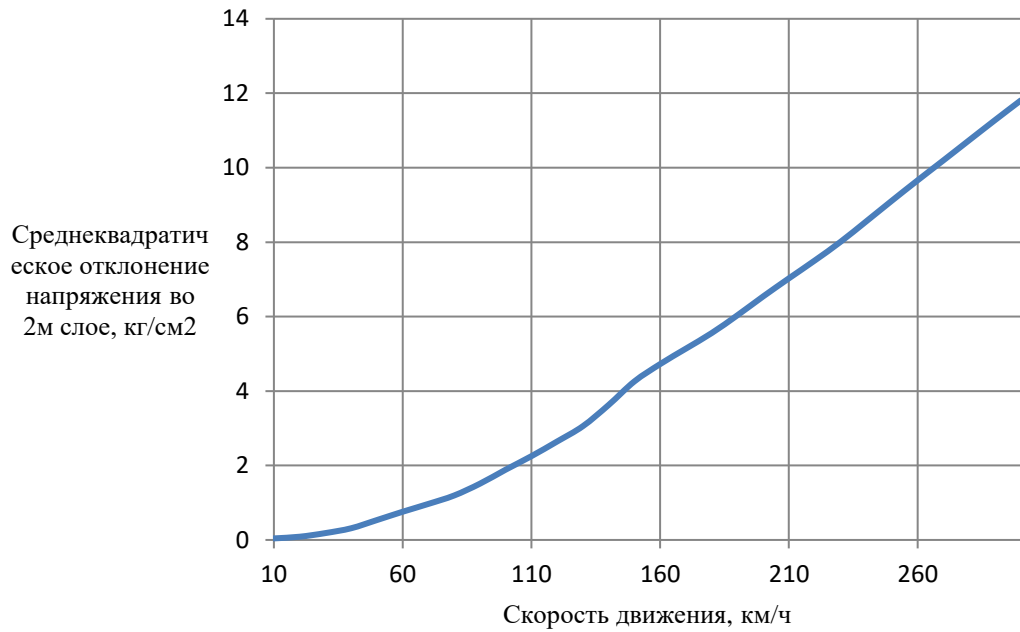


Рисунок 3.24 – График зависимости среднеквадратического отклонения напряжения во 2-м слое конструкции σ_{σ_2} от скорости движения

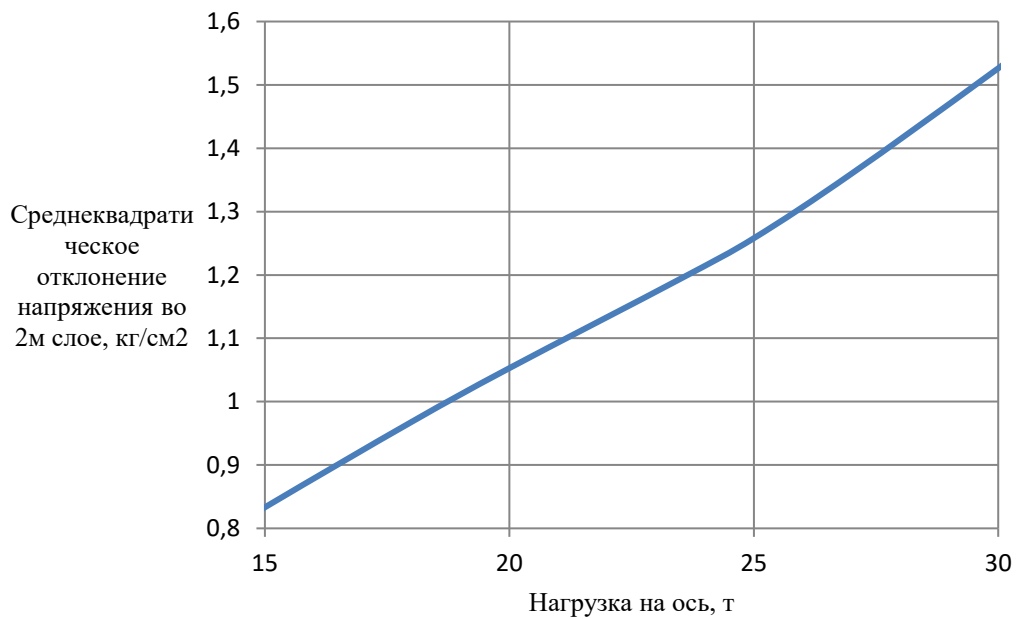


Рисунок 3.25 – График зависимости среднеквадратического отклонения напряжения во 2-м слое конструкции σ_{σ_2} от нагрузки на ось

Исходя из ограничений на максимально допустимые значения напряжений в слоях безбалластной конструкции пути, могут быть получены предельно допустимые значения для толщины ее слоев. «Трещиностойкость железобетонных элементов, материал которых испытывает осевое или двухосное растяжение, определяется длительной прочностью» [73]:

$$\sigma_{max} < \sigma_3, \quad (3.7)$$

где σ_{max} – максимальные напряжения, возникающие в слое БКП;

σ_3 – допустимое значение напряжения в слое БКП.

Превышение значения напряжения на нижней стороне слоя допустимого, ведет к росту количества трещин, их длины и раскрытия, что, в свою очередь, приводит к ускоренному износу и деградации конструкции. «Согласно опытным данным строительства дорог и аэродромов в качестве максимально допустимых напряжений возможно принять для ГСНС – 0,8 Н/мм², а для бетонной несущей плиты сплошного армирования – 1,8 Н/мм²» [73].

В свою очередь, σ_{max} может быть рассчитано по формуле:

$$\sigma_{max} = \langle \sigma_i \rangle + z * \sigma_{\sigma_i},$$

где $\langle \sigma_i \rangle$ – среднее значение напряжения в i -м слое безбалластной конструкции пути;

σ_{σ_i} – среднеквадратическое отклонение напряжения в i -м слое безбалластной конструкции пути;

z – коэффициент, отвечающей за вероятность выхода значения напряжения за критическую границу, принимаем $z = 3$, что соответствует вероятности 0,3%.

Результаты исследований [73] показали, что изменение толщины 3-го слоя безбалластной конструкции не оказывает значительного влияния на уменьшение усилий на его нижней стороне, однако уменьшает напряжения на нижней стороне бетонной несущей плиты. В настоящей работе были проведены расчеты зависимости средних значений и среднеквадратических отклонений прогибов и напряжений во втором слое БКП в зависимости от толщины ГСНС с использованием модели колебаний пути, как трехслойной балки. Их результаты представлены на рисунках 3.26-3.29. График зависимости максимального значения напряжения σ_{max} во втором слое БКП от толщины 3-го слоя представлен на рисунке 3.30.

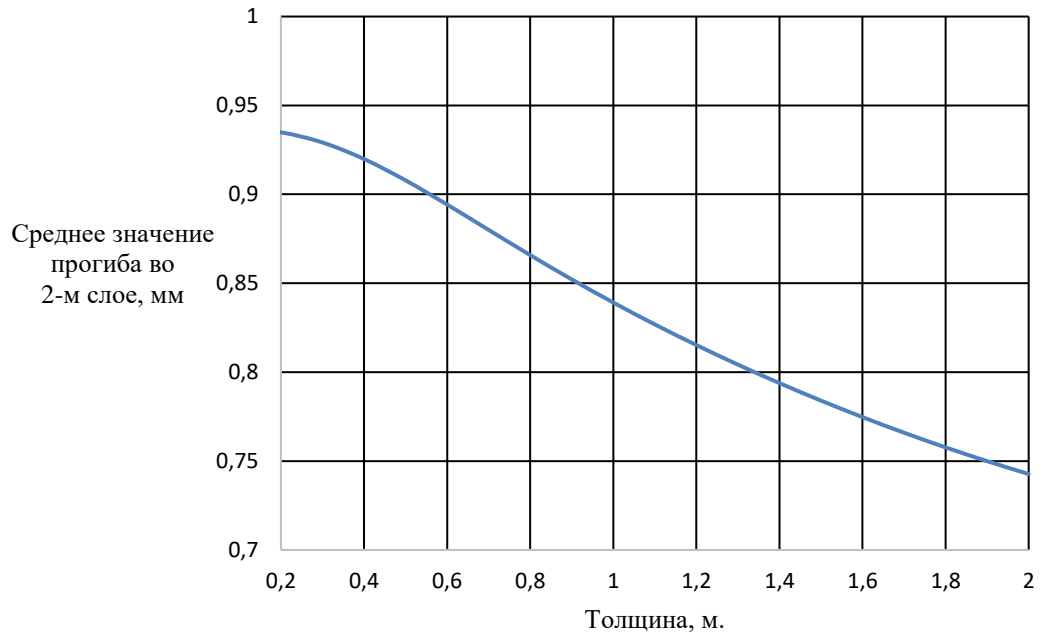


Рисунок 3.26 – График зависимости среднего значения прогиба 2-го слоя конструкции $\langle z_2 \rangle$ от толщины 3-го слоя

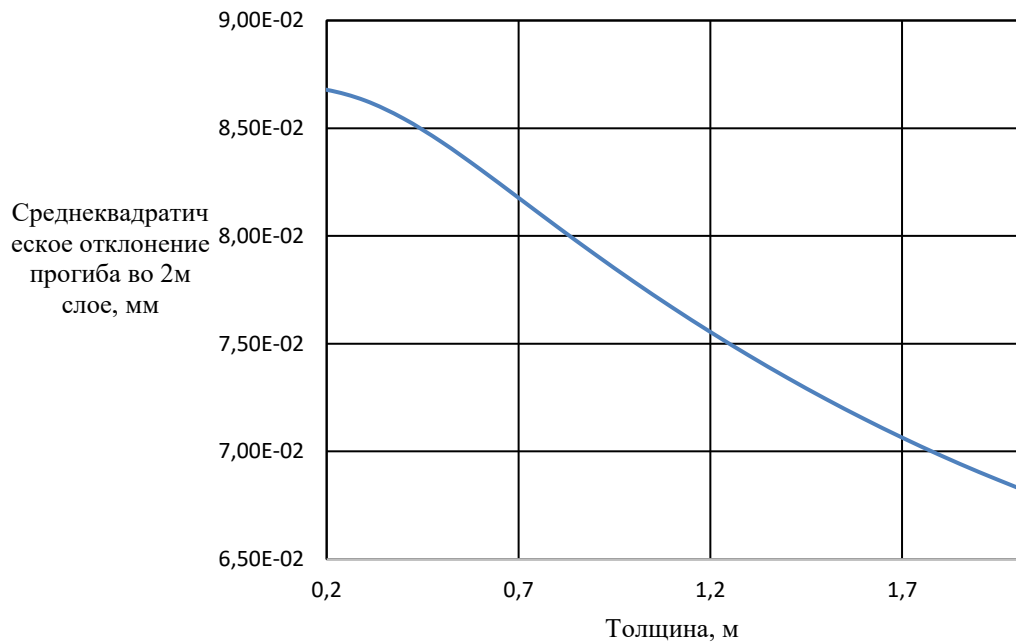


Рисунок 3.27 – График зависимости среднеквадратического отклонения прогиба 2-го слоя конструкции σ_{z_2} от толщины 3-го слоя

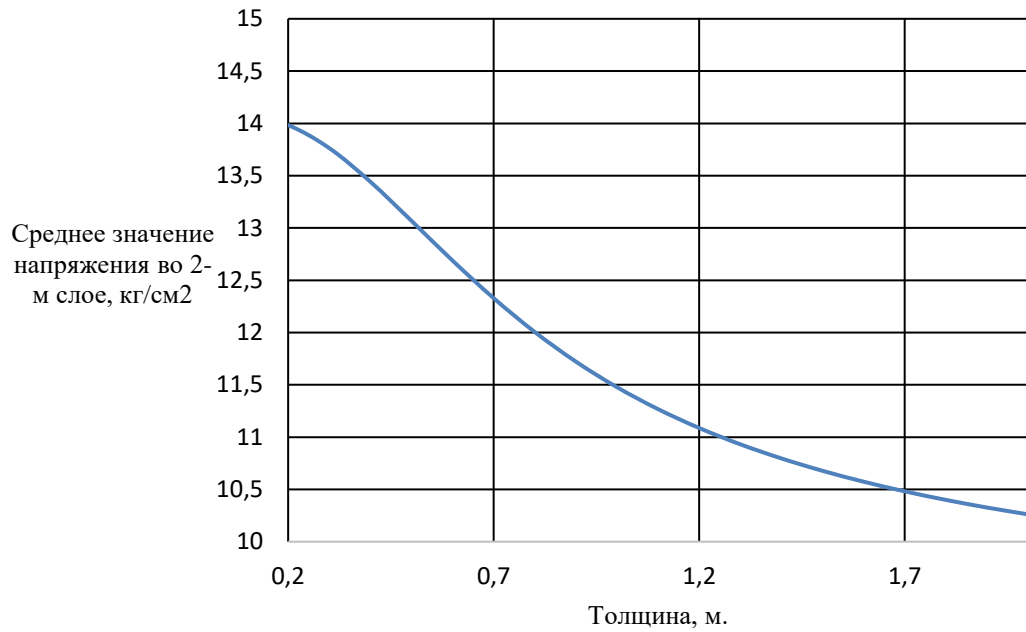


Рисунок 3.28 – График зависимости среднего значения напряжений во 2-м слое конструкции $\langle \sigma_2 \rangle$ от толщины 3-го слоя

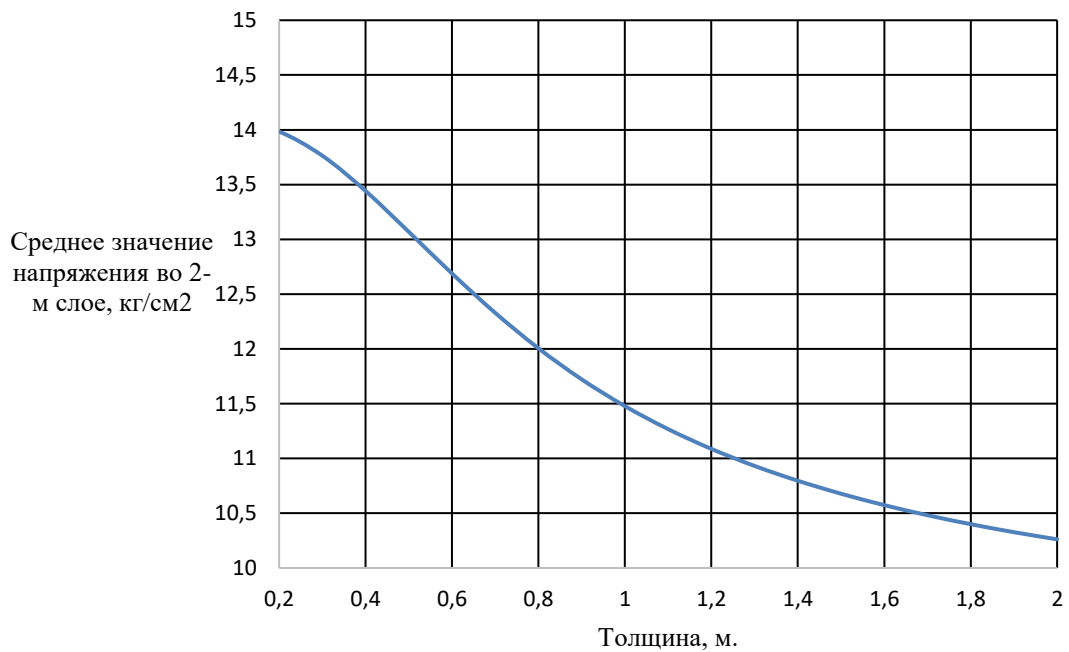


Рисунок 3.29 – График зависимости среднеквадратического отклонения напряжения во 2-м слое конструкции σ_{σ_2} от толщины 3-го слоя

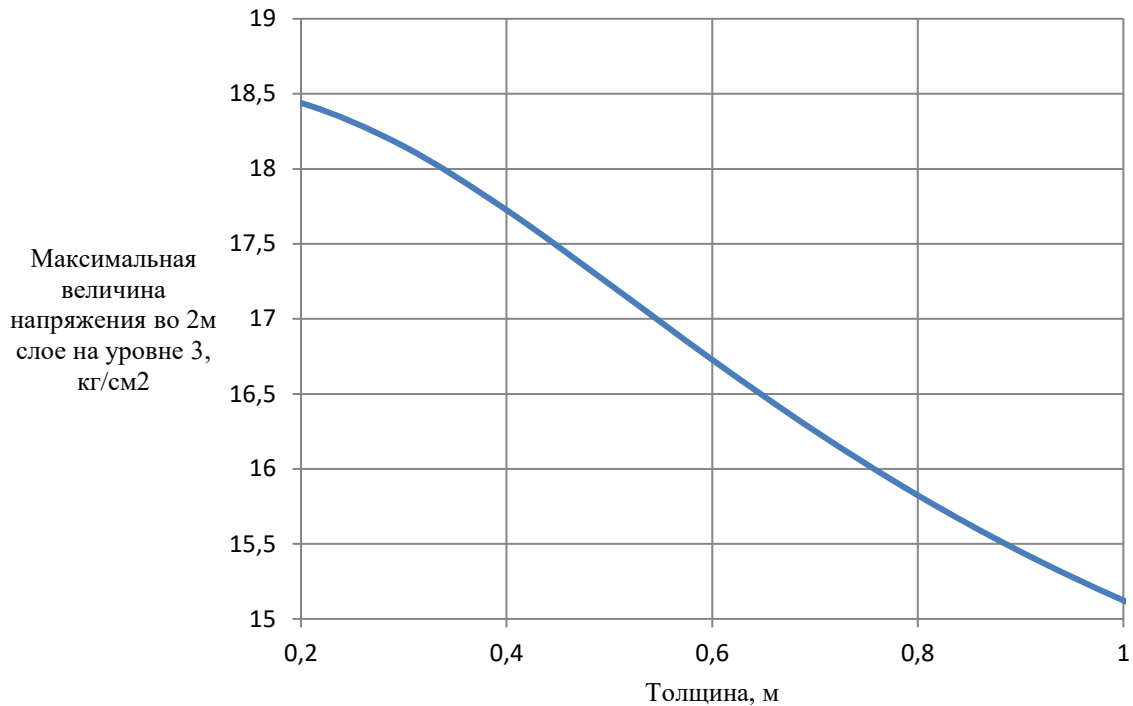


Рисунок 3.30 – График зависимости максимального напряжения во 2-м слое конструкции σ_{σ_2} от толщины 3-го слоя

Таким образом, целесообразно рекомендовать толщину 3-го слоя БКП более 0,3м в ГОСТ Р «Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий» (приложение В). Результаты данных расчетов и аналогичных расчетов максимальных напряжений, возникающих в слоях безбалластной конструкции пути могут быть использованы в качестве обоснования нормативных значений толщины слоев безбалластной конструкции пути.

3.5. Результаты расчетов, выполненных при помощи модели расчета на прочность безбалластного пути, предложенной Й. Айзенманом, Г. Лейкауфом

Для расчета прогибов и напряжений в слоях безбалластной конструкции пути может быть использован метод, предложенный в работе Й. Айзенмана и Г. Лейкауфа [118] и описанный в разделе 1.3. В качестве примера приведем расчет прогиба рельса.

Согласно модели, прогиб рельса y находится по формуле:

$$y = \frac{a}{2cL} \sum (Q_i \cdot \eta_i), \quad (3.8)$$

где $L = \left[\frac{4EIa}{c} \right]^{0,25}$, $\eta_i = \frac{\sin \xi_i + \cos \xi_i}{e^{\xi_i}}$, $\xi_i = \frac{x_i}{L}$.

В качестве исходных данных для расчета были использованы следующие значения (таблица 3.5):

Таблица 3.5 – Исходные данные для расчета прогиба рельса

Параметр	Обозначение	Значение
Модуль упругости рельса, Н/мм ²	E	$2,1 \cdot 10^5$
Момент инерции рельса, мм ⁴	I	$3,55 \cdot 10^7$
Расстояние между опорными точками, мм	a	650
Сила, действующая на колесо, Н	Q	$9 \cdot 10^5$

Для нахождения жесткости скрепления c воспользуемся следующим соотношением [139]:

$$c = \frac{c_{пр} \cdot c_{эл}(T)}{c_{пр} + c_{эл}(T)}, \quad (3.9)$$

где $c_{пр}$ – жесткость подрельсовой прокладки;

$c_{эл}$ – жесткость эластичной прокладки.

В мировой практике строительства линий высокоскоростного движения на безбалластном полотне наиболее широкое применение получили рельсовые скрепления с эластичной прокладкой жёсткостью $c_{эл} = 2,25 \cdot 10^4$ Н/мм [139]. Жесткость подрельсовой прокладки принимаем равной $c_{пр} = 5 \cdot 10^5$ Н/мм.

Согласно результатам расчетов [139] значение статической жёсткости узла скрепления при температуре $T = +23^\circ\text{C}$ составляет $2,152 \cdot 10^4$ Н/мм.

Подставляя данные значения в формулу (3.8) найдем значения прогиба рельса $y = 1,5$ мм.

На рисунках 3.31 – 3.33 представлена зависимость прогиба рельса от жесткости узла скрепления для безбалластной конструкции пути при различных значениях расстояния между опорными точками (650 мм, 592 мм, 543 мм) при скорости движения 300 км/ч и нагрузке на ось 18 т.

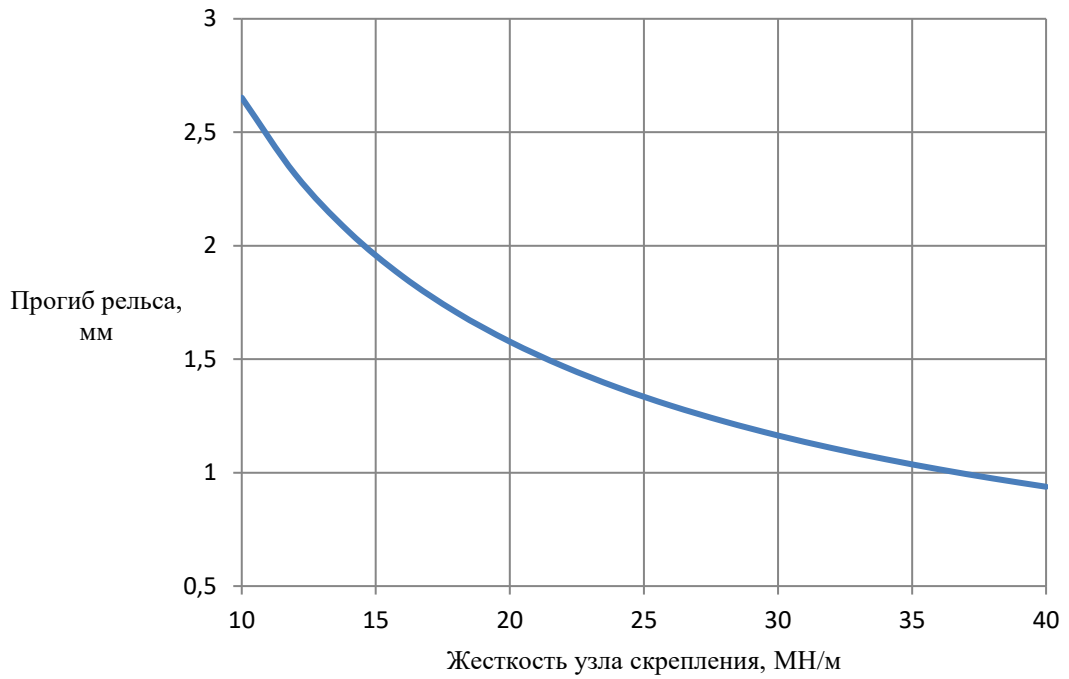


Рисунок 3.31 – График зависимости прогиба рельса u от жесткости узла крепления при расстоянии между опорными точками 650 мм

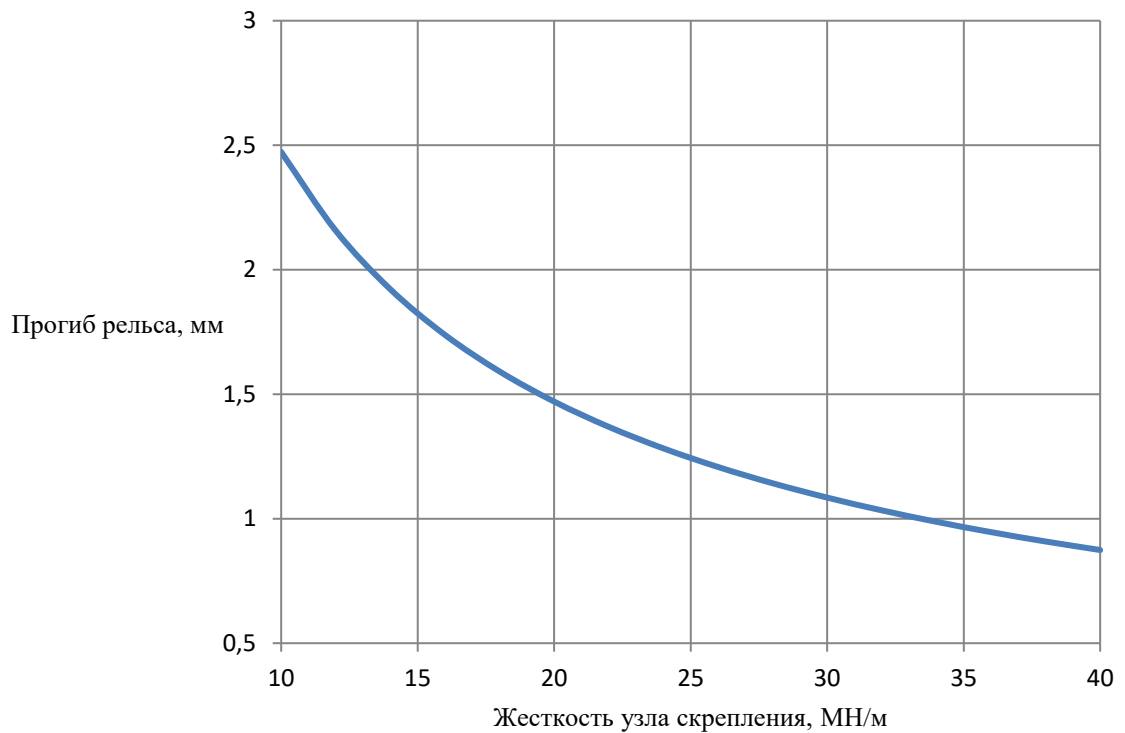


Рисунок 3.32 – График зависимости прогиба рельса u от жесткости узла крепления при расстоянии между опорными точками 592 мм

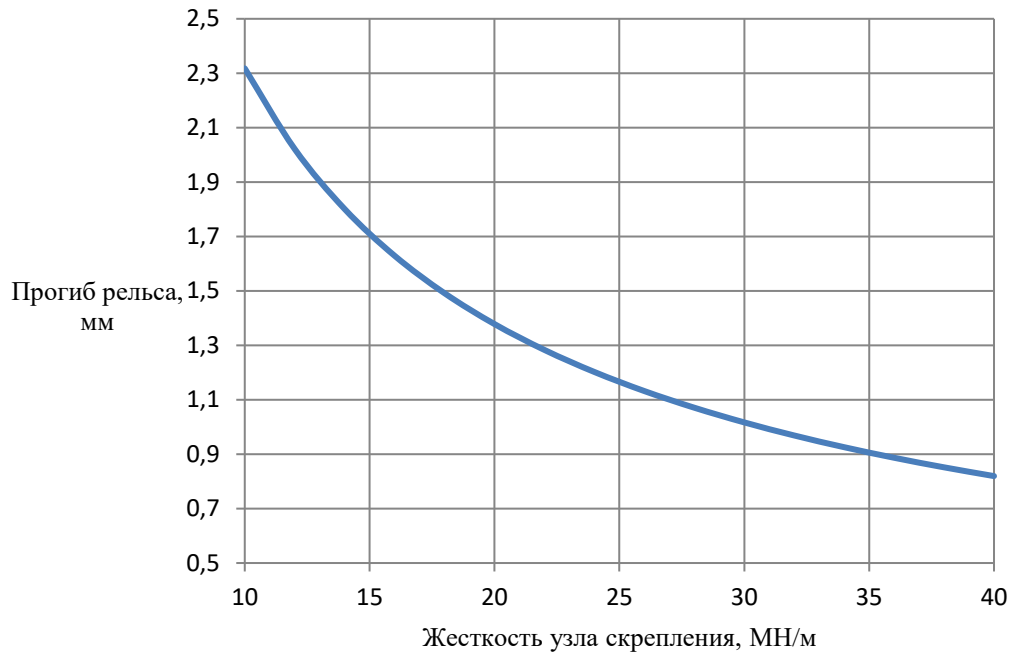


Рисунок 3.33 – График зависимости прогиба рельса u от жесткости узла крепления при расстоянии между опорными точками 543 мм

Исходя из рекомендуемого диапазона значений величины прогибов рельса, могут быть получены допустимые значения для жесткости креплений. Так, для обеспечения плавного хода колесной пары рекомендуемая величина прогиба рельса должна составлять не менее 1,2 мм [140]. С другой стороны, исходя из прочностных характеристик упругих клемм и их предела усталости, верхний порог прогиба рельса предлагается ограничить значением 2 мм. Таким образом, целесообразно рекомендовать величину жесткости в диапазоне 16-27 МН/м. Результаты данных расчетов были использованы при формировании предложений по внесению дополнений в ГОСТ 32698-2014 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля» в части раздела об упругих характеристиках узла крепления для безбалластных конструкций пути (приложение Г), а также при разработке нового типа рельсового крепления (заявки на патент № 2022112623, 2022112624, 2022112625, 2022112626, 2022112627 от 11.05.2022) (приложение Д).

3.6. Сравнение результатов расчетов и натуральных испытаний

Используя полученные оценки значений констант U_i, f_i и представленные на рисунках (3.3)–(3.14) частотные характеристики по формулам (3.1), (3.4) найдем средние значения прогибов и напряжений в слоях конструкции. В таблице 3.6 приводятся результаты расчета и измерений на Экспериментальном кольце прогибов слоев безбалластного пути как многослойной балки и напряжений в слоях для скорости 80 км/ч и нагрузки на ось 23,5 т.

Из таблицы 3.6 видно, что расчетные и экспериментальные данные хорошо корреспондируются между собой. Проверив адекватность математической модели на безбалластном пути, испытанном на Экспериментальном кольце, можно прогнозировать значения прогибов и напряжений при различных скоростях движения и нагрузках на ось. Результаты расчета прогибов и напряжений в слоях безбалластного пути для перспективных условий ВСМ при скорости движения 300 км/ч и нагрузке на ось 18 т приведены в таблице 3.7. Аналогичные результаты для тяжеловесного движения при скорости движения 60 км/ч и нагрузке на ось 27 т приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.6 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных по прогибам и напряжениям в слоях безбалластной конструкции при скорости движения 80 км/ч и нагрузке на ось 23,5 т

	Номер слоя	1 слой – рельс	2 слой – бетон	3 слой – тощий бетон
Значение прогибов, мм	Измеренное	3,1	1,5	0,7
	Расчетное	3,1	1,2	0,6
Значение напряжений, кгс/см ²	Измеренное	920	12,8	3,1
	Расчетное	820	10,7	2,7
	Критическое	2000	18	8

Таблица 3.7 – Расчетные значения прогибов и напряжений в слоях безбалластной конструкции при скорости движения 300 км/ч и нагрузке на ось 18 т

Номер слоя	1 слой – рельс	2 слой – бетон	3 слой – тощий бетон
Расчетное значение прогиба под нагрузкой, мм	1,8	0,9	0,4
Расчетное значение напряжения под нагрузкой, кгс/см ²	640	8,4	2,4

Таблица 3.8 – Расчетные значения прогибов и напряжений в слоях безбалластной конструкции при скорости движения 60 км/ч и нагрузке на ось 27 т

Номер слоя	1 слой – рельс	2 слой – бетон	3 слой – тощий бетон
Расчетное значение прогиба под нагрузкой, мм	3,5	1,35	0,7
Расчетное значение напряжения под нагрузкой, кгс/см ²	960	12,7	3,3

Выводы к главе 3

1) Приведены оценки средних значений и среднеквадратических отклонений прогибов и напряжений, возникающих в несущей бетонной плите безбалластной конструкции. При скорости движения 80 км/ч и нагрузке на ось 23,5 т. расчетные значения прогибов в слоях БКП составляют 3.1 мм, 1.2 мм и 0.6 мм соответственно, расчетные значения напряжений – 820 кгс/см², 10.7 кгс/см², 2.7кгс/см². Разница с результатами натуральных экспериментов не превышает 20%.

2) Представленный метод может быть использован для нахождения средних значений и среднеквадратических отклонений процессов, определяющих напряженно-деформированного состояния всех слоев конструкции.

3) Результаты расчетов верифицированы путем их сравнения с результатами измерений напряжений и вертикальных прогибов слоев безбалластного пути, полученными в ходе натуральных испытаний конструкции. Сходимость значений напряжений и прогибов с экспериментальными данными для различных конструкций безбалластного пути на Экспериментальном кольце подтверждает адекватность предложенной математической модели. Так, расхождение расчетов и натуральных данных для различных слоев безбалластной конструкции пути не превышает 20%, расхождения в результатах расчетов прогиба рельса с моделью, предложенной Й. Айзенманом, Г. Лейкауфом – порядка 10%.

4) Расчетные значения напряжений и прогибов несущей бетонной плиты, подтвержденные натурными испытаниями на Экспериментальном кольце, оказались на 30% меньше допустимых значений, что свидетельствует о

возможности применения безбалластного пути, в том числе в сфере грузового и высокоскоростного движения.

4. РАСЧЕТ СРОКА СЛУЖБЫ БЕЗБАЛЛАСТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ

В настоящее время безбалластные конструкции пути широко используются в мировой практике [99,141–143], при этом возникает вопрос целесообразности их применения в условиях российских железных дорог. Стоимость строительства безбалластного пути существенно превышает аналогичный показатель для пути на балласте, однако расходы на текущее содержание, напротив, значительно ниже. В связи с этим крайне актуальным становится вопрос долговечности безбалластных конструкций – успеет ли БКП окупиться в течение своего срока службы [99]. При этом, натурные испытания безбалластных конструкций в требуемых условиях эксплуатации весьма затруднительны по причине высокой стоимости их строительства [99,100]. Существует метод, позволяющий решить данную проблему при помощи математического моделирования [42,73]. С его помощью можно оценить срок службы безбалластной конструкции пути на линии с учетом характерных условий эксплуатации по результатам натурных экспериментов, проведенных на опытном полигоне [42,73]. Основные этапы данного метода представлены на рисунке 4.1.

На первом этапе определяются параметры слоев безбалластной конструкции пути (распределенная приведенная масса слоя, модуль упругости, момент инерции, приведенный модуль упругости основания слоя при вертикальном изгибе, распределенное приведенное демпфирование), после чего проводится расчет частотных характеристик прогибов и напряжений в слоях конструкции пути с применением модели колебаний пути, как трехслойной балки [34,42], выбор которой обусловлен необходимостью проведения расчета для 2-го слоя БКП, в котором происходят основные разрушения конструкции [99,100]. При помощи программы «Взаимодействие экипажа и пути» (ВЭИП) [43] рассчитывается матрица взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь S_Q , используемая для расчета средних значений и дисперсий прогибов и напряжений в слоях БКП, при помощи которых

дается оценка срока ее службы. Однако, применение программы ВЭИП при проведении данных расчетов является недостаточно строгим, поскольку в ее алгоритме заложена модель колебаний пути, как однослойной балки [43,133,134]. Вместо этого, для нахождения точного значения матрицы S_Q , предлагается дополнить данный метод тремя этапами: нахождение матрицы спектральных плотностей неровностей пути, нахождение частотной матрицы прогибов для модели трехслойной балки и нахождение частотной матрицы зависимости перемещений масс от вертикальных сил, действующих на путь. Способ их расчета, а также определения с их помощью матрицы S_Q описаны в главе 2.

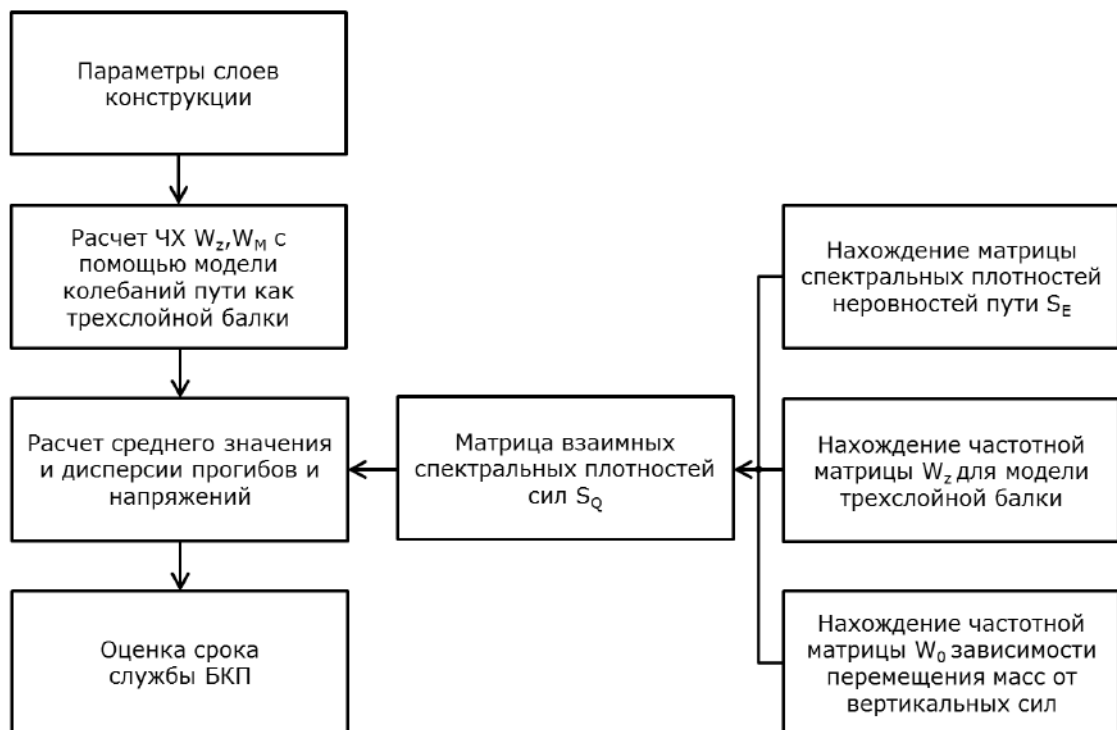


Рисунок 4.1 – Метод расчета срока службы БКП с использованием однослойной и трехслойной моделей

Исследования сфер применения безбалластного пути показали, что наибольший экономический эффект достигается при его использовании на эстакадах при грузовом движении, однако условный дисконтированный доход в конце срока службы БКП превышает аналогичный показатель для традиционного пути на балласте также при совмещенном и скоростном движении, как для БКП на эстакадах и в тоннелях, так и для БКП на земляном полотне [73, 99]. Это

делает актуальным применение безбалластных конструкций пути в следующих условиях:

- высокие осевые нагрузки;
- высокие скорости движения;
- тяжеловесное движение;
- высокая провозная способность;
- затруднительность обслуживания железнодорожного пути.

В связи с этим, целесообразно проведение расчетов для данных условий, а также оценка расхождения в результатах расчетов, полученных при помощи однослойной и трехслойной моделей.

В настоящей главе приводятся результаты расчетов показателей повреждаемости и срока службы БКП с использованием однослойной и трехслойной моделей, их сравнение, а также графики зависимости срока службы безбалластной конструкции в различных условиях эксплуатации.

4.1. Метод расчета срока службы безбалластного пути

В основе метода расчета срока службы безбалластной конструкции пути на действующей линии по результатам испытаний на опытном полигоне лежит следующая формула [42,73]:

$$T_1 = T_0 \cdot \frac{D_0}{D_1} \cdot \frac{\langle P_1 \rangle}{\langle P_0 \rangle} \cdot K_t, \quad (4.1)$$

где T_1 – расчетный тоннаж брутто, пропущенный на действующей линии до исчерпания ресурса;

T_0 – тоннаж брутто, пропущенный по опытному участку до исчерпания ресурса, определяется по результатам натурных испытаний;

$\langle P_1 \rangle$ – средняя осевая нагрузка на действующей линии;

$\langle P_0 \rangle$ – средняя осевая нагрузка на опытном участке;

K_t – коэффициент влияния климата, характеризующий увеличение интенсивности расстройств пути в период оттаивания весной и замерзания осенью;

D_1 – показатель повреждаемости на действующей линии, рассчитывается с учетом планируемых условий эксплуатации;

D_0 – показатель повреждаемости на опытном участке, рассчитывается по результатам натуральных экспериментов.

При этом, «долговечность безбалластной конструкции пути определяется интенсивностью повреждаемости второго слоя, зависящей от среднего квадрата напряжений растяжения в подрельсовой зоне нижней грани этого слоя при прохождении осей подвижного состава» [42]. В результате, D_0, D_1 рассчитываются следующим образом:

$$D = (\langle \sigma_2 \rangle^2 + \sigma_{\sigma_2}^2)^{k/2}, \quad (4.2)$$

где $\langle \sigma_2 \rangle$ – среднее значение напряжений во втором слое;

σ_{σ_2} – среднеквадратическое отклонение напряжений во втором слое;

k – эмпирический коэффициент, $k=6$ [42].

4.2. Модель колебаний рельса, как однослойной балки, лежащей на упругом основании

Отличие в результатах расчетов матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь, между однослойной и трехслойной моделями, заключается в различном подходе к определению частотой матрицы прогибов первого слоя конструкции пути $W_{z_1}(i\omega)$. Способ расчета частотной матрицы $W_{z_1}(i\omega)$ для трехслойной модели приводится в главе 2, в данном разделе представлены расчеты для случая однослойной модели.

«Колебания рельса как однослойной балки бесконечной длины, лежащей на

модифицированном упругом основании Винклера, под действием неподвижной, изменяющейся во времени силы описываются следующим дифференциальным уравнением в частных производных» [3]:

$$EI_y^0 \frac{\partial^4 z_p^0}{\partial x^4} + N^0 \frac{\partial^2 z_p^0}{\partial x^2} + m_z^0 \frac{\partial^2 z_p^0}{\partial t^2} + f_z^0 \frac{\partial z_p^0}{\partial t} + U_z^0 z_p^0 = 0, \quad (4.3)$$

где E – модуль упругости рельсовой стали;

I_y^0 – момент инерции рельса относительно главной поперечной горизонтальной оси y ;

z_p^0 – вертикальный прогиб рельса;

x – абсцисса текущего сечения рельса, отсчитываемая от начала неподвижной системы координат;

t – время;

N^0 – продольная сила в рельсе;

m_z^0 – распределенная по длине приведенная масса рельса и основания при вертикальных колебаниях пути;

f_z^0 – распределенное по длине демпфирование пути при вертикальных колебаниях;

U_z^0 – модуль упругости подрельсового основания в вертикальной плоскости.

«Уравнение справедливо везде, кроме точки приложения силы $Q(t)$, где терпит разрыв третья производная от вертикального прогиба рельса по координате x » [3].

Делая замену $u = x - vt$, где u – абсцисса текущего сечения рельса, отсчитываемая от подвижного начала координат, совмещенного с движущейся силой, получаем [35,36]:

$$\frac{\partial z_p^0}{\partial u} = \frac{\partial z_p^0}{\partial x}, \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial z_p^0}{\partial t} = \left[\frac{\partial z_p^0}{\partial t} \right] + \frac{\partial z_p^0}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} = \left[\frac{\partial z_p^0}{\partial t} \right] - v \frac{\partial z_p^0}{\partial u}, \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial^2 z_p^0}{\partial t^2} = \left[\frac{\partial^2 z_p^0}{\partial t^2} \right] - 2v \frac{\partial \left[\frac{\partial z_p^0}{\partial t} \right]}{\partial u} + v^2 \frac{\partial^2 z_p^0}{\partial u^2}, \quad (4.6)$$

где $\left[\frac{\partial z_p^0}{\partial t} \right]$ – абсолютная частная производная по времени;

$$z_p^0 = z_p^0(u, t).$$

Тогда уравнение (4.3) принимает вид:

$$EI_y^0 \frac{\partial^4 z_p^0}{\partial u^4} + N^0 \frac{\partial^2 z_p^0}{\partial u^2} + m_z^0 \left(\left[\frac{\partial^2 z_p^0}{\partial t^2} \right] - 2v \frac{\partial \left[\frac{\partial z_p^0}{\partial t} \right]}{\partial u} + v^2 \frac{\partial^2 z_p^0}{\partial u^2} \right) + f_z^0 \left(\left[\frac{\partial z_p^0}{\partial t} \right] - v \frac{\partial z_p^0}{\partial u} \right) + U_z^0 z_p^0 = 0 \quad (4.7)$$

Решение уравнения (4.7) будем искать в виде [35]:

$$z_p^0 = \psi(u, i\omega) e^{i\omega t}, \quad (4.8)$$

где ω – частота колебаний.

Подставив выражение (4.8) в уравнение (4.7), после сокращения всех членов на величину $EI_y^0 e^{i\omega t}$ получим следующее обыкновенное дифференциальное уравнение с комплексными коэффициентами, определяющее функцию $\psi(u, i\omega)$:

$$\psi^{IV} + \frac{N^0 + m_z^0 \omega^2}{EI_y^0} \psi'' - \left(\frac{f_z^0 v}{EI_y^0} + \frac{2m_z^0 v \omega}{EI_y^0} i \right) \psi' + \left(\frac{U_z^0 - m_z^0 \omega^2}{EI_y^0} + \frac{f_z^0 \omega}{EI_y^0} i \right) \psi = 0 \quad (4.9)$$

Его характеристическое уравнение имеет вид:

$$r^4 + \frac{N^0 + m_z^0 \omega^2}{EI_y^0} r^2 - \left(\frac{f_z^0 v}{EI_y^0} + \frac{2m_z^0 v \omega}{EI_y^0} i \right) r + \frac{U_z^0 - m_z^0 \omega^2}{EI_y^0} + \frac{f_z^0 \omega}{EI_y^0} i = 0. \quad (4.10)$$

Таким образом, по основной теореме алгебры [144] уравнение (4.10) имеет четыре комплексных корня:

$$r_j = \alpha_j + i\beta_j, j = \overline{1,4}. \quad (4.11)$$

Тогда решение уравнения (4.10) представляется в виде:

$$\psi(u, i\omega) = \sum_{j=1}^4 C_j e^{r_j u}, \quad (4.12)$$

где C_j – постоянные величины.

Подставив найденное решение в соотношение (4.9), получим следующее

выражение для функции $z_p^0(u, t)$ при частоте ω :

$$z_p^0(u, t) = \sum_{j=1}^4 C_j e^{r_j u + i\omega t}. \quad (4.13)$$

Решения уравнения (4.7) для положительных и отрицательных значений примут вид:

$$z_{p+}^0(u, t) = \sum_{j=1}^4 C_{j+} e^{r_j u + i\omega t}, \quad (4.14)$$

$$z_{p-}^0(u, t) = \sum_{j=1}^4 C_{j-} e^{r_j u + i\omega t}. \quad (4.15)$$

Применив критерий Гурвица для уравнения (4.10), можно показать, что два корня этого уравнения имеют отрицательную вещественную часть, а два других – положительную [26].

Пусть для определенности:

$$\text{Re} r_1 \leq 0, \text{Re} r_3 \leq 0, \text{Re} r_2 \geq 0, \text{Re} r_4 \geq 0. \quad (4.16)$$

С учетом граничных условий на бесконечности:

$$z_p^0(u, t) \Big|_{u \rightarrow +\infty} = z_p^0(u, t) \Big|_{u \rightarrow -\infty} = 0, \quad (4.17)$$

решения уравнений (4.14) и (4.15) примут вид:

$$z_{p+}^0(u, t) = (C_{1+} e^{r_1 u} + C_{3+} e^{r_3 u}) e^{i\omega t}, \quad (4.18)$$

$$z_{p-}^0(u, t) = (C_{2-} e^{r_2 u} + C_{4-} e^{r_4 u}) e^{i\omega t}, \quad (4.19)$$

или, делая замену $C_{1+} = C_1, C_{2-} = C_2, C_{3+} = C_3, C_{4-} = C_4$ получаем:

$$z_{p+}^0(u, t) = (C_1 e^{r_1 u} + C_3 e^{r_3 u}) e^{i\omega t}, \quad (4.20)$$

$$z_{p-}^0(u, t) = (C_2 e^{r_2 u} + C_4 e^{r_4 u}) e^{i\omega t}. \quad (4.21)$$

Таким образом, в выражениях (4.20) и (4.21) через $z_{p+}^0(u, t)$ обозначено решение, удовлетворяющее условиям задачи при $u \geq 0$, а через $z_{p-}^0(u, t)$ – решение, удовлетворяющее им при $u \leq 0$. Величины C_j ($j = \overline{1,4}$) определяются граничными условиями задачи при $u = 0$.

Так как в сечении под движущейся силой прогиб рельса, угол поворота сечения и изгибающий момент являются непрерывными функциями абсциссы u при любых значениях времени t , а поперечная сила претерпевает разрыв со скачком, равным внешней силе $Q(t)$, граничные условия для определения коэффициентов C_j будут следующими:

$$z_{p+}^0(u, t)|_{u=0} = z_{p-}^0(u, t)|_{u=0}, \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial z_{p+}^0(u, t)}{\partial u} \Big|_{u=0} = \frac{\partial z_{p-}^0(u, t)}{\partial u} \Big|_{u=0}, \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial^2 z_{p+}^0(u, t)}{\partial u^2} \Big|_{u=0} = \frac{\partial^2 z_{p-}^0(u, t)}{\partial u^2} \Big|_{u=0}, \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial^3 z_{p+}^0(u, t)}{\partial u^3} \Big|_{u=0} - \frac{\partial^3 z_{p-}^0(u, t)}{\partial u^3} \Big|_{u=0} = \frac{Q(t)}{EI_y^0}. \quad (4.25)$$

Найдем первую, вторую и третью частные производные по переменной u от выражений для прогибов $z_{p+}^0(u, t)$ и $z_{p-}^0(u, t)$:

$$\frac{\partial z_{p+}^0(u, t)}{\partial u} = (r_1 C_1 e^{r_1 u} + r_3 C_3 e^{r_3 u}) e^{i\omega t}, \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial z_{p-}^0(u, t)}{\partial u} = (r_2 C_2 e^{r_2 u} + r_4 C_4 e^{r_4 u}) e^{i\omega t}, \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial^2 z_{p+}^0(u, t)}{\partial u^2} = (r_1^2 C_1 e^{r_1 u} + r_3^2 C_3 e^{r_3 u}) e^{i\omega t}, \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial^2 z_{p-}^0(u, t)}{\partial u^2} = (r_2^2 C_2 e^{r_2 u} + r_4^2 C_4 e^{r_4 u}) e^{i\omega t}, \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial^3 z_{p+}^0(u, t)}{\partial u^3} = (r_1^3 C_1 e^{r_1 u} + r_3^3 C_3 e^{r_3 u}) e^{i\omega t}, \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial^3 z_{p-}^0(u, t)}{\partial u^3} = (r_2^3 C_2 e^{r_2 u} + r_4^3 C_4 e^{r_4 u}) e^{i\omega t}. \quad (4.31)$$

Подставляя полученные выражения функций $z_{p+}^0(u, t)$, $z_{p-}^0(u, t)$ и их частных производных по u в равенства (4.22) – (4.25) и с учетом того, что:

$$Q(t) = e^{i\omega t}, \quad (4.32)$$

получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} C_1 - C_2 + C_3 - C_4 = 0; \\ r_1 C_1 - r_2 C_2 + r_3 C_3 - r_4 C_4 = 0; \\ r_1^2 C_1 - r_2^2 C_2 + r_3^2 C_3 - r_4^2 C_4 = 0; \\ r_1^3 C_1 - r_2^3 C_2 + r_3^3 C_3 - r_4^3 C_4 = \frac{1}{EI_y^0}. \end{cases} \quad (4.33)$$

Данные уравнения могут быть записаны в матричной форме $HC = F$, где:

$$H = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 \\ r_1 & -r_2 & r_3 & -r_4 \\ r_1^2 & -r_2^2 & r_3^2 & -r_4^2 \\ r_1^3 & -r_2^3 & r_3^3 & -r_4^3 \end{pmatrix}. \quad (4.34)$$

Таким образом, вектора C и F имеют вид:

$$C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \overline{EI_y^0} \end{pmatrix}$$

Тогда:

$$C = H^{-1}F, \quad (4.35)$$

где H^{-1} – матрица, обратная матрице H .

Рассмотрим динамическую систему, на вход которой подается воздействие $Q(t)$, а на выходе выдается функция $z_p^0(u, t)$.

При воздействии $Q(t) = e^{i\omega t}$ функция на выходе в линейной системе должна определяться выражением [137]:

$$z_p^0(u, t) = W_z^Q(u, i\omega)e^{i\omega t}, \quad (4.36)$$

где $W_z^Q(u, i\omega)$ – параметрическая частотная характеристика системы.

Воспользовавшись формулами (4.20), (4.21) и (4.31) находим частотную характеристику рассматриваемой системы $W_z^Q(u, i\omega)$ в виде:

$$W_z^Q(u, i\omega) = \begin{cases} C_1 e^{r_1 u} + C_3 e^{r_3 u} & \text{при } u \geq 0; \\ C_2 e^{r_2 u} + C_4 e^{r_4 u} & \text{при } u \leq 0. \end{cases} \quad (4.37)$$

4.3. Расчет срока службы безбалластной конструкции

4.3.1. Расчет срока службы безбалластной конструкции с применением модели колебаний пути, как однослойной балки

Расчеты проведены с использованием программы «Взаимодействие экипажа и пути» для безбалластной конструкции пути с параметрами, приведенными в таблице 3.2, для различных скоростей движения и нагрузок на ось при

грузонапряженности 20 млн т. брутто/км в год, и пропущенном тоннаже на опытном полигоне 1200 млн т брутто. Коэффициент влияние климатического фактора принимался равным 1. Результаты расчетов представлены в таблицах 4.1, 4.2.

Таблица 4.1 – Результаты расчета срока службы безбалластной конструкции с помощью однослойной модели при различных скоростях движения, грузонапряженности 30 млн т брутто/км в год и нагрузке на ось 23,5 т

Скорость движения	Отношение показателей повреждаемости D_1/D_0	Пропущенный тоннаж на линии	Срок службы на линии
40	0,97	1241,48	41,38
60	0,98	1225,96	40,87
80	1,00	1200,00	40,00
100	1,05	1146,11	38,20
140	1,23	973,86	32,46
200	1,82	659,82	21,99

Таблица 4.2 – Результаты расчета срока службы безбалластной конструкции с помощью однослойной модели при различных нагрузках на ось, грузонапряженности 30 млн т брутто/км в год и скорости движения 80 км/ч

Нагрузка на ось	Отношение показателей повреждаемости D_1/D_0	Пропущенный тоннаж на линии	Срок службы на линии
18	0,34	2665,09	88,84
20	0,53	1943,85	64,80
23,5	1,00	1200,00	40,00
25	1,28	998,31	33,28
27	1,74	790,56	26,35
30	2,65	577,54	19,25

4.3.2. Расчет срока службы безбалластной конструкции с применением модели колебаний пути, как трехслойной балки. Сравнение результатов расчетов на моделях

Расчеты проведены для безбалластной конструкции пути с параметрами, приведенными в таблице 3.2, для различных скоростей движения и нагрузок на ось при грузонапряженности 20 млн т. брутто/км в год, и пропущенном тоннаже на опытном полигоне 1200 млн т брутто. Коэффициент влияние климатического фактора принимался равным 1. Результаты расчетов представлены в таблицах 4.3, 4.4.

Таблица 4.3 – Результаты расчета срока службы безбалластной конструкции с помощью трехслойной модели при различных скоростях движения, грузонапряженности 30 млн т брутто/км в год и нагрузке на ось 23,5 т

Скорость движения	Отношение показателей повреждаемости D_1/D_0	Пропущенный тоннаж на линии	Срок службы на линии
40	0,96	1253,64	41,79
60	0,97	1238,64	41,29
80	1,00	1200,00	40,00
100	1,03	1165,73	38,86
140	1,20	1004,17	33,47
200	1,78	673,95	22,47

Таблица 4.4 – Результаты расчета срока службы безбалластной конструкции с помощью трехслойной модели при различных нагрузках на ось, грузонапряженности 30 млн т брутто/км в год и скорости движения 80 км/ч

Нагрузка на ось	Отношение показателей повреждаемости D_1/D_0	Пропущенный тоннаж на линии	Срок службы на линии
18	0,34	2686,83	89,56
20	0,52	1962,36	65,41
23,5	1,00	1200,00	40,00
25	1,26	1011,42	33,71
27	1,72	802,50	26,75
30	2,61	587,85	19,60

Сравнение зависимости отношения показателей повреждаемости на опытном полигоне и действующей линии D_1/D_0 , рассчитанного при помощи однослойной и трехслойной моделей от скорости движения и нагрузки на ось представлены на рисунках 4.2, 4.3.

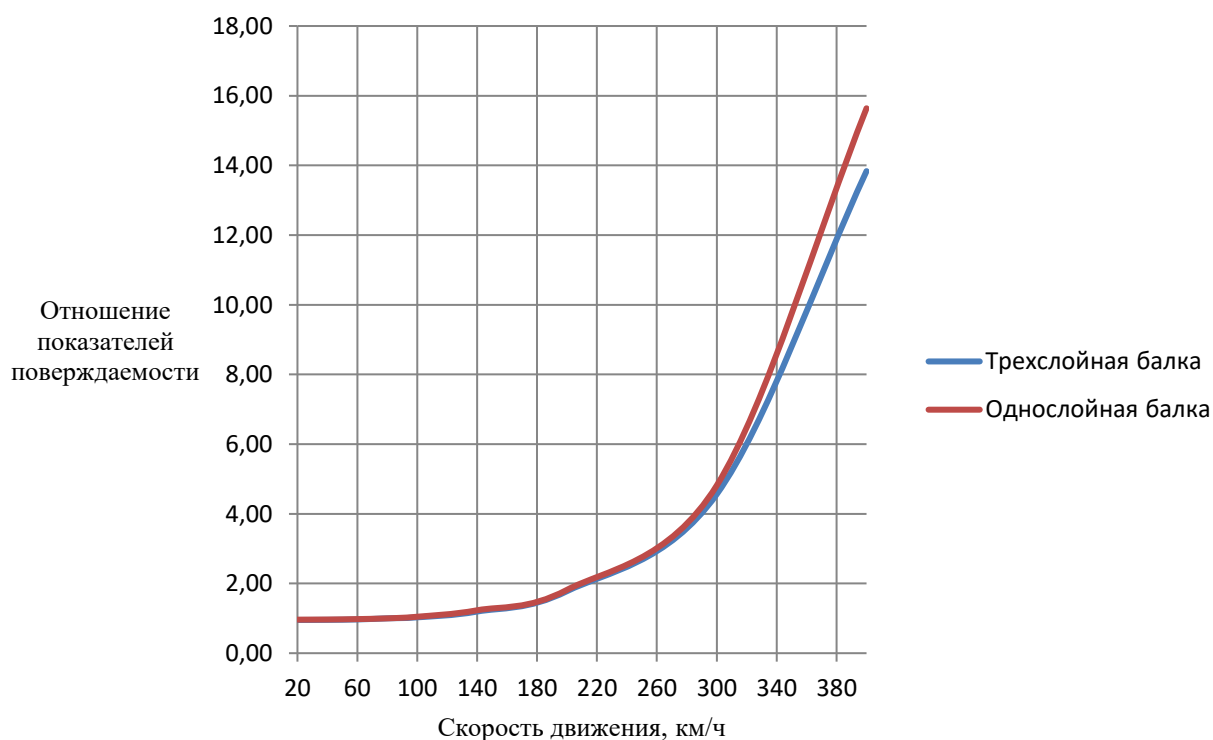


Рисунок 4.2 – Зависимость отношения показателей повреждаемости на опытном полигоне и действующей линии от скорости движения при нагрузке на ось 23,5 т

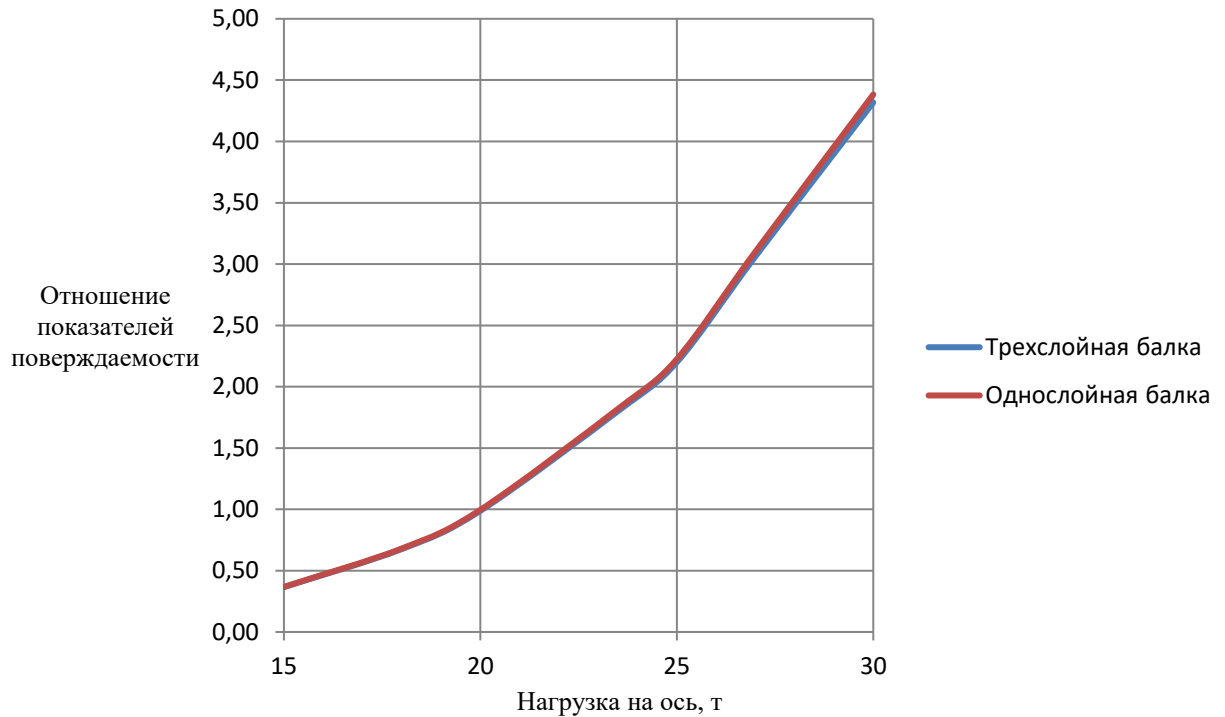


Рисунок 4.3 – Зависимость отношения показателей повреждаемости на опытном полигоне и действующей линии от нагрузки на ось при скорости движения 200 км/ч

Сравнение результатов расчета срока службы безбалластной конструкции с применением однослойной и трехслойной моделей в различных условиях эксплуатации приведены в таблице 4.5. Параметры вагона, а также спектральные плотности неровностей пути $S_{\xi}(\omega)$, использованные для расчета, приводятся в [34].

Таблица 4.5 – Сравнение результатов расчета срока службы безбалластной конструкции с применением однослойной и трехслойной моделей в различных условиях эксплуатации

Условия эксплуатации	Скорость движения, км/ч	80	200	140	400
	Осевая нагрузка т/ось	23,5	18	27	23,5
	Грузонапряженность, млн т брутто/год	30	30	30	5
Срок службы БКП, лет	Однослойная модель	40	45	20	15
	Трехслойная модель	40	46	22	20
	Разница в результатах расчета	0%	2%	10%	31%

Таким образом, можно сделать вывод о росте расхождения в результатах расчетов с увеличением скоростей движения и нагрузок на ось между

однослойной и трехслойной моделями. Данный фактор, наряду с невысокими трудозатратами на текущее содержание безбалластного пути и экономической целесообразности его использования для грузового, совмещенного, скоростного и высокоскоростного движения делает актуальным использование метода расчета срока службы БКП с использованием трехслойной модели. Его применение позволит избежать возникновения значительных погрешностей при проведении расчетов для условий эксплуатации, характерных для высокоскоростного и тяжеловесного движения, а также для возможных в перспективе условий скоростного движения поездов с повышенной нагрузкой на ось.

Воспользовавшись результатами, полученными при помощи модели колебаний пути, как трехслойной балки, построим графики зависимостей расчетного значения срока службы безбалластных конструкций от скорости движения, осевой нагрузки и грузонапряженности (рисунок 4.4–4.6).

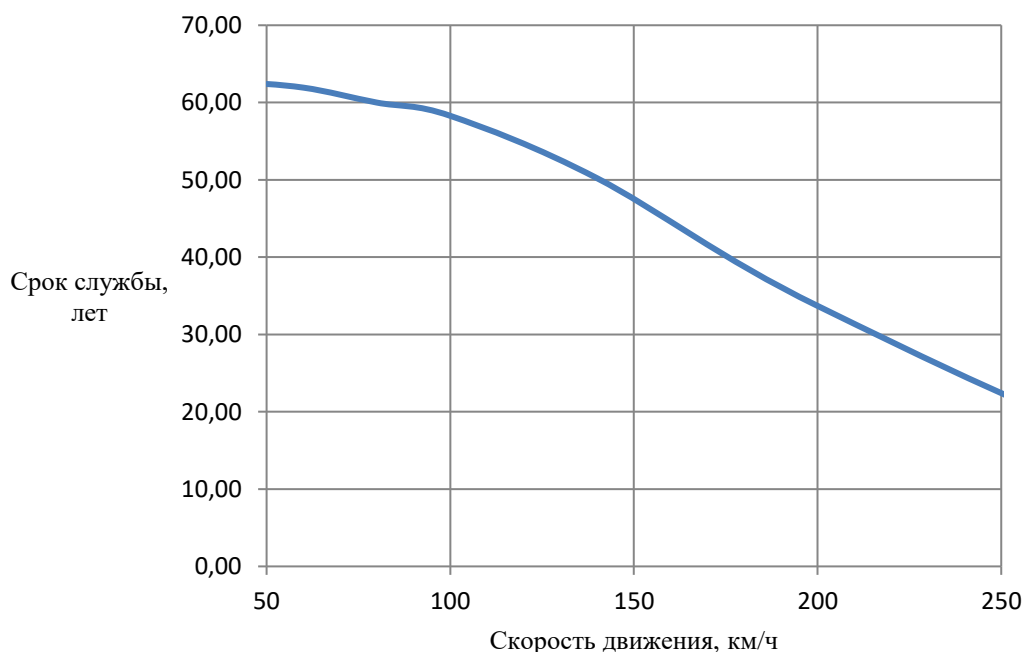


Рисунок 4.4 – График зависимости срока службы безбалластной конструкции от скорости движения при осевой нагрузке 23,5 т/ось и грузонапряженности 20 млн т брутто/км в год

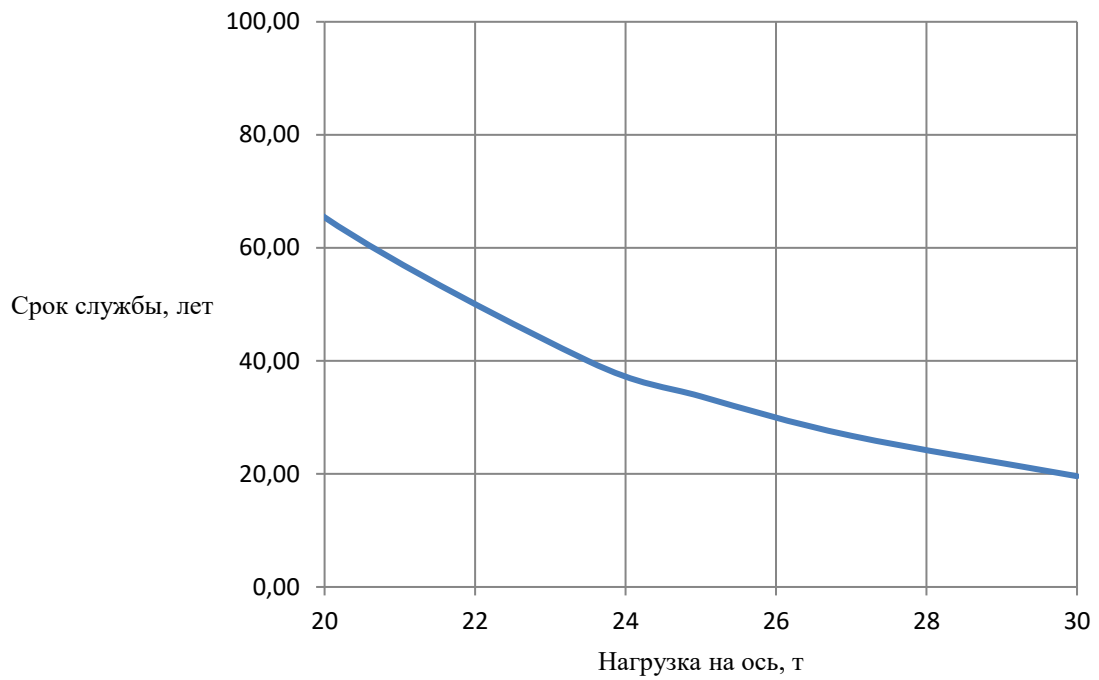


Рисунок 4.5 – График зависимости срока службы безбалластной конструкции от осевой нагрузки при скорости движения 80 км/ч и грузонапряженности 30 млн т брутто/км в год

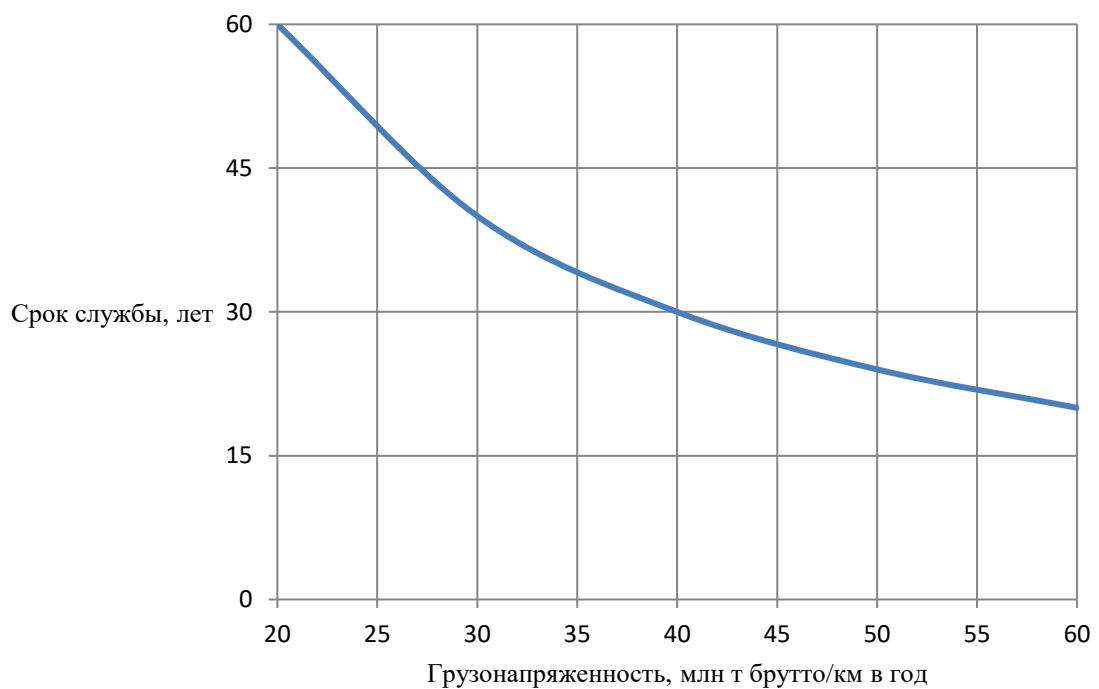


Рисунок 4.6 – График зависимости срока службы безбалластной конструкции от грузонапряженности при скорости движения 80 км/ч и осевой нагрузке 23,5 т/ось

4.4. Оценка экономического эффекта от расчета срока службы безбалластной конструкции пути

«Выбор безбалластной конструкции всегда является сложной технико-экономической задачей в связи с длительным сроком ее окупаемости. Стоимость строительства одного метра безбалластного пути в европейских странах колеблется от 500 до 1100 евро/метр» [73], например, затраты на строительство в 2006 году безбалластных систем Rheda и Züblin составляли 950 евро/м и 800 евро/м соответственно» [73, 145]. При этом, «повышенные затраты на строительство безбалластного пути компенсируются уменьшенными затратами на его текущее содержание примерно через 20 лет» [73]. При выборе безбалластной конструкции одним из важнейших параметров является «стоимость ее жизненного цикла, которая складывается из стоимости научно-исследовательских работ и разработки, стоимости производства и строительства, стоимости эксплуатации и техобслуживания, стоимости вывода конструкции из эксплуатации и утилизации» [73]. При этом каждый год эксплуатации безбалластной конструкции приносит существенный доход, поэтому при выборе БКП важно знать срок ее службы, а, следовательно, его предварительная оценка при помощи переноса результатов натуральных испытаний на опытном полигоне на действующую линию, является крайне актуальной задачей.

В настоящем разделе была проведена оценка эффекта от расчета срока службы безбалластной конструкции путем проведения испытаний на опытном полигоне. По результатам расчетов, проведенных на основе натуральных испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ», прогнозный срок службы конструкции LVT на линии ВСМ при грузонапряженности 25 млн. т. брутто в год составит 52 года [73], срок службы конструкции Alstom в аналогичных условиях – 48 лет. Таким образом, согласно данным оценкам, конструкция LVT прослужит на 4 года дольше, а, следовательно, с точки зрения продолжительности службы предпочтение следует отдать данной конструкции. Рассчитаем экономический

эффект от проведения испытаний и выбора оптимальной конструкции относительно срока службы для проекта высокоскоростной линии [146]. В качестве показателя экономической эффективности используется чистая приведенная стоимость NPV , рассчитываемая по формуле:

$$NPV = -I_0 + \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1+r)^i}, \quad (4.38)$$

где I_0 – начальные инвестиции;

C_i – денежный поток в i -м году;

r – коэффициент дисконтирования.

Чистая прибыль от эксплуатации линии составляет порядка 5 млрд. руб. в год (без дисконтирования) [146], стоимость проведения натуральных испытаний безбалластного пути – порядка 10 млн. руб. В качестве коэффициента дисконтирования была принята ключевая ставка ЦБ РФ на начало 2014 г., равная 5,5%.

Подставляя в формулу (4.38) данные значения, получаем:

$$NPV = -10000000 + \sum_{i=49}^{52} \frac{5000000000}{(1+0,055)^i}. \quad (4.39)$$

$NPV = 1,34$ млрд руб.

Также оценим внутреннюю норму доходности IRR , которая может быть найдена из соотношения:

$$-I_0 + \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1+IRR)^i} = 0. \quad (4.40)$$

Подставив в формулу (4.40) исходные данные и произведя необходимые вычисления, находим $IRR = 17,4\%$.

Таким образом, эффект от проведения испытаний и оценки срока службы безбалластной конструкции составляет 1,34 млрд. руб., внутренняя норма доходности – 17,4%.

Выводы к главе 4

1) Срок службы безбалластного пути, рассчитанный при помощи однослойной и трехслойной моделей в условиях грузового движения со скоростью 80 км/ч и нагрузкой на ось 23,5 т. составляет 40 лет, в условиях скоростного пассажирского движения со скоростью 200 км/ч и нагрузкой на ось 18 т. – 45 и 46 лет соответственно.

2) Разница в результатах расчета срока службы безбалластной конструкции пути для условий Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» и перспективных условий ВСМ с применением модели однослойной балки и трехслойной балки не превышает 10%.

3) При высоких скоростях движения и осевых нагрузках расхождение между результатами, полученными при помощи однослойной и трехслойной моделей, существенно увеличивается и может достигать значений более 20%-30%, что делает целесообразным использование трехслойной модели для условий высокоскоростного и тяжеловесного движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, выводы и практическая ценность работы заключается в следующем:

1) Разработан метод нахождения матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил через неровности пути в профиле в модели колебаний пути, как трехслойной балки, лежащей на упругом основании Винклера, позволяющий оценить статистические характеристики напряженного состояния и прогибов в элементах конструкции безбалластного пути.

2) Разработанная математическая и компьютерная модель расчета срока службы безбалластных конструкций пути с использованием предложенного автором метода может быть использована при расчете жизненного цикла БКП для различных условий эксплуатации и обосновании целесообразности применения той или иной безбалластной конструкции либо пути на балласте.

3) Разница в результатах расчета срока службы безбалластной конструкции пути для существующих условий ВСМ с применением модели однослойной балки и трехслойной балки составляет порядка 5-10%.

4) С ростом скорости движения и нагрузки на ось расхождение между результатами расчетов, выполненных с использованием моделей однослойной и трехслойной балки, увеличивается, и, при достаточно больших значениях данных параметров (более 160 км/ч и 25 т/ось), может превышать 20%, что в перспективе делает целесообразным использование метода, предложенного в настоящей работе.

5) Предложенная математическая модель и численные расчеты использованы для определения допустимых геометрических размеров бетонной несущей плиты при разработке первой редакции ГОСТ Р Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля, а также для формирования предложений по изменению ГОСТ 32698-

2014 Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля.

Результаты расчетов использованы при разработке нового типа рельсового скрепления (заявки на патент № 2022112623, 2022112624, 2022112625, 2022112626, 2022112627 от 11.05.2022).

б) Задачи определения влияния значений случайных процессов изменения прогибов и напряжений с учетом вертикальных динамических сил, поставленные в работе, решены, цель работы по определению срока службы безбалластного пути достигнута.

7) Перспективы дальнейшей разработки данной темы заключаются в проведении расчетов для различных типов экипажей, конструкций пути и условий эксплуатации, применении предложенной модели для статистических оценок случайных процессов, возникающих при расчете ударного взаимодействия в системе экипаж-рельсовый путь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Привалов, С. В. Влияние жесткости подрельсового основания на взаимодействие экипажа и пути : дис. ... кандидата технических наук : 05.22.06 / Привалов Сергей Владимирович. – М., 2004. – 118 с.
2. Мельникова, М. О железных дорогах [Текст] / Санкт-Петербург : Главное управление путей и сообщения и публичных зданий, 1835. – 110 с.
3. Горбунов, М. А. Оценка напряженного состояния в окрестности трещин при эксплуатации рельсов : дис. ... кандидата технических наук : 05.22.06 / Горбунов Максим Александрович. – М., 2011. – 182с.
4. Winkler, E. Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit [Текст] / Prague, 1867.
5. Zimmerman, H. Die Berechnung des Eisenbahnoberbauee [Текст] / Berlin, 1888.
6. Васютынский, А. Наблюдения над упругими деформациями железнодорожного пути: диссертация на степень адъюнкта ин-та/ А. Васютынский. - СПб. : Тип. Ю. Н. Эрлих, 1899. - IV, 130 с. : ил. В надзаг.: Ин-т инженеров путей сообщения Императора Александра I
7. Васютынский, А.Л. Об усилении рельсовых стыков [Текст] / Докл. инж. А.Л. Васютынского XIII Совещат. съезду инженеров службы пути. – СПб., 1896. – 24 с.
8. Годыцкий-Цвирко, А. М. Взаимодействие пути и подвижного состава железных дорог [Текст] / А. М. Годыцкий-Цвирко. – Петроград.: Институт инженеров путей сообщения, 1923. – 128 с.
9. Крачковский, В.П. Расчет железнодорожного пути под действием вертикальных нагрузок [Текст] / В.П. Крачковский. – М.: Трансжелдориздат, 1934. – 279 с.

10. Крачковский, В.П. Динамическое воздействие нагрузки на железнодорожный путь [Текст] / В.П. Крачковский // Труды МИИТа. - Вып. 54. - М.: Трансжелдориздат, 1937. - С. 42-217.

11. Петров Н.П. Напряжение в рельсах от изгибов в вертикальной плоскости и вероятность определения этих напряжений опытами [Текст] / Н.П. Петров. – С.-Петербург, 1906. – 107 с.

12. Марье Г. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / Перевод под редакцией Н.А. Бредихина, Н.Т. Митюшина и Ф.В. Пугачевского. – М.: Госжелдориздат, 1933. – 338 с.

13. Альбрехт В. Г. О продольных силах, возникающих на поверхности соприкосновения подошвы рельса и основания при проходе колес подвижного состава [Текст] / В.Г. Альбрехт // Тр. МИИТ.- 1955.- Вып. 80/1.- 123 с.

14. Ашпиз, Е.С. Обоснование нормативов деформативности подрельсового и подшпального оснований [Текст] / Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский // Мир транспорта . –2012. – №5. – С. 112–119.

15. Ашпиз, Е.С. Подход к расчету показателей надежности элементов пути [Текст] / Е. С. Ашпиз // Мир транспорта. – 2011. – №5. – С. 34–41.

16. Ашпиз, Е.С. Развитие системы мониторинга пути [Текст] / Е. С. Ашпиз // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – №4. – С. 30–32.

17. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, В. Н. Данилов, Е. М. Бромберг, [и др.] – М.: Трансжелдориздат, 1956. – 280 с.

18. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.

19. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес [Текст] / М.Ф. Вериго. – М., 1997. – 207 с.

20. Вериго, М.Ф. Расчет напряжений в балластном слое и на основной площадке земляного полотна [Текст] / М.Ф. Вериго // Взаимодействие пути и

подвижного состава и вопросы расчетов пути: сб. трудов.– М.: Трансжелдориздат, 1955. – Вып. 97. – С.326–352.

21. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава и вопросы расчетов пути [Текст] / М.Ф. Вериго, А.Х. Ветченко, О.П. Ершков [и др.] // Труды Всесоюзного научно–исследовательского института железнодорожного транспорта. – М.: Трансжелдориздат, 1955. – № 97. – 386 с.

22. Данилов В.Н. Расчет рельсовой нити в зоне стыка [Текст] / В.Н. Данилов // сб. тр. ВНИИЖТ. – Вып. 70. – М.:Трансжелдориздат, 1962. – 113с.

23. Данилов, В.Н. Железнодорожный путь и его взаимодействие с подвижным составом [Текст] / В.Н. Данилов. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 70 с.

24. Данилов, В.Н. Динамические характеристики рельсового основания [Текст] / В.Н. Данилов, В.Ф. Яковлев, И.И. Семенов // Вестник ВНИИЖТ. - 1964. - №7.-С. 16-18.

25. Данович, В.Д. Колебания балки бесконечной длины на упругом основании с переменным коэффициентом затухания перемещений [Текст] / В.Д. Данович // В кн.: Исследование взаимодействия пути и подвижного состава: Межвуз. сб. науч. тр.: Днепропетровск, 1979. – Вып. 204/21. – С. 77–84.

26. Данович, В.Д. Стационарные колебания бесконечно длинной балки, лежащей на упругом основании, под действием гармонической нагрузки [Текст] / В.Д. Данович // Межвуз. сб. науч. тр.: Днепропетровск, 1978. – Вып. 199/25. – С. 14–25.

27. Dörr, I. «Das Schurngungsverhalten eines federnd gebetteten unendlich langen Balkes» //Ingenieur – Archiv. – 1948. –XVI Band. 5,6 Hefte.

28. Ермаков, В.М. Причины бокового износа рельсов [Текст] // В.М. Ермаков, Н.В. Войцеховская, Г.Е. Степанова // Путь и путевое хозяйство – 1997. – №8. – С. 2–4.

29. Ершков, О.П. Расчет рельса на действие боковых сил в кривых [Текст] / О.П. Ершков// Труды ЦНИИ МПС. – М.: Трансжелдориздат, 1960. –. Вып. 192. – С. 5 - 58.

30. Желнин, Г.Г. Боковое воздействие подвижного состава на путь в прямых участках [Текст] / Г.Г. Желнин // Влияние конструкции подвижного состава и норм устройства колеи на взаимодействие пути и подвижного состава. Сборник научных трудов. – М.: Транспорт, 1971, Вып. 424, - С. 142–189.

31. Желнин, Г.Г. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности [Текст] / Г.Г. Желнин, В.Б. Каменский, В.С., Лысюк // М.: МПС РФ, №ЦПТ-52/14, 2000. – 40 с.

32. Kenney, I. T. Steady state vibration of beam on elastic foundation for moving load [Текст] / I. T. Kenney // Journal of applied mechanics. Trans ASME. December, 1954.

33. Коган, А.Я. Расчеты железнодорожного пути на вертикальную динамическую нагрузку [Текст] / А.Я. Коган, С.С. Крепкогорский, Б.С. Шинкарев // Сборник научных трудов: под ред. А.Я. Когана. - М.: Транспорт, 1973. - Вып. 502.– 80с .

34. Коган, А.Я. Колебания пути при высоких скоростях движения экипажей и ударном взаимодействии колеса и рельса [Текст] / А.Я. Коган, Д.А. Никитин, И.В. Полещук [и др.] // М.: Интекст, 2007.– 168 с.

35. Коган, А. Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь [Текст] /А. Я. Коган // Тр. ВНИИЖТ. –1969. – Вып. 402. – 205 с.

36. Коган, А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом [Текст] / А. Я. Коган. - М.: Транспорт, 1997. - 326 с.

37. Коган, А.Я. Случайные процессы взаимодействия пути и подвижного состава [Текст] / А.Я. Коган, Э.Д. Загитов, И.В. Полещук. // М.: РАС, 2016. - 210 с.

38. Коган, А.Я. Колебания рельса при движении по нему переменной нагрузки [Текст] / А.Я. Коган // Вестник ВНИИЖТ. 1968. – №1. – С. 7–11.

39. Коган, А.Я. Расчет нестационарного напряженно-деформированного состояния элементов конструкции пути в зоне стыка рельсов [Текст] / А.Я. Коган, Ю.Л. Пейч // Вестник ВНИИЖТ. 2002. – №2. – С. 31–39.

40. Коган, А.Я. Напряженно-деформированное состояние грунтового подшпального основания от воздействия динамической нагрузки [Текст] / А.Я. Коган, Ю.Л. Пейч // Вестник ВНИИЖТ. 2002. – №3. – С. 24–30.

41. Коган, А.Я. Аналитический метод исследования нестационарных процессов в однородном поезде при произвольном расположении в нем тяговых единиц [Текст] / А.Я. Коган, М.А. Левинзон // Вестник ВНИИЖТ. 2001. – №6. – С. 25–31.

42. Коган, А.Я. Методика определения расчетного срока службы безбалластного пути [Текст] / А.Я. Коган, А.В. Савин // Вестник Научно–исследовательского института железнодорожного транспорта.– 2017. – №1. – С. 3–9.

43. Коган, А.Я. Воздействие экипажа на путь при пространственных колебаниях подвижного состава. Описание программы [Текст] / А.Я. Коган, М.А. Левинзон, И.О. Войтов [и др.] // Информационный бюллетень ВНИИЦентр. – М.: ГОСФАП, 1985. – № 4/67. – 40 с.

44. Коган, А.Я. Теоретические исследования влияния различных эксплуатационных факторов на износ рельсов, гребней и бандажей колесных пар [Текст] / А.Я. Коган, М.А. Левинзон. // М.: ВИНТИ, 1996. – Деп. №6054. – 119 с.

45. Коренев, Б.Г. Некоторые задачи динамики балок на упругом основании [Текст] / Б.Г. Коренев, М.Н. Ручимский // Науч. сообщение № 120 ЦНИПС. М.: Стройиздат, 1955. – 54с.

46. Филиппов, А. П. Динамическое воздействие подвижных нагрузок на стержни [Текст] / А. П. Филиппов, С. С. Кохманюк // Киев : Наукова думка, 1967. - 132 с.

47. Крачковский, В.П. Расчет железнодорожного пути под действием вертикальных нагрузок [Текст] / В.П. Крачковский // М.: Тр. МИИТ, 1934. - Вып. 40. – 280с.

48. Крачковский, В.П. Динамическое воздействие нагрузки на ж.д. путь. [Текст] / В.П. Крачковский // М.: Тр. МИИТ, 1937. – Вып. 54, - С.42–217.

49. Крепкогорский, С.С. Вертикальные колебания наддресорного строения подвижного состава и влияние на их путь [Текст] / С.С. Крепкогорский // Тр. ВНИИЖТ. – М., 1958. – Вып. 152. – 172 С.

50. Крепкогорский, С.С. Универсальная программа расчетов на ЭЦВМ показателей воздействия подвижного состава на путь [Текст] / С.С. Крепкогорский, А.А. Верхотин // Труды ВНИИЖТ. – М., –1975. – Вып.542. – С. 93-110.

51. Муравский, Г.Б. Неустановившиеся колебания балки, лежащей на упругом основании, при действии подвижной нагрузки [Текст] / Г.Б. Муравский // Изв. АН СССР, ОТН Мех. и машиностроения, 1962. – №1. – 117 с.

52. Муравский, Г.Б. Действие подвижной нагрузки на балку бесконечной длины, лежащую на упругом основании [Текст] / Г.Б. Муравский // М.: Тр. МИИТ., 1961. – Вып. 134. – С. 54–84.

53. Mathews, P.M. Vibration of a beam on elastic foundation [Текст] / P.M. Mathews // I. Zetschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, 1958. – В-38. – Н. I–VI.

54. Певзнер, В.О. Оценка деформативности пути в местах расстройств и возможных изменений в сроках выправки при повышении осевой нагрузки грузовых вагонов [Текст] / В.О. Певзнер, С.С. Надежин, А.В. Анисин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 4. – С. 44–47.

55. Певзнер, В.О. Состояние пути и установление скоростей движения поездов. [Текст] / В.О. Певзнер // Динамические качества современного подвижного состава и особенности его воздействия на путь, сб. – М.: Транспорт, 1977. – С. 36–54.

56. Прокудин, И.В. Исследование изменений прочностных характеристик глинистых грунтов при действии вибродинамической нагрузки [Текст] / И.В. Прокудин // Тр. ЛИИЖТ, 1974. – Вып. 369. – С. 60–66.

57. Ромен, Ю.С. Исследование на АВМ движения четырехосного вагона с износами ходовых частей по пути с отступлениями [Текст] / Ю.С. Ромен, В.Е. Николаев // Труды ВНИИЖТ, 1976. – Вып. 549. – С. 77–92.

58. Ромен, Ю.С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний [Текст] / Ю.С. Ромен // М.: ВМГ–Принт, 2014. – 210 с.

59. Ромен, Ю. С. Методы расчетов динамических процессов в подвижном составе с учетом неровностей железнодорожного пути в эксплуатации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Ромен Юрий Семенович. - М., 1986. - 31 с.

60. Сергеев, Б.Н. Упрощенные методы полевых испытаний рельсового пути [Текст] / Б.Н. Сергеев // Труды НИИ пути, М.: Госжелдориздат, 1933. – С. 9–27.

61. Тимошенко, С.П. К вопросу о вибрациях рельсов [Текст] / С.П. Тимошенко // Известия электротехнического института. – 1905, - Т. XIII. – 17 с.

62. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле [Текст] / С. П. Тимошенко // М.: Наука, -1967. - 444 с.

63. Ушкалов, В.Ф. Статическая динамика рельсовых экипажей [Текст] / В.Ф. Ушкалов, Т.М. Резников, С.Ф. Редько // Киев: Наукова думка, 1982. – 359 с.

64. Филиппов, А.П. Колебания деформируемых систем [Текст] / А.П. Филиппов // М.: Машиностроение, 1970. – 737 с.

65. Фришман, М. А. Еще раз об определении модуля упругости подрельсового основания [Текст] / М.А. Фришман, И.С. Леванков // Труды ДИИТ, 1965. – Вып. 57. – С. 4–8

66. Шахуняц, Г.М. Расчеты верхнего строения пути [Текст] / Г.М. Шахуняц // М.: Трансжелдориздат, 1951. – 264 с.

67. Шахуняц, Г.М. Железнодорожный путь [Текст] / Г.М. Шахуняц // М.:Трансжелдориздат, 1969. – 535 с.

68. Шахуняц, Г.М. Расчеты верхнего строения пути [Текст] / Г.М. Шахуняц // М.:Трансжелдориздат, 1959. – 263 с.

69. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн // М.: Наука, 1968. – С. 274–275.

70. Коган, А.Я. Вертикальные колебания рельса на основании с упругим сопротивлением, удовлетворяющим гипотезе Е.С. Сорокина, под действием переменной подвижной нагрузки [Текст] / А.Я. Коган, В.М. Гаврилов // Повышение работы железнодорожного пути в условиях Сибири и Казахстана: сб. науч. ст.: Новосибирск, 1983. – С. 13–24.

71. Коган, А.Я. Поперечные горизонтальные силы, действующие на железнодорожный путь в прямых участках [Текст] / А.Я. Коган, В.И. Гаврилов, Л.П. Агафонова [и др.]; под ред. А.Я. Когана. – Тр. ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1979. – Вып. 619. – 88 с.

72. Коган, А.Я. Колебания пятислойной балки на упругом основании под действием подвижной динамической нагрузки [Текст] / А.Я. Коган, В.Ф. Барабошин, В.М. Гаврилов // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений: сб. науч. тр.: Новосибирск, 1986. – С. 33–43

73. Савин, А.В. Условия применения безбалластного пути [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 // Савин Александр Владимирович. – М., 2017. – 444 с.

74. Применение железобетона в верхнем строении железнодорожного пути [Текст] // сб. научн. тр.: под ред. И.В. Амеличева. – М.: Транспорт, 1984. – 120 с.

75. Ананьев, Н.И. Влияние вибрационной нагрузки на интенсивность накопления остаточных осадок в пути [Текст] / Н.И. Ананьев, В.Ф. Барабошин // Применение железобетона в верхнем строении железнодорожного пути: сб. научн. тр.: под ред. И.В. Амеличева. – М. : Транспорт, 1984. – С. 108–117.

76. Ананьев, Н.И. Вибрации пути с малогабаритными рамами [Текст] / Н.И.Ананьев, Барабошин В.Ф. // Вестник ВНИИЖТ. – 1972. – №6– С. 53–56.

77. Барабошин, В.Ф. Вредные вибрации пути и борьба с ними [Текст] / В.Ф. Барабошин, Н.И. Ананьев // М.: Транспорт, 1972. – 48 с.

78. Барабошин, В.Ф. Повышение стабильности пути в зоне рельсового стыка [Текст] / В.Ф. Барабошин, Н.И. Ананьев // М. : Транспорт, 1978. – 45 с.

79. Ананьев, Н.И. Частотный метод оценки виброзащитных свойств промежуточных рельсовых скреплений [Текст] / Н.И. Ананьев, В.Ф. Барабошин // Вестник ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1971. – №5. – С. 4–7.

80. Барабошин, В.Ф. Основные параметры новой конструкции пути метрополитенов с повышенными виброзащитными свойствами [Текст] / В.Ф. Барабошин // Тр. ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1981. – Вып. 630. – С. 26–53.

81. Волошко, Ю.Д. Особенности расчет пути на сплошном крупноблочном железобетонном основании [Текст] / Ю.Д. Волошко // Труды днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта. – 1960. – № 30. – С. 44–79.

82. Ашпиз, Е.С. Обоснование нормативов деформативности подрельсового и подшпального оснований [Текст] / Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский // Мир транспорта. – 2012. – №5. – С. 112–119.

83. Замуховский А.В. Совершенствование технологии укладки и текущего содержания безбалластного пути метрополитена [Текст] // дис. ... канд. тех. наук : 05.22.06 / Замуховский Александр Владимирович. – М.: МИИТ, 2006. – 144 с.

84. Коваленко, Н.И. Критерий выбора конструкций пути для ВСМ [Текст] / Н.И. Коваленко, А.В. Замуховский, А.Н. Коваленко // Мир транспорта. – 2013. – № 4. – С. 88–94.

85. Клинов, С.И. Переходный путь [Текст] / С.И. Клинов. – Путь и путевое хозяйство. – 1987. – № 7. – С. 27–27.

86. Клинов, С. И. Железнодорожный путь на искусственных сооружениях [Текст] / С.И. Клинов. – М.: Транспорт, 1990. – 144 с.

87. Клинов, С.И. Железнодорожный путь в тоннелях. Устройство и содержание [Текст] / С.И. Клинов // Железнодорожный транспорт. Путь и путевое хозяйство. – М., 1986. – № 1. – 32 с.

88. Колос, А.Ф. Проблемы эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 на железнодорожной магистрали [Текст] / А.Ф. Колос, Т.М. Петрова, А.А. Сидоренко // Техника железных дорог. – 2013. – № 2. – С. 42–47.

89. Колос, А.Ф. Проблемы эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 на железнодорожной магистрали [Текст] / А.Ф. Колос, Т.М. Петрова, А.А. Сидоренко // Техника железных дорог. – 2013. – № 2. – С. 42–47.

90. Колос, А.Ф. Особенности напряженного состояния грунтов подплитного основания при безбалластной конструкции верхнего строения пути [Текст] / А.Ф. Колос, А.А. Сидоренко, С.В. Соловьев // Инженерный вестник Дона. – 2014. - № 2. – С. 108

91. Кравченко, Н.Д. Путь с лежневым основанием [Текст] / Н.Д. Кравченко // Путь и путевое хозяйство. – 1991. – № 9. – С. 18–19.

92. Кравченко, Н.Д. Конструкция пути для метрополитенов [Текст] / Н.Д. Кравченко // Некоторые проблемы механизации работ и надежности устройств на метрополитенах. Труды ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1979. – Вып. № 611. – С. 65–70.

93. Кравченко, Н.Д. Содержание и ремонт виброзащитного пути [Текст] / Н.Д. Кравченко // Путь и путевое хозяйство. – 1992. – № 4. – С. 23–25.

94. Кравченко, Н.Д. Путь с железобетонными лежнями, замоноличенными в путевой бетон [Текст] / Н.Д. Кравченко, Ю.Е. Крук, К.А. Кученков [и др.] // Метро. – 1993. – № 1. – С. 17–21.

95. Кравченко, Н.Д. Новые конструкции железнодорожного пути для метрополитенов [Текст] / Н.Д. Кравченко // М.: Транспорт, 1994. – 143 с.

96. Кравченко, Н.Д. Новые конструкции железнодорожного пути для метрополитенов [Текст] : дис. ... док. тех. наук : 05.22.06 / Кравченко Николай Дмитриевич. – М.: ВНИИЖТ, 1998. – 403 с.

97. Разуваев, А.Д. Сферы применения безбалластного пути [Текст] / Савин А.В., Разуваев А.Д. // Вестник института проблем естественных монополий: Техника железных дорог, 2016. – № 3(35). – С. 32–41.

98. Савин, А.В. Безбалластный путь и его основание [Текст] / А.В. Савин, П.И. Дыдышко // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 12. – С. 39–41.

99. Савин, А.В. Безбалластный путь [Текст] / А.В. Савин // М. : РАС, 2017.– 192 с.

100. Савин, А.В. Экспериментально-теоретический метод определения параметров безбалластного пути [Текст] / А.В. Савин, С.В. Михайлов // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – №6. – С. 29–39.

101. Бельков, В.М. Взаимосвязь волновых характеристик земляного полотна с его усадками и образованием балластных углублений в результате эксплуатации [Текст] / В.М. Бельков, С.В. Михайлов, А.В. Савин // Вопросы развития железнодорожного транспорта, 2017. – С. 186–192.

102. Савин, А. В. Критерии выбора конструкции безбалластного пути. [Текст] / А.В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 2–8.

103. Савин, А.В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения. [Текст] / А.В. Савин // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – № 1. – С. 55–59.

104. Савин, А.В. Экспериментальное кольцо: укладка новых конструкций пути [Текст] / А.В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 12–15.

105. Савин, А.В. Испытания безбалластных конструкций пути [Текст] / А.В. Савин, А.В. Петров, К.И. Третьяков // Техника железных дорог. – 2016. – № 5. – С. 28–38.

106. Савин, А.В. Исследования безбалластной конструкции верхнего строения пути [Текст] / А.В. Савин, А.М. Бржезовский, В.В. Третьяков [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – № 6. – С. 23–32.

107. Савин, А.В. Выбор конструкции безбалластного пути [Текст] / А.В. Савин // Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объектов железнодорожного транспорта. Материалы Всероссийской научно–практической конференции (г. Чита, 24 октября – 15 ноября 2013 г.). – 2013. – С. 19–25.

108. Савин, А.В. Безбалластные конструкции пути на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» [Текст] / А.В. Савин // Проблемы инфраструктуры транспортного комплекса: материалы Международной научно–практической конференции «Проблемы инфраструктуры транспортного комплекса» (Санкт–Петербург, 30 сентября – 1 октября 2015 года) : под ред. А.В. Петряева. – СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 48–51.

109. Савин, А.В. Условия проведения испытаний на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» [Текст] / А.В. Савин // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания

некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 7–9 октября 2014 г.): Сборник научных докладов. – Санкт–Петербург: ОАО «УИМ», 2015 . – С. 305–307.

110. Савин, А.В. Расчет напряжений в конструкциях безбалластного пути. [Текст] / А.В. Савин, Д.А. Ищенко // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 8–я научно–практическая конференция с международным участием МГУПС–МИИТ; (ISBN 978–5–904640–14–9). – 2015. – С. 147–155.

111. Савин, А.В. Методика расчета напряжений в конструкциях безбалластного пути [Текст] / А.В. Савин // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 8–я научно–практическая конференция с международным участием МГУПС–МИИТ; (ISBN 978–5–904640–14–9). – 2015. – С. 52–59.

112. Савин, А.В. Условия применения безбалластного пути [Текст] / А.В. Савин // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство: 9–я научно–практическая конференция с международным участием МГУПС–МИИТ. – Москва, – 2016. – С. 75–79.

113. Третьяков, В.В. Влияние характеристик подбалластного основания на интенсивность накопления расстройств пути в вертикальной плоскости [Текст] : дис. ... канд. техн. наук. : 05.22.06 / Третьяков Василий Владимирович // Москва, 2008. – 163 с.

114. Eisenmann I. Auswirkung der Entwicklung Spannbetonschwellen auf das Gebrauchsverhalten des Oberbaues / I. Eisenmann // "Mitt.Prufamtes Bau Landverkehrs. Techn. Univ. Munchen", 1984. – № 42. – P. 37–55.

115. Eisenmann, I. Auswirkung eines Mischverkehrs auf den Eisenbahnoberbau / I. Eisenmann // "ETR: Eisenbahntechn. Rdsch", 1987. – V. 36. – № 1-2. – P. 13–14, 16–18.

116. Eisenmann, I. Bedeutung der Oberbauforschung fur die Praxis / I. Eisenmann // Eisenbahningeuieur, 1986. – V. 37. – № 12. – P. 17–22.

117. Eisenmann, I. Stutzpunktlastizitat bei einer Festen Fahrbahn / I. Eisenmann // ZEV+DET Clasers Annalen, 1999. – V. 123. – № 11/12. - P.427–433.

118. Em.o. Prof. Dr.–Ing. J. Eisenmann, Univ.–Prof. Dr.–Ing. habil. G.Leykauf Feste Fahrbahn fur Schienenbahnen. Sonderdruck aus Beton Kalenltr.– Berlin, 2000.

119. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности [Текст] // № ЦПТ 52/14 Утверждена Заместителем Министра путей сообщения Российской Федерации В.Т. Семеновым 16 июня . – 2000. – 39 с.

120. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности [Текст] // Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2706р. 22 декабря. – 2017. – 96 с.

121. Михайлов С.В. Определение оптимальной скорости проведения испытаний по воздействию подвижного состава на путь [Текст] / С.В. Михайлов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование. М.; 2014. – С. 135–136.

122. Михайлов С.В. Построение математических моделей процессов испытаний [Текст] / С.В Михайлов, М.М Гоник // Повышение эффективности устройства и содержания железнодорожного пути. – 2014. – С. 117–120.

123. Рахимов, Р. В. Нагруженность ходовых частей вагонов и пути и обоснование возможности увеличения осевых нагрузок на железных дорогах Республики Узбекистан : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Рахимов Рустам Вячеславович. – Санкт-Петербург, 2020. – 366 с.

124. Проведение динамико–прочностных испытаний на Экспериментальном кольце, ст. Щербинка. Сравнительный анализ кромочных напряжений в рельсах и ускорений неподрессоренных масс пассажирского вагона при движении по пути с типовой и безбалластной конструкцией со скоростями до 80 км/ч [Текст] // Научно–технический отчет ОАО «ВНИИЖТ» по НИР, шифр 10.8.027.Р, этап 3. – М., 2011. – 39 с.

125. Программа и методика сравнительных полигонных испытаний безбалластных конструкций пути (БКП) четырех типов (Tines, Alstom, MaxBogl,

LVT) включая сбор данных о трудозатратах на текущее содержание [Текст] // Утверждена: Начальником центра организации скоростного и высокоскоростного движения ОАО «РЖД» Петрушенко Г.В. 19.12.2014 г. – М., 2014. – 32 с.

126. Muramoto, K. Roadbed Degradation Mechanism under Ballastless Track and Its Countermeasures [Электронный ресурс] / К. Muramoto, E. Sekine, T. Nakamura // QR of RTRI, 2006. – Vol. 47. – № 4. – P. 222–227. – Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriqr/47/4/47_4_222/_pdf (дата обращения 17.09.2019 г).

127. Клепиков, С.Н. Расчет конструкций на упругом основании [Текст] / С.Н. Клепиков // Киев: Буревестник, 1967. – 183 с.

128. Терегулова, Э. Несущая способность плит, лежащих на деформируемом основании: дис. ... канд. физ.–мат. Наук : 01.02.04 / Терегулова Эльза Рустэмовна. – Казань. – 2009. – 156 с.

129. Егорова, Е.С. Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D [Текст] / Е.С. Егорова, А.В. Иоскевич, В.В. Иоскевич [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. – № 3(42). – 30 с.

130. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость [Текст] / А.Б. Айнбиндер. – М.: Недра, 1991. – 288 с.

131. Палатников, Е.А. Расчет железобетонных плит покрытий аэропортов [Текст] / Е.А. Палатников. – М: Оборонгиз, 1961. – 96 с.

132. СН 120–60 Технические условия проектирования аэродромных покрытий.

133. Михайлов, С.В. Вероятностная оценка вертикальных динамических сил, действующих на путь, в модели трехслойной балки при воздействии четырехосного грузового вагона [Текст] / С.В. Михайлов, М.М. Гоник // Вестник ВНИИЖТ, 2018. – Т. 77. – №2. – С. 98–103.

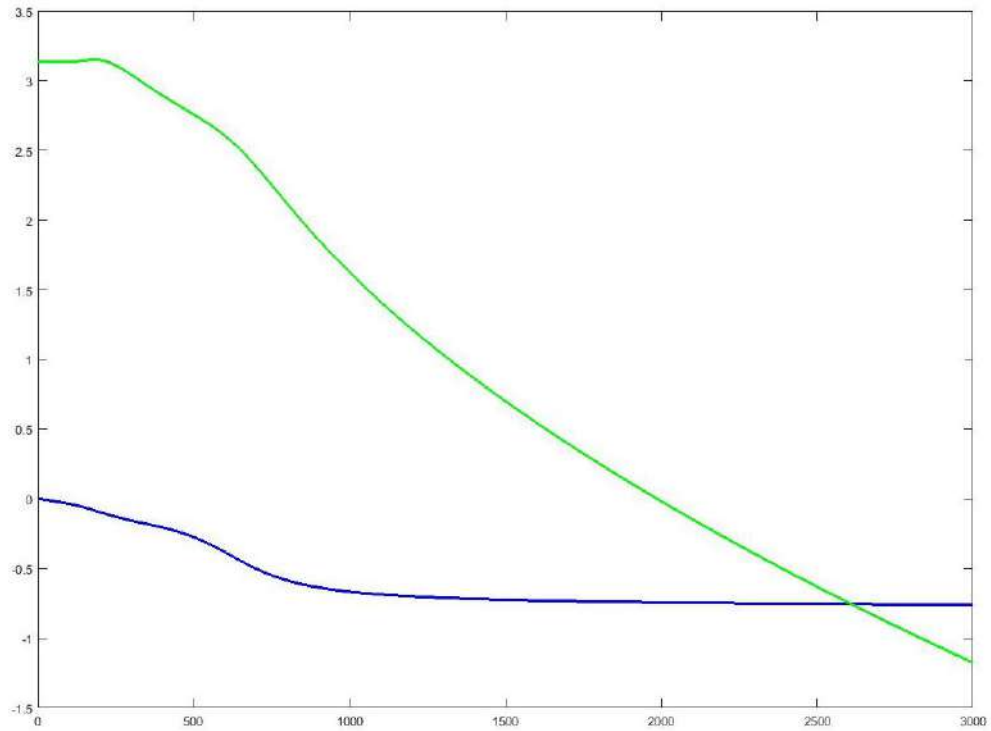
134. Михайлов С.В. Оценка срока службы безбалластной конструкции пути [Текст] / С.В. Михайлов // Вестник ВНИИЖТ, 2019. – Т. 78. – № 3. – С. 183–187.

135. Гарг, В.К. Динамика подвижного состава [Текст] / В.К. Гарг, Р.В. Дуккипати // М.: Транспорт, 1988. – 392 с.
136. Арнольд В.И. Математические методы классической механики [Текст] / В.И. Арнольд // М.: Наука, 1989. – 472 с.
137. Леннинг, Дж.Х. Случайные процессы в задачах автоматического управления [Текст] / Дж.Х. Леннинг, Р.Г. Беттин // М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958. – 388 с.
138. Михайлов, С.В. Оценка ресурса железнодорожного пути при тяжеловесном движении путем расчета его динамических характеристик [Текст] / С.В. Михайлов, М.М. Гоник // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта. Москва, 2019. – С. 212–216.
139. Петров, А. В. Жесткость рельсовых креплений безбалластной конструкции пути [Текст] / Петров А. В., Михайлов С. В., Савин А. В. // Путь и путевое хозяйство. - 2022. - №1. - С. 8-10.
140. Eisenmann, J. Die Schiene als Tragbalken [Текст] // DER EISENBAHNINGENIEUR. – 2004. – (55). – P. 22-25
141. Опыт разработки и эксплуатации безбалластного пути [Текст] // Железные дороги мира. – 2005. – № 1. – С.68–71.
142. Высокоскоростные линии с путем на балласте [Текст] // Железные дороги мира. – 2014. – № 3. – С. 69–71.
143. Giannakos, K. Requirements of tomorrow's rail transport infrastructure [Текст] // Vossloh AG 2nd traffic and transportation conference, OSE. Sep. – 2004. – P.8–12.
144. Курош А.Г. Курс высшей алгебры [Текст] / А.Г. Курош // М.: Гостехиздат, 1955. – 275 с.
145. Schilder, R. Installation Quality of Slab Track – A Decisive Factor for P. Maintenance [Текст] / R. Schilder, D. Diederich // RTR Special. – Austria: July 2007. – 76–78.
146. Инвестиционный меморандум Проекта создания высокоскоростной железнодорожной магистрали [Электронный ресурс]. – Москва – Казань. – 2014. –

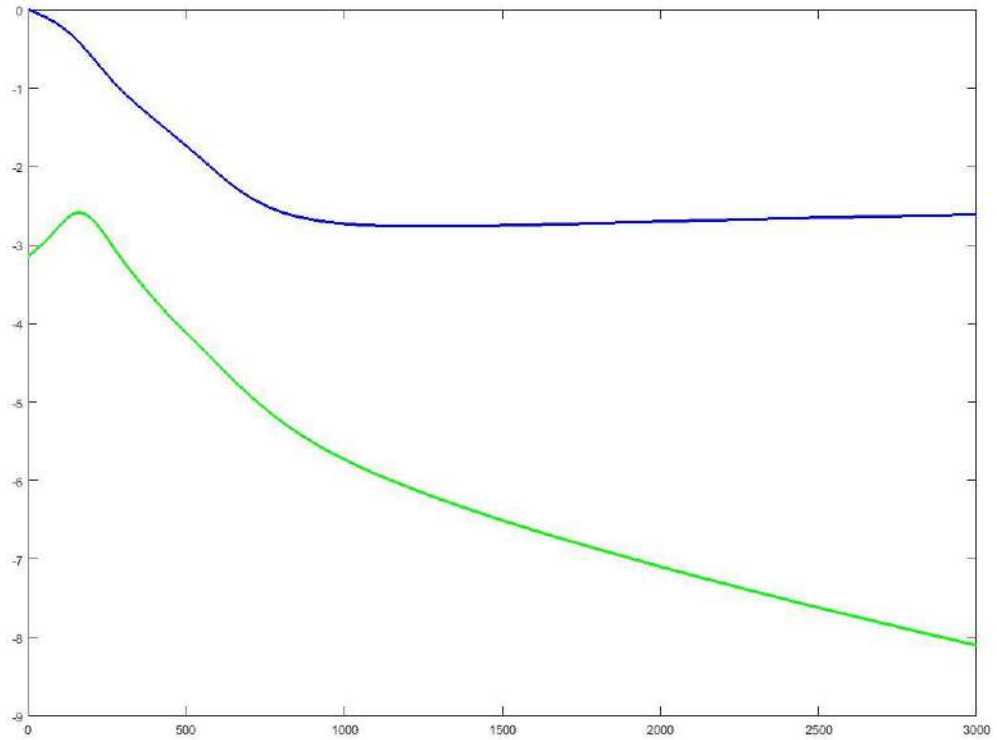
Источник: ОАО «Скоростные магистрали» URL:
<http://wiki.nashtransport.ru/images/7/74/> (дата обращения 11.01.2021).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

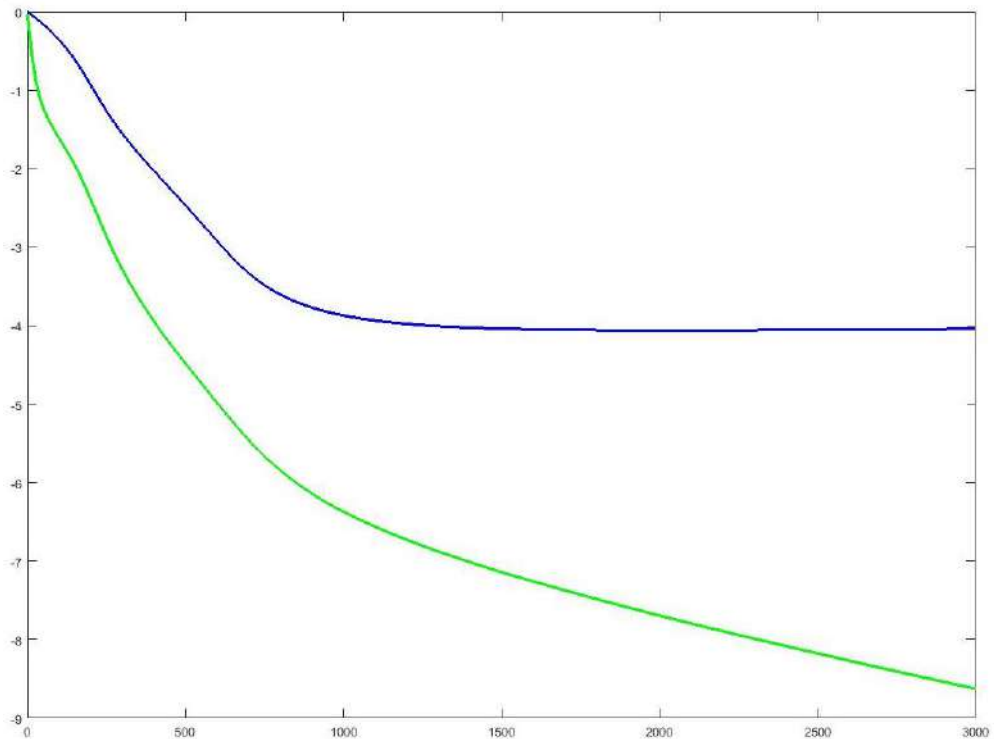
Графики частотных характеристик прогибов и изгибающих моментов в слоях безбалластной конструкции при различных скоростях движения экипажа



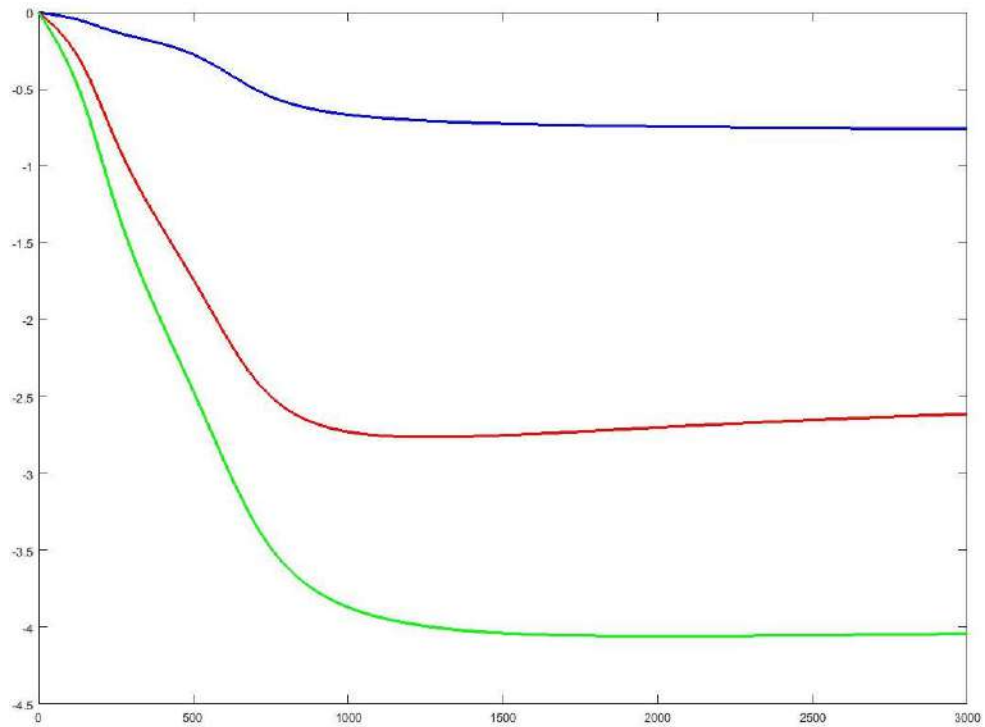
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
Рисунок А.1 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{M1}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



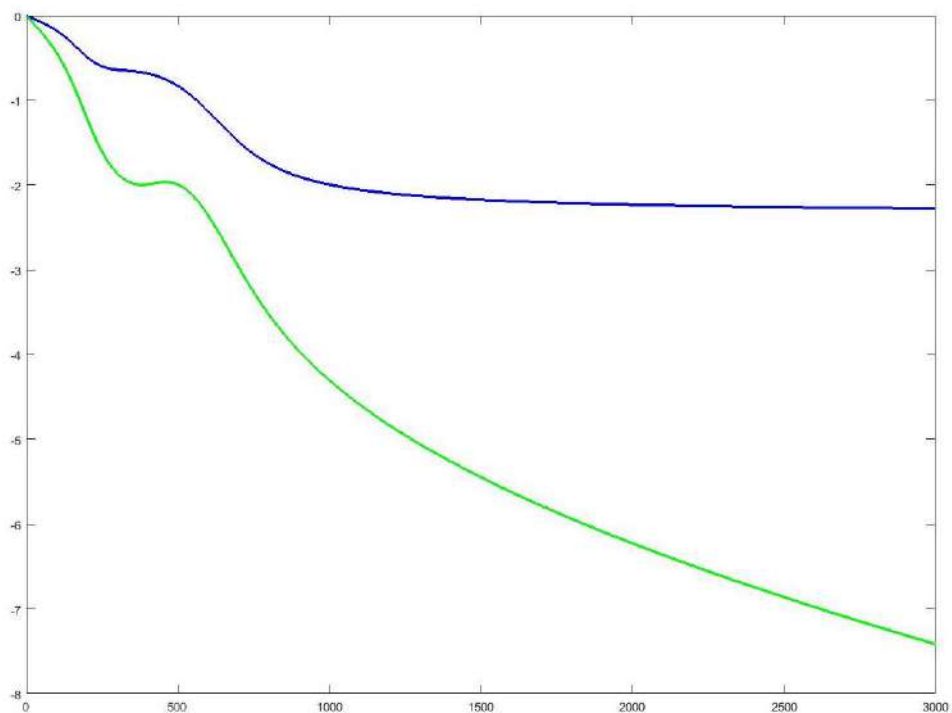
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.2 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{M2}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



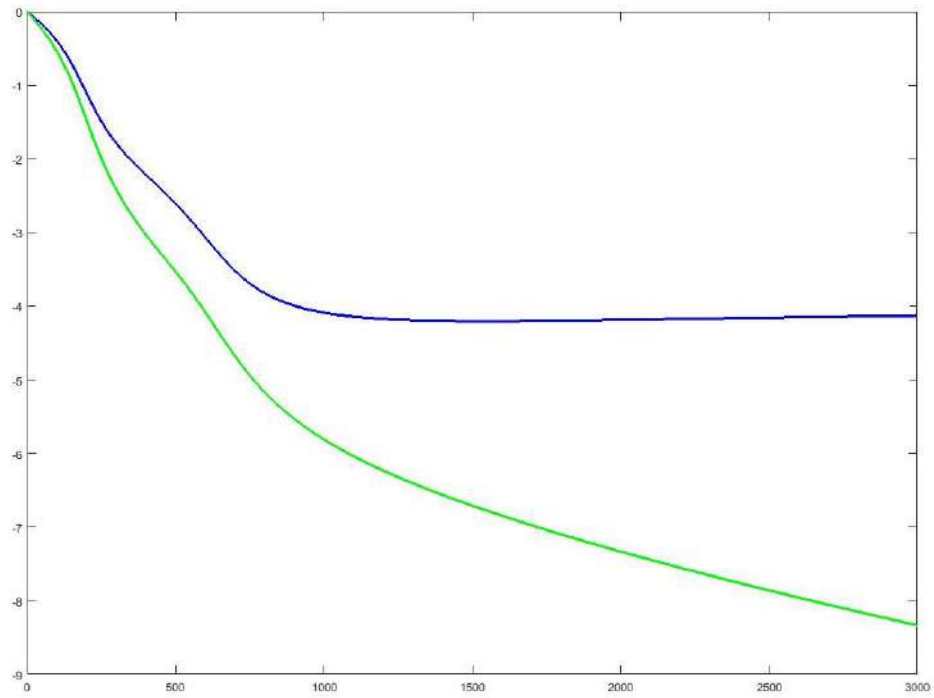
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.3 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{M3}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



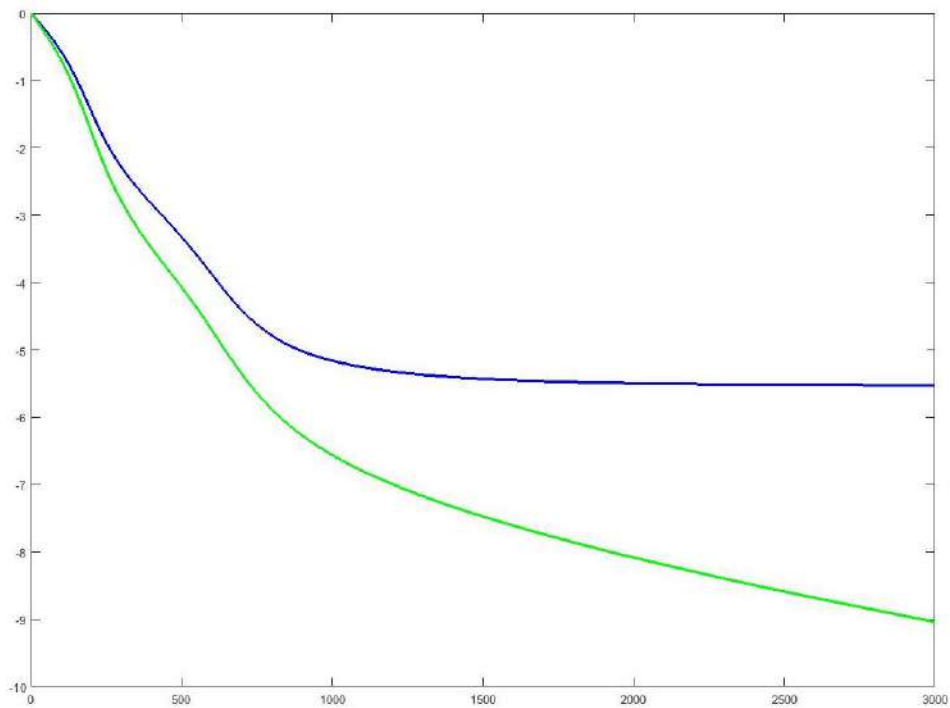
Синий цвет соответствует первому слою, красный – второму, зеленый – третьему
 Рисунок А.4 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{Mi}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



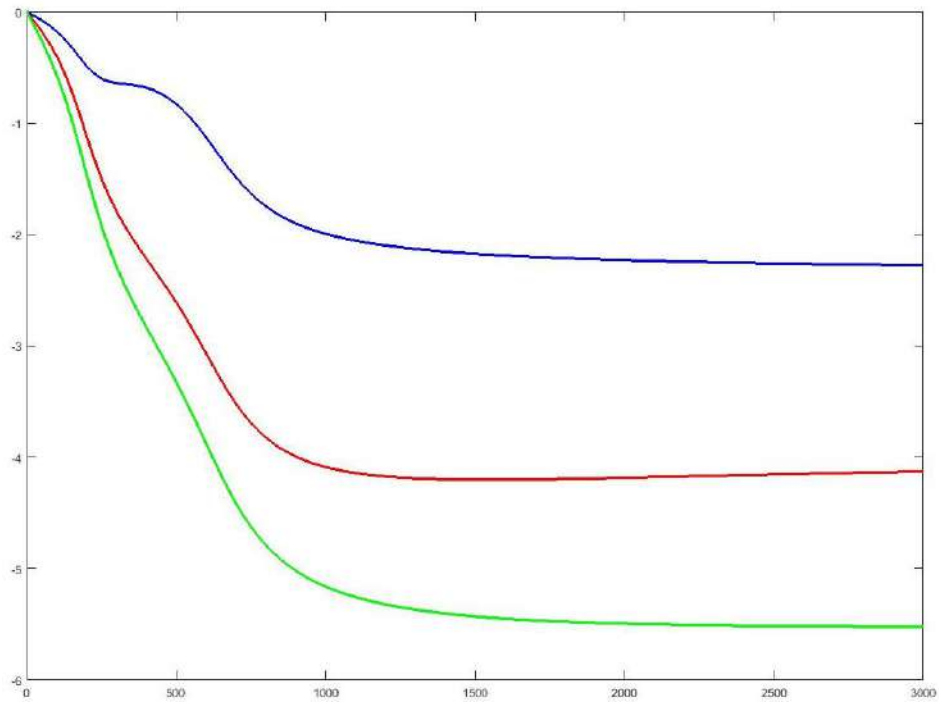
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.5 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{z1}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



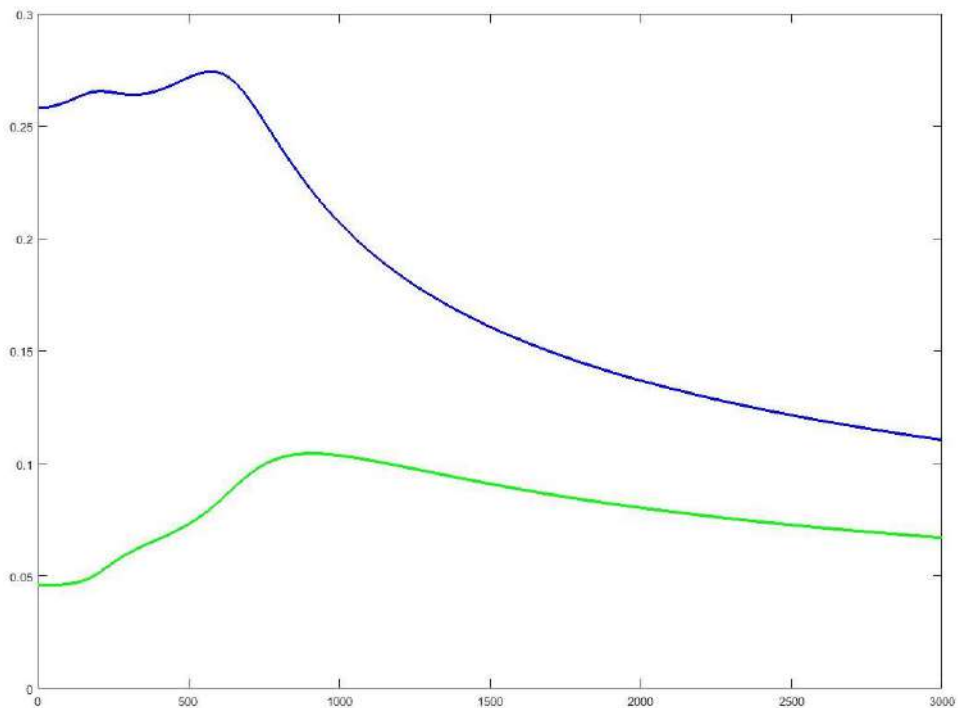
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.6 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{z2}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



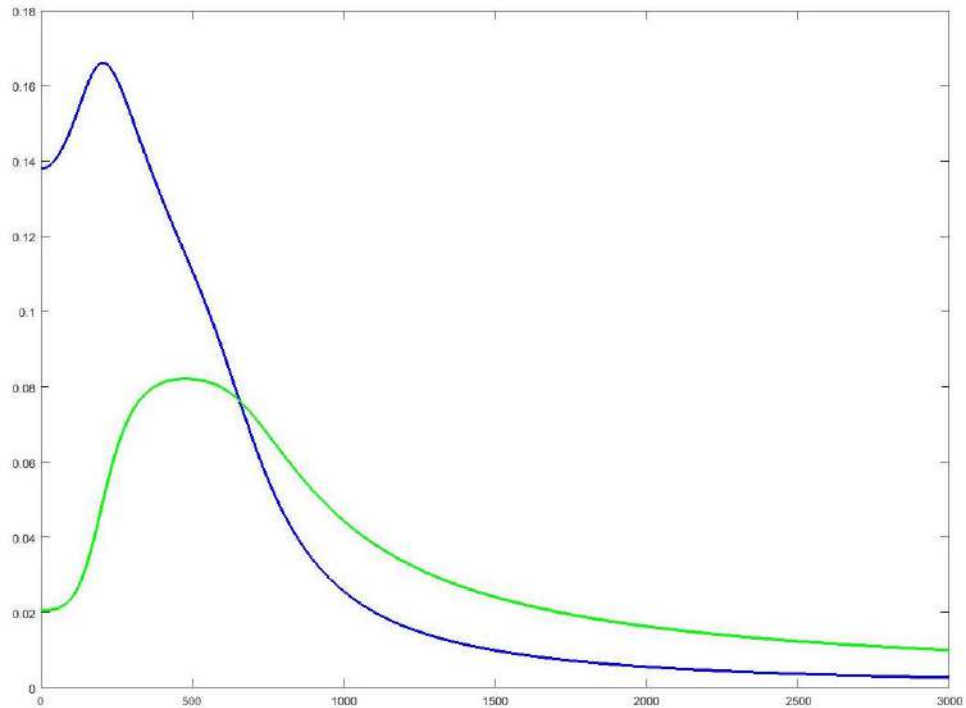
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.7 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{z3}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



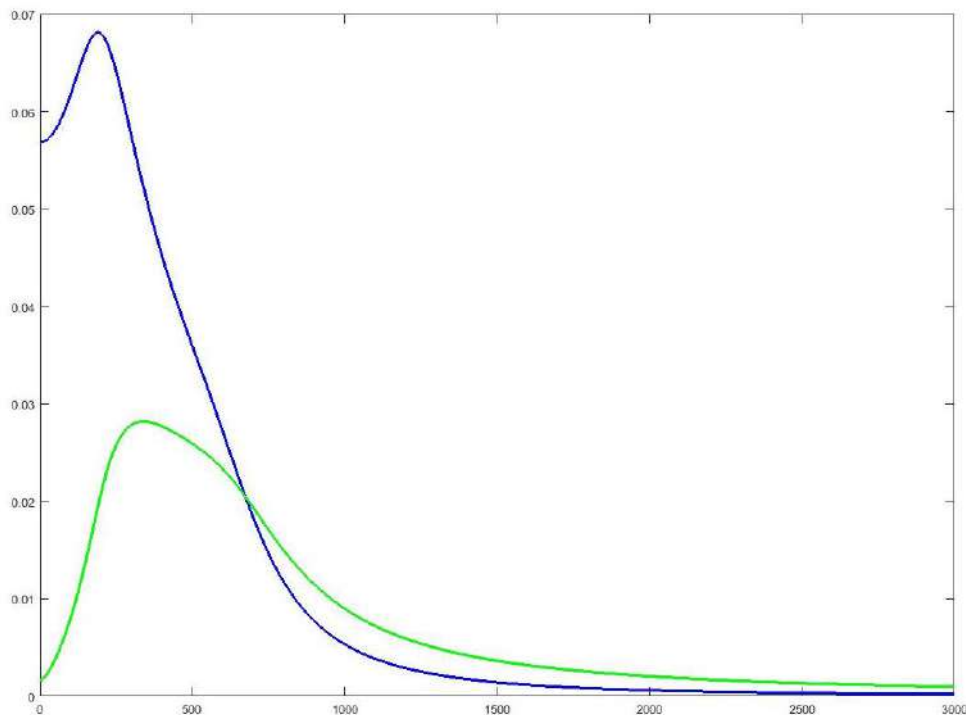
Синий цвет соответствует первому слою, красный – второму, зеленый – третьему
 Рисунок А.8 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{zi}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



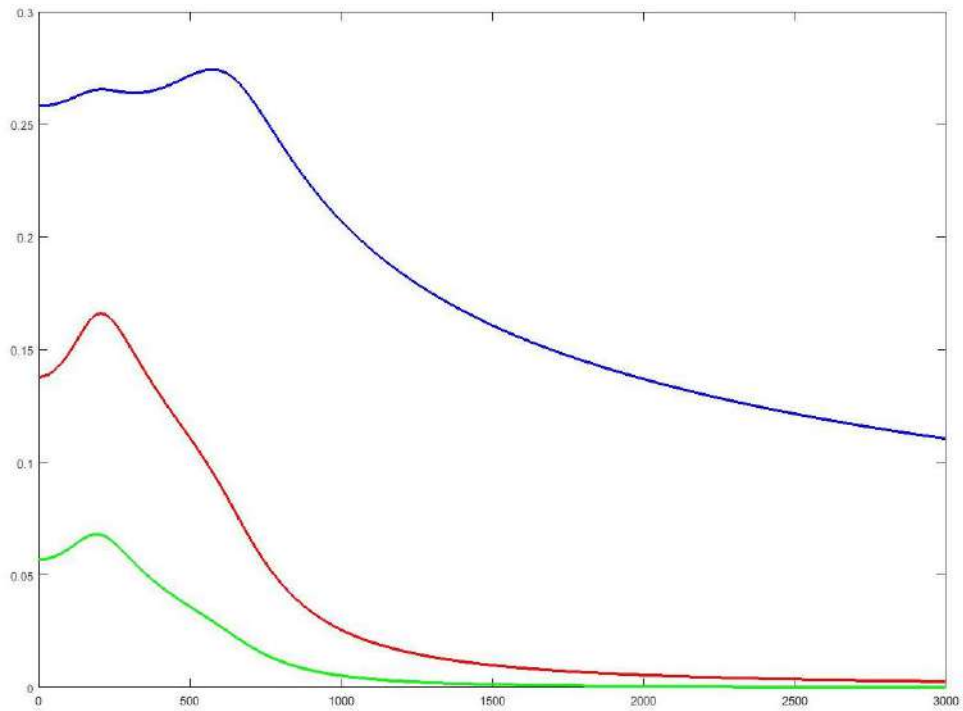
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.9 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{M1}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



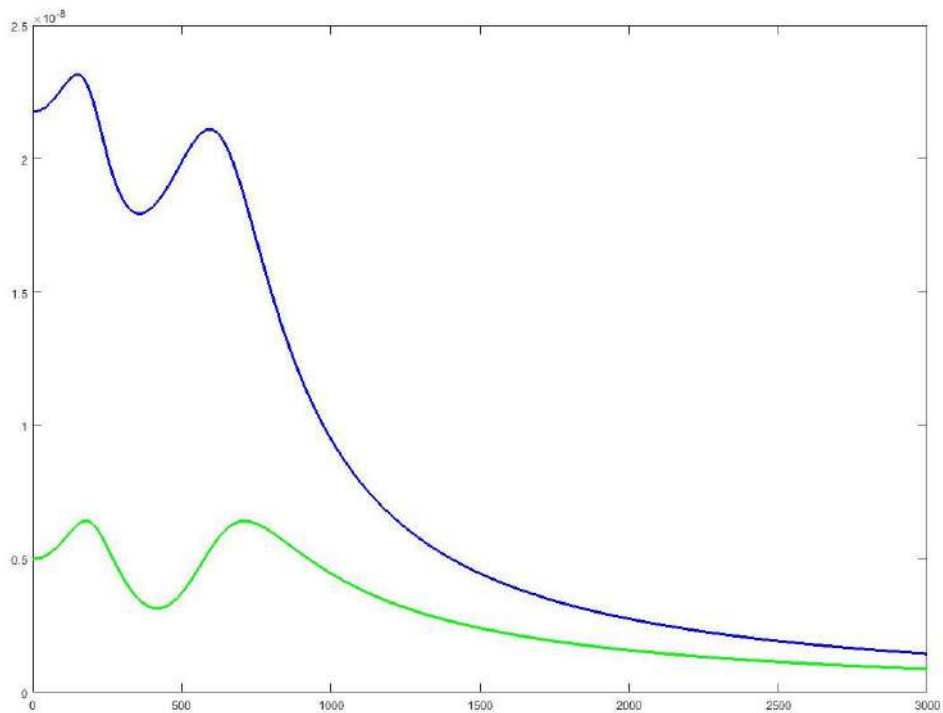
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.10 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{M2}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



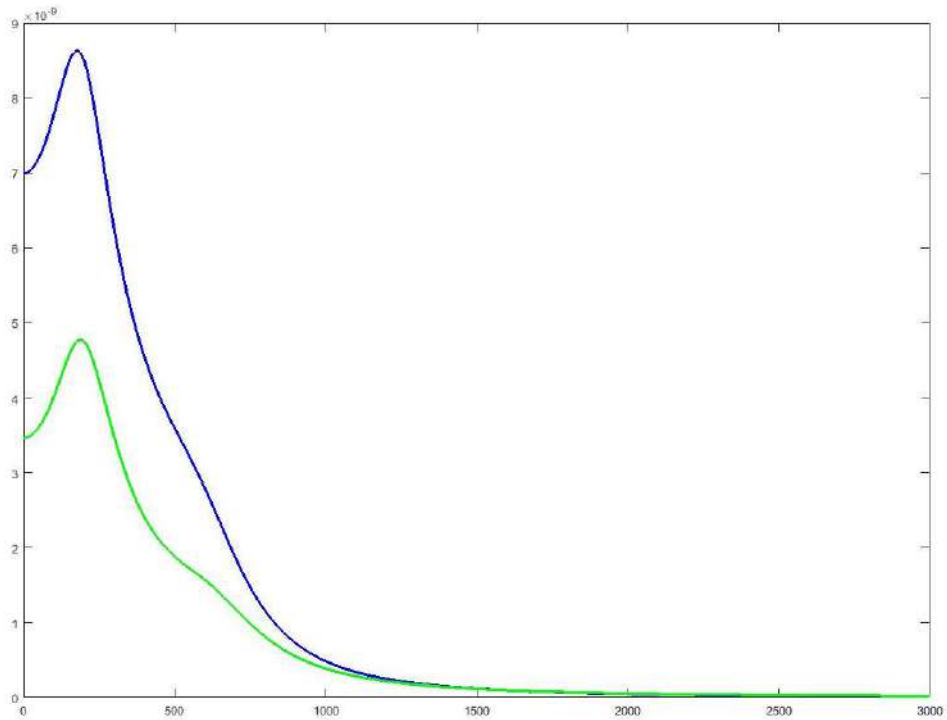
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.11 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{M3}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



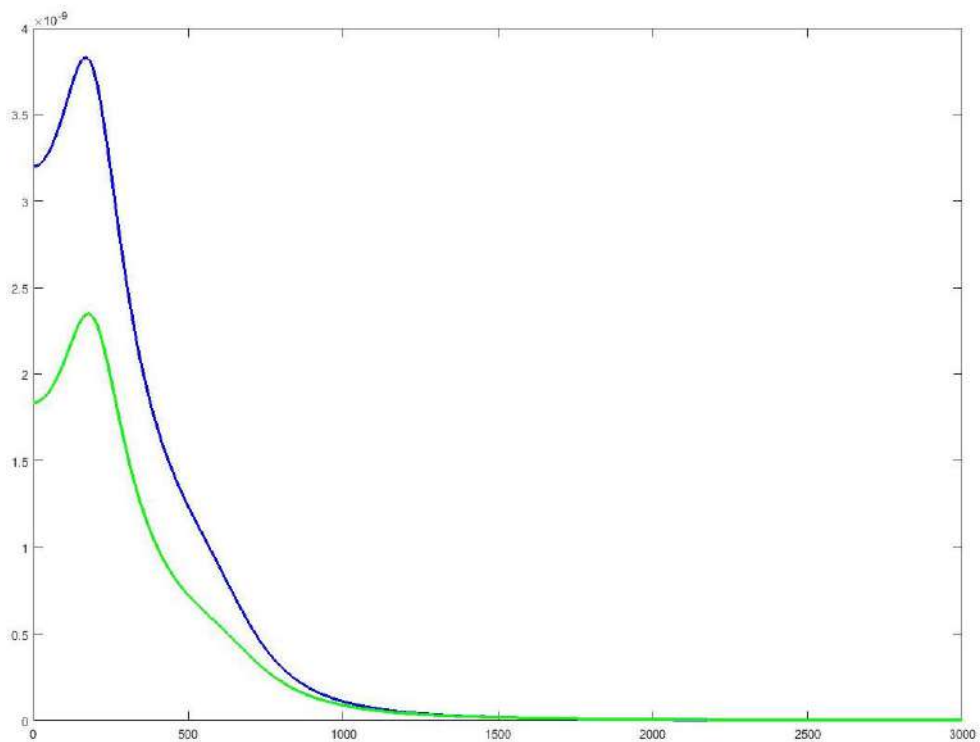
Синий цвет соответствует первому слою, красный – второму, зеленый – третьему
 Рисунок А.12. – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{Mi}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



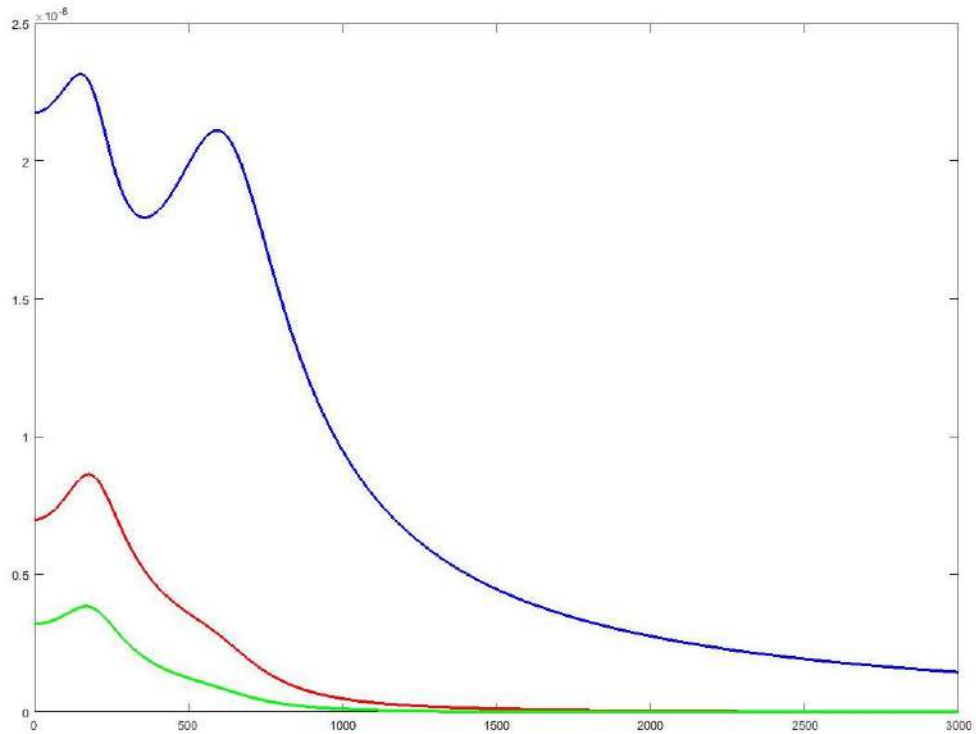
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.13 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{z1}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



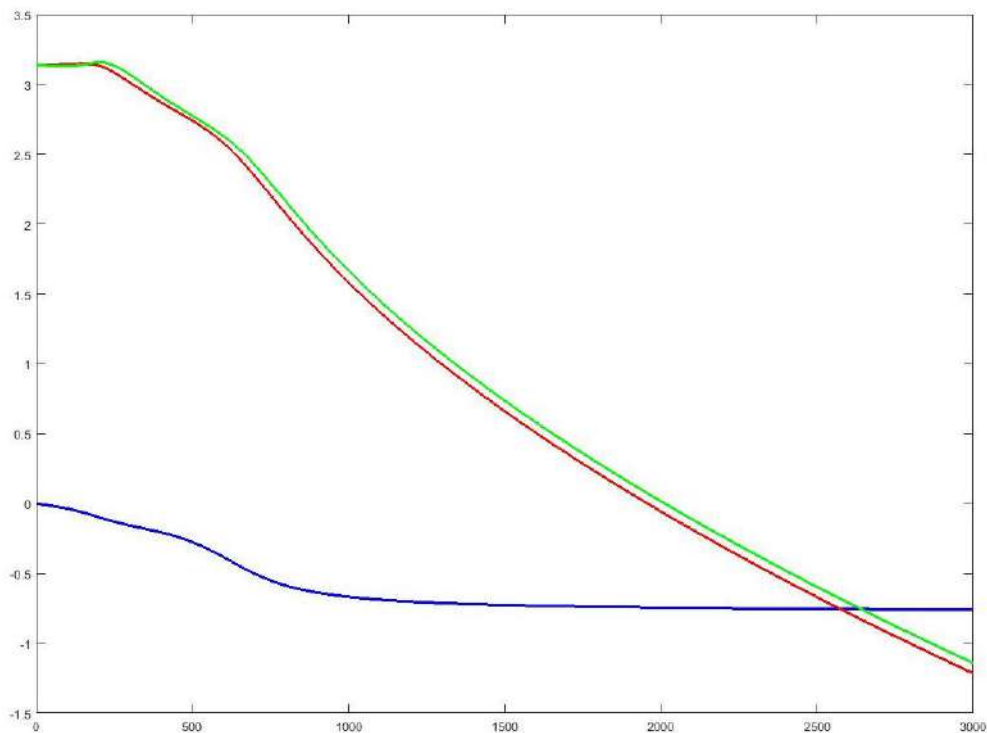
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.14 –. Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{z2}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



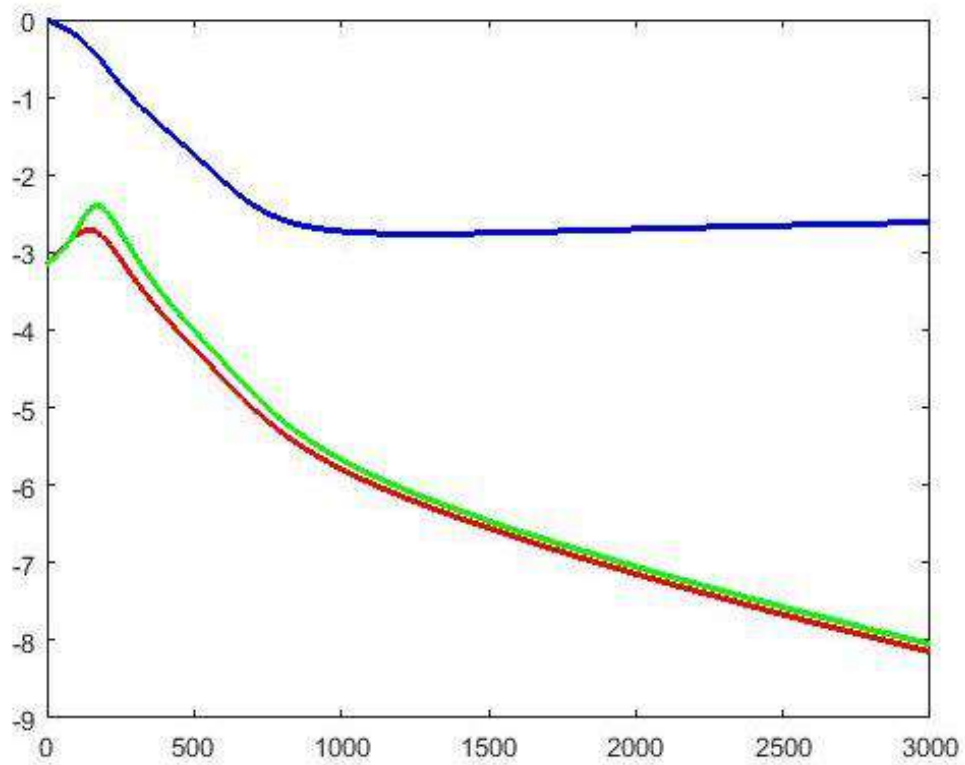
Синий цвет соответствует $u = 0$, зеленый – $u = \pm 185$ см
 Рисунок А.15 –. Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{z3}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



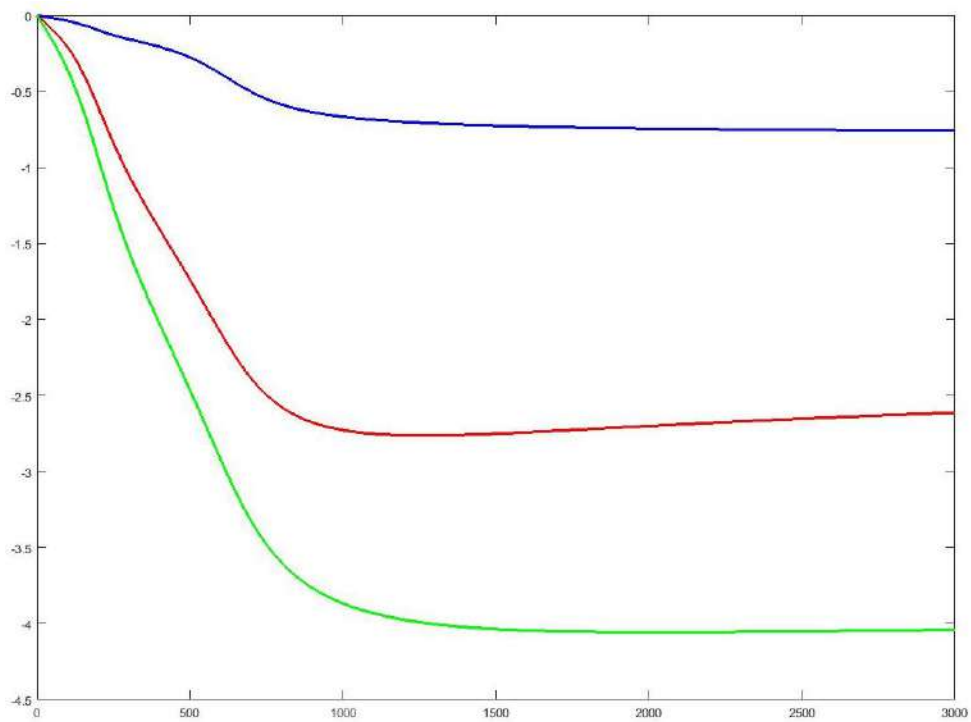
Синий цвет соответствует первому слою, красный – второму, зеленый – третьему
 Рисунок А.16 –. Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{zi}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 0$ км/ч



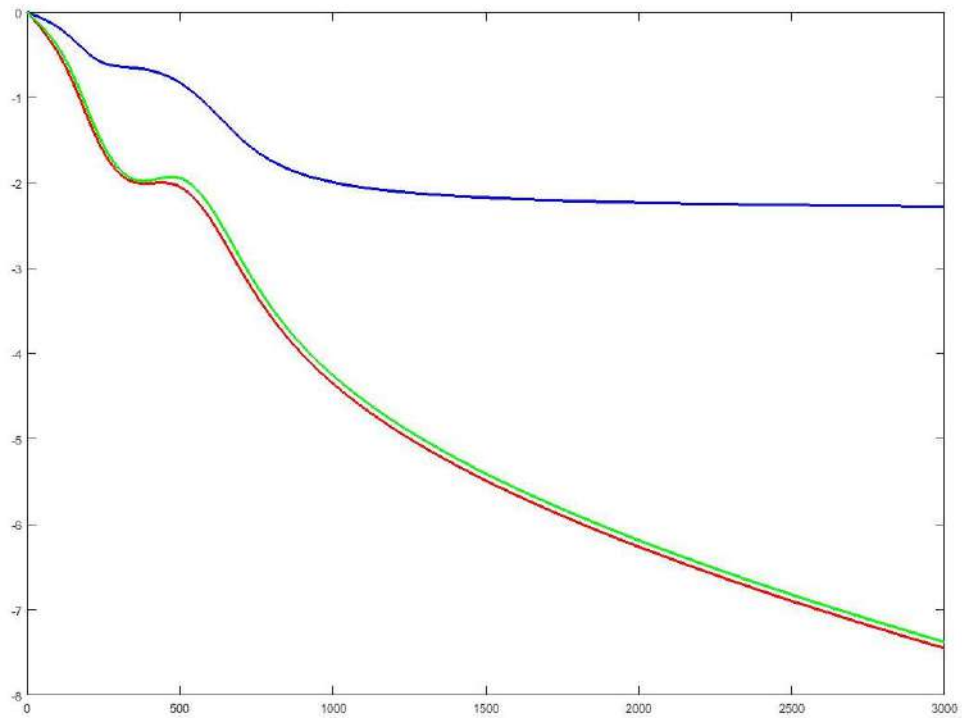
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.17 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{M1}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



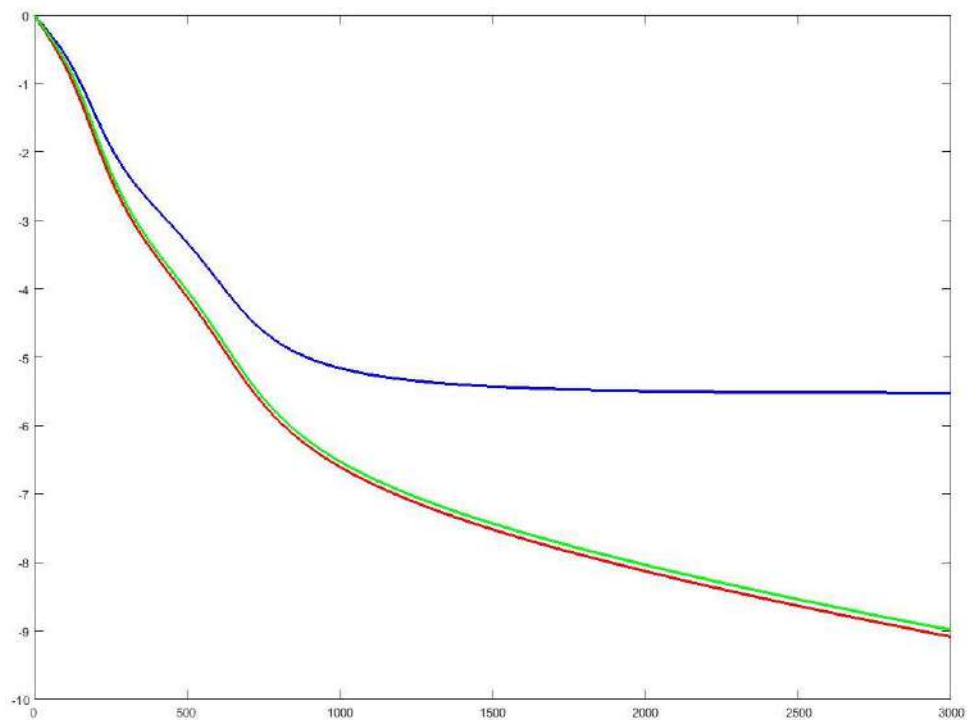
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.18 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{M2}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



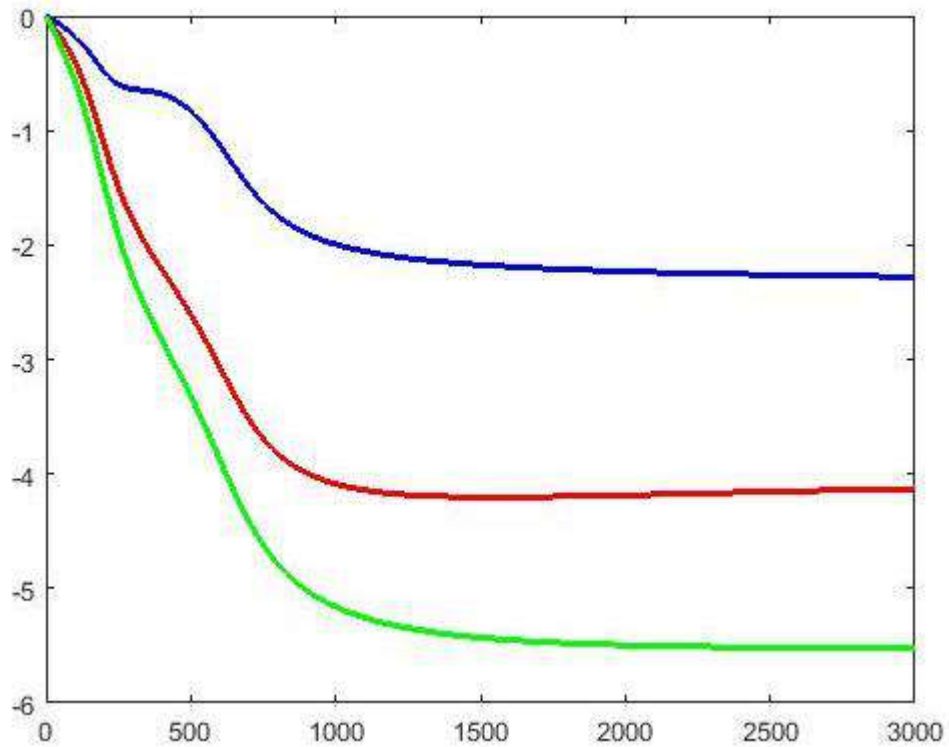
Синий цвет соответствует первому слою, красный – второму, зеленый – третьему
 Рисунок А.19 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{Mi}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



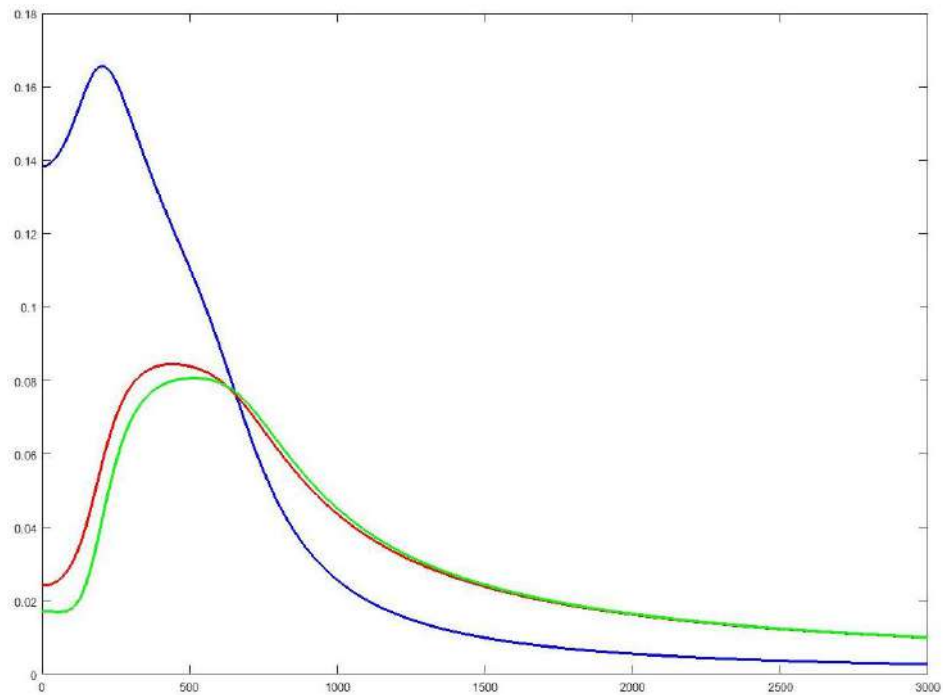
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.20 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{z1}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



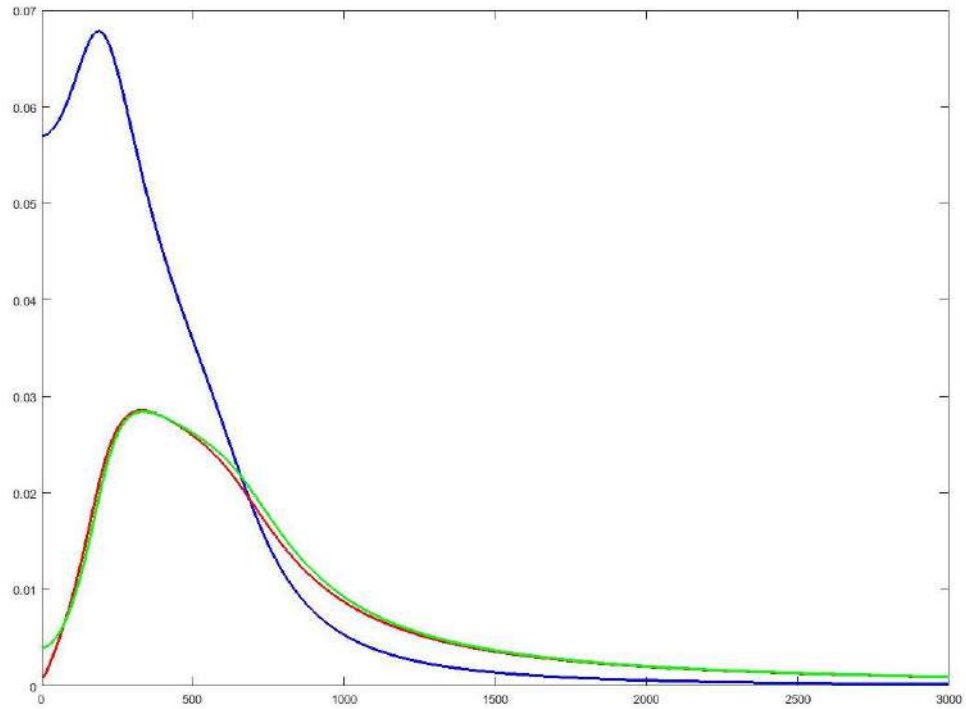
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.21 –. Графики фазово-частотных характеристик $W_{z3}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



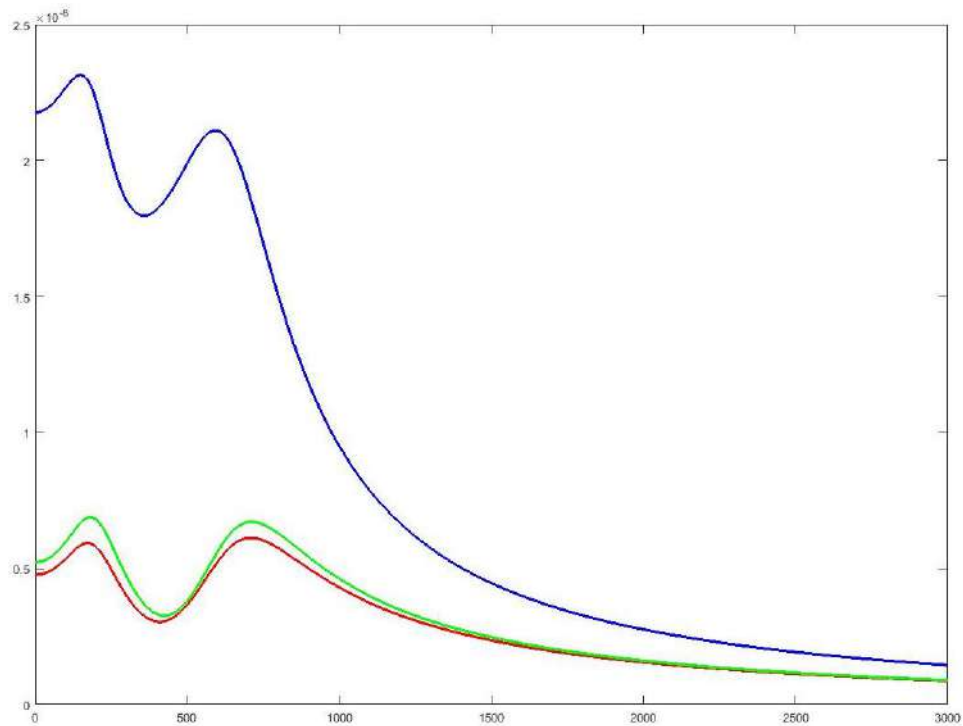
Синий цвет соответствует первому слою, красный – второму, зеленый – третьему
 Рисунок А.22 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{zi}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



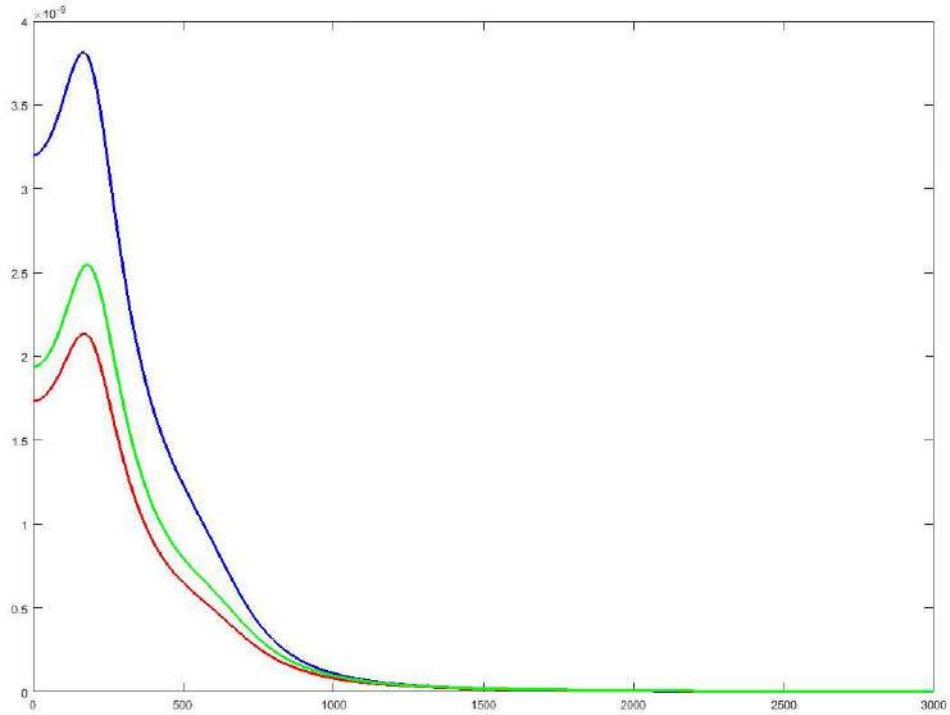
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.23 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{M2}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



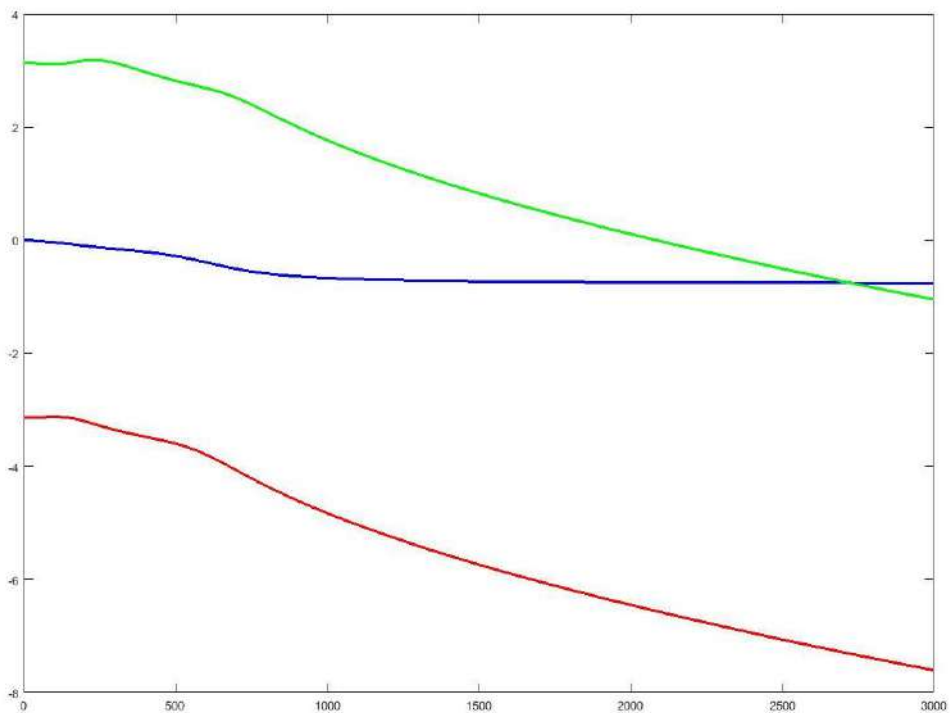
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.24 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{M3}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



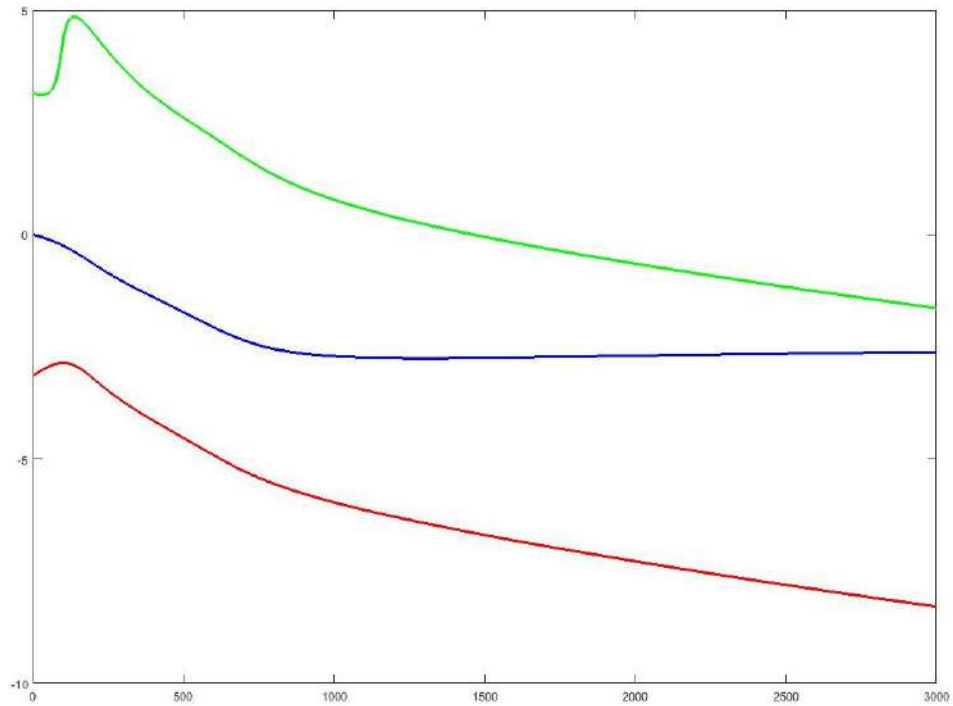
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.25 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{z1}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



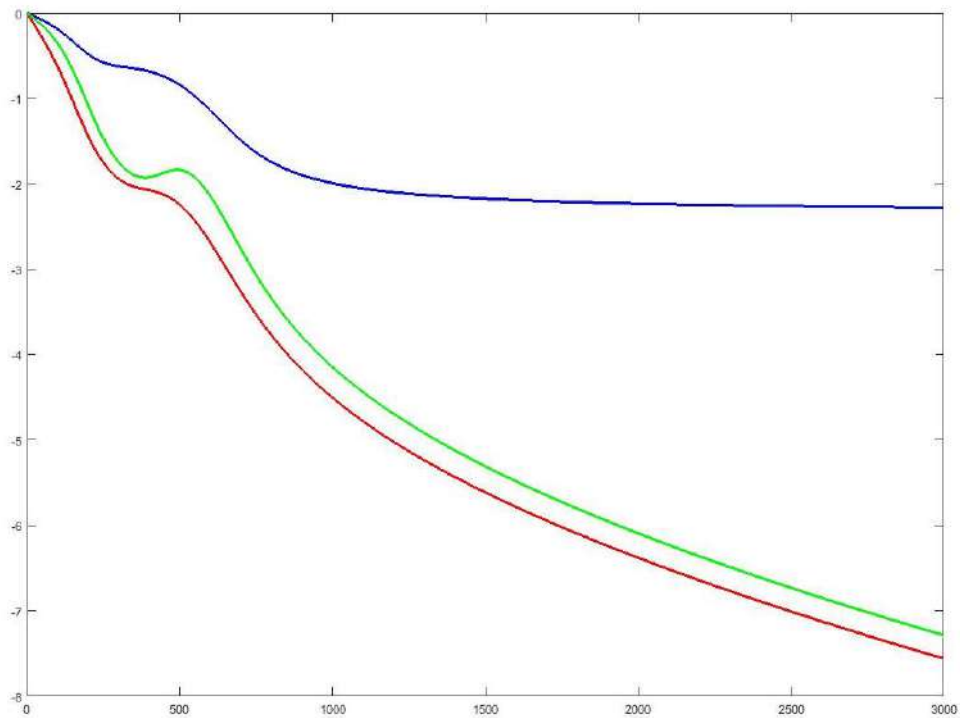
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.26 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{z3}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 80$ км/ч



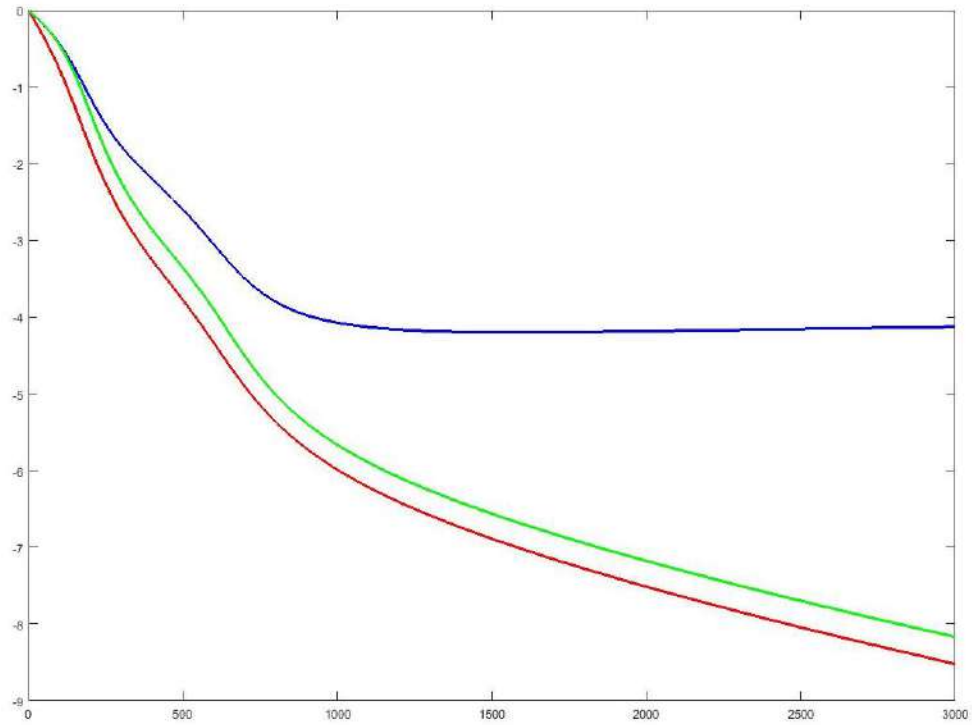
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.27 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{M1}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



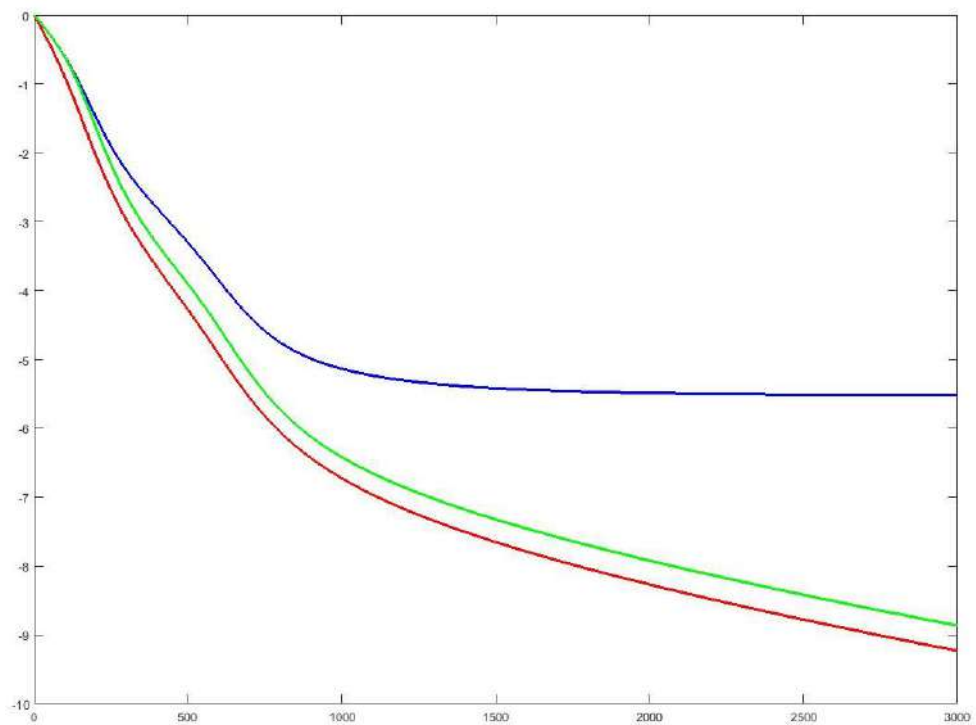
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.28 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{M2}(u, \omega)$
 при скорости движения $v = 300$ км/ч



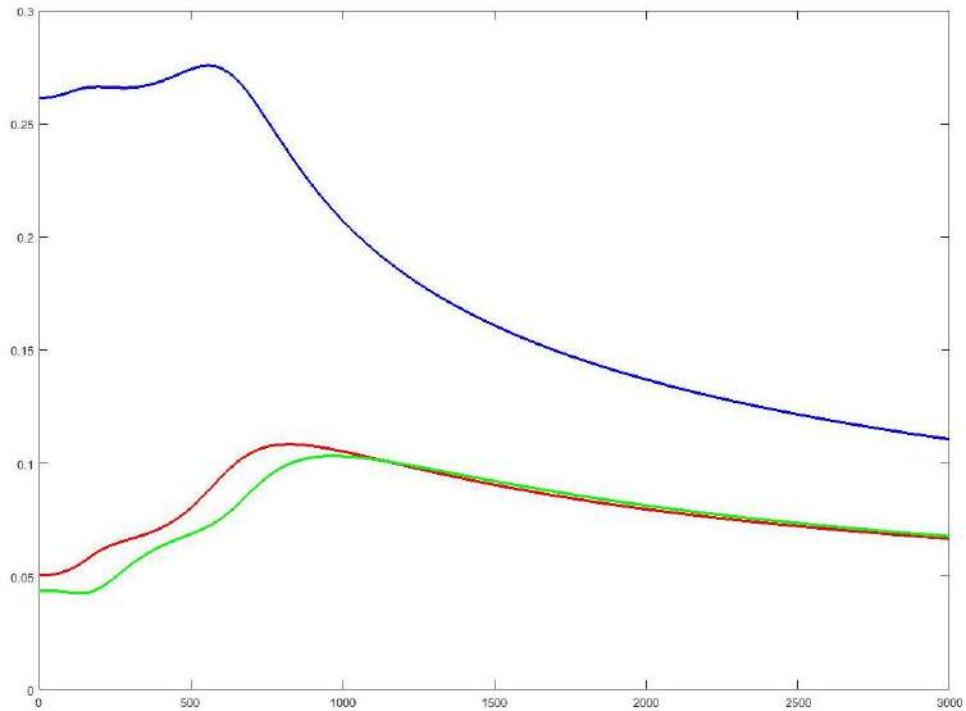
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.29 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{Z1}(u, \omega)$ при скорости
 движения $v = 300$ км/ч



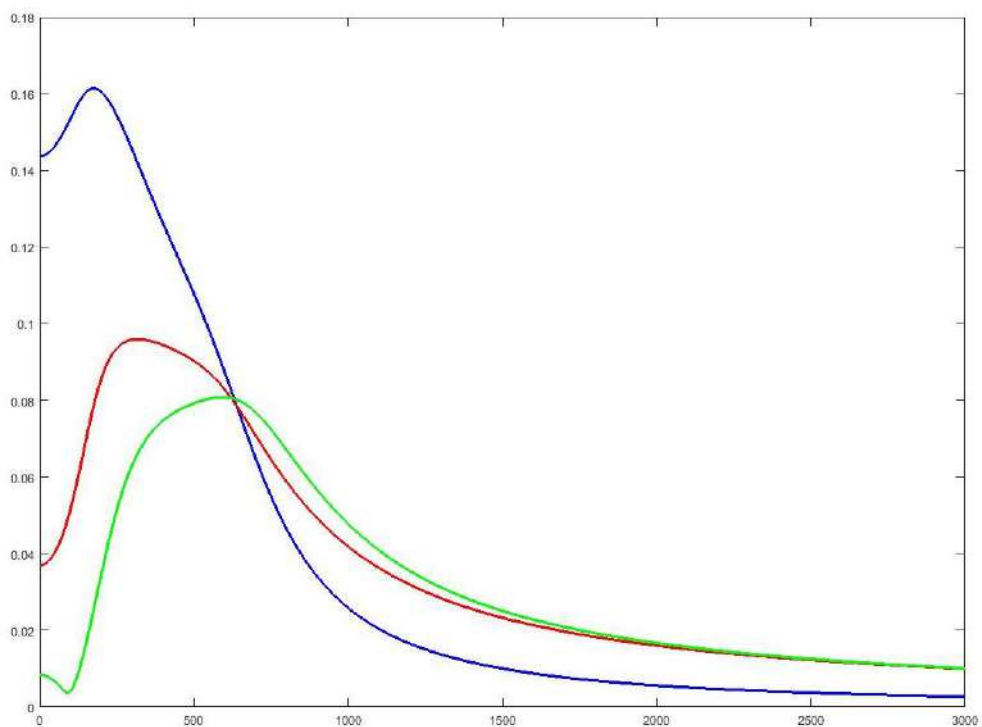
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.30 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{z2}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



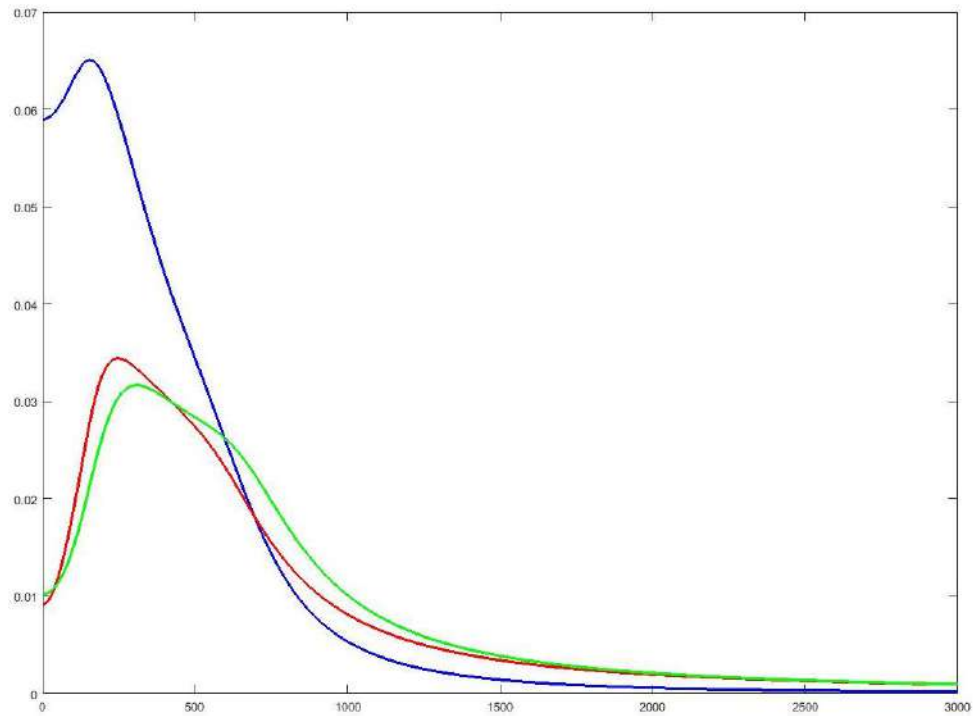
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.31 – Графики фазово-частотных характеристик $W_{z3}(u, \omega)$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



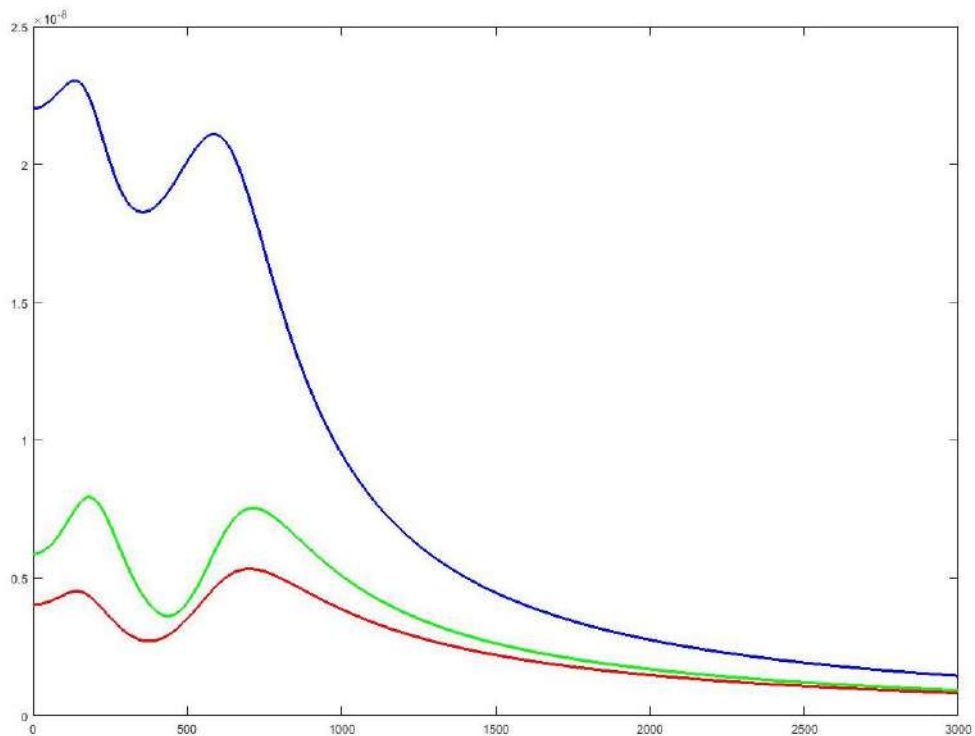
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.32 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{M1}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



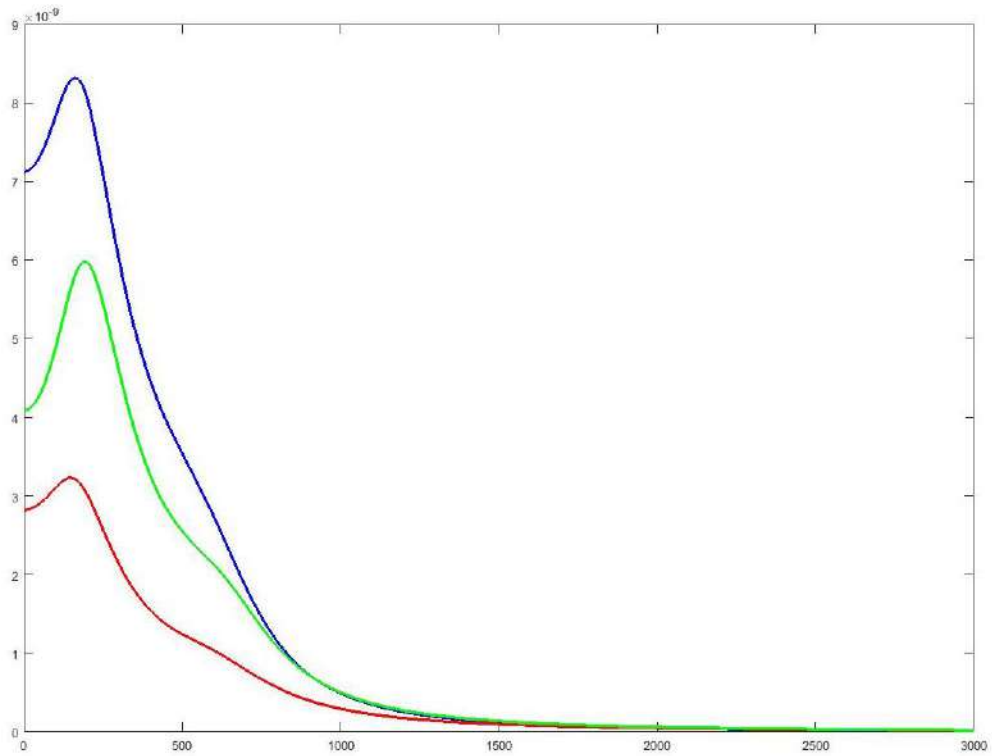
Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.33 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{M2}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.34 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{M3}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
 Рисунок А.35 – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{z1}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 300$ км/ч



Синий цвет соответствует $u = 0$, красный – $u = +185$ см, зеленый – $u = -185$ см
Рисунок А.36. – Графики амплитудно-частотных характеристик $|W_{z2}(u, \omega)|$ при скорости движения $v = 300$ км/ч

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Листинг программы для проведения расчетов

```

Подпрограмма « equation2»
function [Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2,
Wm3]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,uu,w)
a1=m1*v^2/(E1*I1);
a2=-v*(f1+m1*w*1i)/(E1*I1);
a3=(U1-m1*w^2+f1*w*1i)/(E1*I1);
a4=f1*v/(E2*I2);
a5=-(U1+f1*w*1i)/(E2*I2);
b1=f1*v/(E1*I1);
b2=-(U1+f1*w*1i)/(E1*I1);
b3=m2*v^2/(E2*I2);
b4=-v*(f1+f2+2*m2*w*1i)/(E2*I2);
b5=(U1+U2-m2*w^2+w*(f1+f2)*1i)/(E2*I2);
b6=f2*v/(E3*I3);
b7=-(U2+f2*w*1i)/(E3*I3);
c1=f2*v/(E2*I2);
c2=-(U2+f2*w*1i)/(E2*I2);
c3=m3*v^2/(E3*I3);
c4=-v*(f2+f3+2*m3*w*1i)/(E3*I3);
c5=(U2+U3-m3*w^2+w*(f2+f3)*1i)/(E3*I3);
syms M(l)
M(l)=[l^4+a1*l^2+a2*l+a3,b1*l+b2,0];
[a4*l+a5,l^4+b3*l^2+b4*l+b5,c1*l+c2];
[0,b6*l+b7,l^4+c3*l^2+c4*l+c5]];
r10=a1+b3+c3;
r9=a2+b4+c4;
r8=a3+b5+c5+a1*b3+a1*c3+b3*c3;
r7=a1*b4+b3*a2+a1*c4+c3*a2+b3*c4+c3*b4;
r6=a1*b5+b3*a3+a1*c5+c3*a3+b3*c5+c3*b5+a2*b4+a2*c4+b4*c4-a4*b1-b6*c1+a1*b3*c3;
r5=a2*b5-b1*a5-b6*c2-c1*b7-
a4*b2+a3*b4+a2*c5+a3*c4+b4*c5+b5*c4+a1*b3*c4+a1*c3*b4+b3*c3*a2;
r4=a3*b5-a5*b2+a3*c5-b7*c2+b5*c5+a1*b4*c4+b3*a2*c4+c3*a2*b4-a1*b6*c1-
a4*b1*c3+a1*b3*c5+a1*c3*b5+b3*c3*a3;
r3=a1*b4*c5+a1*b5*c4+b3*a2*c5+b3*a3*c4+c3*a2*b5+c3*a3*b4+a2*b4*c4-a1*b6*c2-
a1*c1*b7-a4*b1*c4-a4*c3*b2-b1*c3*a5-b6*c1*a2;
r2=a1*b5*c5-a4*b2*c4-b1*a5*c4-b6*a2*c2-c1*a2*b7-c3*a5*b2-
a1*b7*c2+b3*a3*c5+c3*a3*b5+a2*b4*c5+a2*b5*c4+a3*b4*c4-a4*b1*c5-b6*c1*a3;
r1=a2*b5*c5-b1*a5*c5-b6*a3*c2-c1*a3*b7-a2*b7*c2-a5*b2*c4-
a4*b2*c5+a3*b4*c5+a3*b5*c4;
r0=a3*b5*c5-a5*b2*c5-a3*b7*c2;
R=[1 0 r10 r9 r8 r7 r6 r5 r4 r3 r2 r1 r0];
S=roots(R);
y=[[real(S(1)),imag(S(1))];
[real(S(2)),imag(S(2))];
[real(S(3)),imag(S(3))];

```

```

[real(S(4)),imag(S(4))];
[real(S(5)),imag(S(5))];
[real(S(6)),imag(S(6))];
[real(S(7)),imag(S(7))];
[real(S(8)),imag(S(8))];
[real(S(9)),imag(S(9))];
[real(S(10)),imag(S(10))];
[real(S(11)),imag(S(11))];
[real(S(12)),imag(S(12))]];
z=sortrows(y,1);
l1=z(1,1)+1i*z(1,2);
l3=z(2,1)+1i*z(2,2);
l5=z(3,1)+1i*z(3,2);
l7=z(4,1)+1i*z(4,2);
l9=z(5,1)+1i*z(5,2);
l11=z(6,1)+1i*z(6,2);
l12=z(7,1)+1i*z(7,2);
l4=z(8,1)+1i*z(8,2);
l6=z(9,1)+1i*z(9,2);
l8=z(10,1)+1i*z(10,2);
l10=z(11,1)+1i*z(11,2);
l12=z(12,1)+1i*z(12,2);
Lm=[l1 l2 l3 l4 l5 l6 l7 l8 l9 l10 l11 l12];
L=[[1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1];
[l1^1 -l2^1 l3^1 -l4^1 l5^1 -l6^1 l7^1 -l8^1 l9^1 -l10^1 l11^1 -l12^1];
[l1^2 -l2^2 l3^2 -l4^2 l5^2 -l6^2 l7^2 -l8^2 l9^2 -l10^2 l11^2 -l12^2];
[l1^3 -l2^3 l3^3 -l4^3 l5^3 -l6^3 l7^3 -l8^3 l9^3 -l10^3 l11^3 -l12^3];
[l1^4 -l2^4 l3^4 -l4^4 l5^4 -l6^4 l7^4 -l8^4 l9^4 -l10^4 l11^4 -l12^4];
[l1^5 -l2^5 l3^5 -l4^5 l5^5 -l6^5 l7^5 -l8^5 l9^5 -l10^5 l11^5 -l12^5];
[l1^6 -l2^6 l3^6 -l4^6 l5^6 -l6^6 l7^6 -l8^6 l9^6 -l10^6 l11^6 -l12^6];
[l1^7 -l2^7 l3^7 -l4^7 l5^7 -l6^7 l7^7 -l8^7 l9^7 -l10^7 l11^7 -l12^7];
[l1^8 -l2^8 l3^8 -l4^8 l5^8 -l6^8 l7^8 -l8^8 l9^8 -l10^8 l11^8 -l12^8];
[l1^9 -l2^9 l3^9 -l4^9 l5^9 -l6^9 l7^9 -l8^9 l9^9 -l10^9 l11^9 -l12^9];
[l1^10 -l2^10 l3^10 -l4^10 l5^10 -l6^10 l7^10 -l8^10 l9^10 -l10^10 l11^10 -l12^10];
[l1^11 -l2^11 l3^11 -l4^11 l5^11 -l6^11 l7^11 -l8^11 l9^11 -l10^11 l11^11 -l12^11]];
g9=a4*b6/(E1*I1);
g10=(a5*b6+a4*b7)/(E1*I1);
g11=(a5*b7-a4*b6*(a1+b3+c3))/(E1*I1);
G=[0;0;0;0;0;0;0;0;g9;g10;g11];
CC=L^(-1)*G;
BB=0;
AA=0;
for ii=1:12
AA(ii)=CC(ii)*((Lm(ii)^4+c3*Lm(ii)^2+c4*Lm(ii)+c5)*(Lm(ii)^4+b3*Lm(ii)^2+b4*Lm(ii)+b5)-
(b6*Lm(ii)+b7)*(c1*Lm(ii)+c2))/(b6*Lm(ii)+b7)/(a4*Lm(ii)+a5);
BB(ii)=-CC(ii)*(Lm(ii)^4+c3*Lm(ii)^2+c4*Lm(ii)+c5)/(b6*Lm(ii)+b7);
end
Wz11=0;
Wz12=0;
Wz21=0;
Wz22=0;
Wz31=0;

```

```

Wz32=0;
Wm11=0;
Wm12=0;
Wm21=0;
Wm22=0;
Wm31=0;
Wm32=0;
for ii=1:6
Wz11=Wz11+AA(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1));
Wz12=Wz12+AA(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii));
Wz21=Wz21+BB(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1));
Wz22=Wz22+BB(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii));
Wz31=Wz31+CC(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1));
Wz32=Wz32+CC(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii));
end
for ii=1:6
Wm11=Wm11-E1*I1*Lm(2*ii-1)^2*AA(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1));
Wm12=Wm12-E1*I1*Lm(2*ii)^2*AA(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii));
Wm21=Wm21-E2*I2*Lm(2*ii-1)^2*BB(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1));
Wm22=Wm22-E2*I2*Lm(2*ii)^2*BB(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii));
Wm31=Wm31-E3*I3*Lm(2*ii-1)^2*CC(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1));
Wm32=Wm32-E3*I3*Lm(2*ii)^2*CC(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii));
end
if(uu<0)
    Wz1=Wz12;
    Wz2=Wz22;
    Wz3=Wz32;
    Wm1=Wm12;
    Wm2=Wm22;
    Wm3=Wm32;
else
    Wz1=Wz11;
    Wz2=Wz21;
    Wz3=Wz31;
    Wm1=Wm11;
    Wm2=Wm21;
    Wm3=Wm31;
end
end

```

Подпрограмма «findDE»

```

function [uz1,uz2,uz3,um1,um2,um3] =
findDE(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,MM1,MM0,r1,c1,ck0,ts)
d=1.85;
l=22;
h1=0.018;
h2=0.54;
h3=0.7;
W1=2*I1/h1;
W2=2*I2/h2;
W3=2*I3/h3;

```

```

[Wz10, Wz20, Wz30, Wm10, Wm20,
Wm30]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,0);
[Wz10_md, Wz20_md, Wz30_md, Wm10_md, Wm20_md,
Wm30_md]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d,0);
[Wz10_ml, Wz20_ml, Wz30_ml, Wm10_ml, Wm20_ml,
Wm30_ml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-1,0);
[Wz10_mdl, Wz20_mdl, Wz30_mdl, Wm10_mdl, Wm20_mdl,
Wm30_mdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d-1,0);
dQ=9.8*500*[ts;ts;ts;ts];
Wz1Q0=[Wz10,Wz10_md,Wz10_ml,Wz10_mdl];
Wz2Q0=[Wz20,Wz20_md,Wz20_ml,Wz20_mdl];
Wz3Q0=[Wz30,Wz30_md,Wz30_ml,Wz30_mdl];
dz1=Wz1Q0*dQ
dz2=Wz2Q0*dQ
dz3=Wz3Q0*dQ
Wm1Q0=[Wm10,Wm10_md,Wm10_ml,Wm10_mdl];
Wm2Q0=[Wm20,Wm20_md,Wm20_ml,Wm20_mdl];
Wm3Q0=[Wm30,Wm30_md,Wm30_ml,Wm30_mdl];
dm1=Wm1Q0*dQ/W1
dm2=Wm2Q0*dQ/W2
dm3=Wm3Q0*dQ/W3
SEspec=findspec(v,1,1000,1);
for w=1:1000
[Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2,
Wm3]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,w);
[Wz1_md, Wz2_md, Wz3_md, Wm1_md, Wm2_md,
Wm3_md]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d,w);
[Wz1_ml, Wz2_ml, Wz3_ml, Wm1_ml, Wm2_ml,
Wm3_ml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-1,w);
[Wz1_mdl, Wz2_mdl, Wz3_mdl, Wm1_mdl, Wm2_mdl,
Wm3_mdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d-1,w);
[Wz1_mdpl, Wz2_mdpl, Wz3_mdpl, Wm1_mdpl, Wm2_mdpl,
Wm3_mdpl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d+1,w);
[Wz1_mlpd, Wz2_mlpd, Wz3_mlpd, Wm1_mlpd, Wm2_mlpd,
Wm3_mlpd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-1+d,w);
[Wz1_pd, Wz2_pd, Wz3_pd, Wm1_pd, Wm2_pd,
Wm3_pd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d,w);
[Wz1_pl, Wz2_pl, Wz3_pl, Wm1_pl, Wm2_pl,
Wm3_pl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,l,w);
[Wz1_pdl, Wz2_pdl, Wz3_pdl, Wm1_pdl, Wm2_pdl,
Wm3_pdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d+1,w);
Wz1Q=[[Wz1,Wz1_md,Wz1_ml,Wz1_mdl];
[Wz1_pd,Wz1,Wz1_mlpd,Wz1_ml];
[Wz1_pl,Wz1_mdpl,Wz1,Wz1_md];
[Wz1_pdl,Wz1_pl,Wz1_pd,Wz1]];
Wz2Q=[[Wz2,Wz2_md,Wz2_ml,Wz2_mdl];
[Wz2_pd,Wz2,Wz2_mlpd,Wz2_ml];
[Wz2_pl,Wz2_mdpl,Wz2,Wz2_md];
[Wz2_pdl,Wz2_pl,Wz2_pd,Wz2]];
Wz3Q=[[Wz3,Wz3_md,Wz3_ml,Wz3_mdl];
[Wz3_pd,Wz3,Wz3_mlpd,Wz3_ml];
[Wz3_pl,Wz3_mdpl,Wz3,Wz3_md];

```

```

[Wz3_pdl,Wz3_pl,Wz3_pd,Wz3]];
E=[[1,0,0,0];
[0,1,0,0];
[0,0,1,0];
[0,0,0,1]];
e=exp(1);
R=[[1,e^(-d*1i*w/v),e^(-1*1i*w/v),e^((-1-d)*1i*w/v)];
[e^(-d*1i*w/v),1,e^((-1+d)*1i*w/v),e^(-1*1i*w/v)];
[e^(1*1i*w/v),e^((-d+1)*1i*w/v),1,e^(-d*1i*w/v)];
[e^((1+d)*1i*w/v),e^(1*1i*w/v),e^(d*1i*w/v),1]];
SE=SEspec(w)*R;
W0=vosc(MM1,MM0,r1,c1,w);
Wp=(-Wz1Q+W0-ck0*E)^(-1);
SQ=conj(Wp)*SE*Wp';
Sz1=conj(Wz1Q)*SQ*Wz1Q';
Sz2=conj(Wz2Q)*SQ*Wz2Q';
Sz3=conj(Wz3Q)*SQ*Wz3Q';
Wm1Q=[[Wm1,Wm1_md,Wm1_ml,Wm1_mdl];
[Wm1_pd,Wm1,Wm1_mlpd,Wm1_ml];
[Wm1_pl,Wm1_mdpl,Wm1,Wm1_md];
[Wm1_pdl,Wm1_pl,Wm1_pd,Wm1]];
Wm2Q=[[Wm2,Wm2_md,Wm2_ml,Wm2_mdl];
[Wm2_pd,Wm2,Wm2_mlpd,Wm2_ml];
[Wm2_pl,Wm2_mdpl,Wm2,Wm2_md];
[Wm2_pdl,Wm2_pl,Wm2_pd,Wm2]];
Wm3Q=[[Wm3,Wm3_md,Wm3_ml,Wm3_mdl];
[Wm3_pd,Wm3,Wm3_mlpd,Wm3_ml];
[Wm3_pl,Wm3_mdpl,Wm3,Wm3_md];
[Wm3_pdl,Wm3_pl,Wm3_pd,Wm3]];
Sm1=conj(Wm1Q)*SQ*Wm1Q'/W1/W1;
Sm2=conj(Wm2Q)*SQ*Wm2Q'/W2/W2;
Sm3=conj(Wm3Q)*SQ*Wm3Q'/W3/W3;
isz11(w)=Sz1(1,1);
isz12(w)=Sz1(2,2);
isz13(w)=Sz1(3,3);
isz14(w)=Sz1(4,4);
isz21(w)=Sz2(1,1);
isz22(w)=Sz2(2,2);
isz23(w)=Sz2(3,3);
isz24(w)=Sz2(4,4);
isz31(w)=Sz3(1,1);
isz32(w)=Sz3(2,2);
isz33(w)=Sz3(3,3);
isz34(w)=Sz3(4,4);
ism11(w)=Sm1(1,1);
ism12(w)=Sm1(2,2);
ism13(w)=Sm1(3,3);
ism14(w)=Sm1(4,4);
ism21(w)=Sm2(1,1);
ism22(w)=Sm2(2,2);
ism23(w)=Sm2(3,3);
ism24(w)=Sm2(4,4);

```



```

ism31(w)=Sm3(1,1);
ism32(w)=Sm3(2,2);
ism33(w)=Sm3(3,3);
ism34(w)=Sm3(4,4);

X(w)=w;
end
Iz11=trapz(X,isz11);
Iz12=trapz(X,isz12);
Iz13=trapz(X,isz13);
Iz14=trapz(X,isz14);
Iz21=trapz(X,isz21);
Iz22=trapz(X,isz22);
Iz23=trapz(X,isz23);
Iz24=trapz(X,isz24);
Iz31=trapz(X,isz31);
Iz32=trapz(X,isz32);
Iz33=trapz(X,isz33);
Iz34=trapz(X,isz34);
Im11=trapz(X,ism11);
Im12=trapz(X,ism12);
Im13=trapz(X,ism13);
Im14=trapz(X,ism14);
Im21=trapz(X,ism21);
Im22=trapz(X,ism22);
Im23=trapz(X,ism23);
Im24=trapz(X,ism24);
Im31=trapz(X,ism31);
Im32=trapz(X,ism32);
Im33=trapz(X,ism33);
Im34=trapz(X,ism34);
Dz1=(Iz11+Iz12+Iz13+Iz14)*1/4
Dz2=(Iz21+Iz22+Iz23+Iz24)*1/4
Dz3=(Iz31+Iz32+Iz33+Iz34)*1/4
Dm1=(Im11+Im12+Im13+Im14)*1/4
Dm2=(Im21+Im22+Im23+Im24)*1/4
Dm3=(Im31+Im32+Im33+Im34)*1/4
uz1=dz1^2+Dz1;
uz2=dz2^2+Dz2;
uz3=dz3^2+Dz3;
um1=dm1^2+Dm1;
um2=dm2^2+Dm2;
um3=dm3^2+Dm3;
end

```

Подпрограмма «findDSqE»

```

function [A] = findDSqE(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,kf)
filename = 'Spectr.xlsx';
filename2 = 'knv.xlsx';
x=v*100*xlsread(filename,1,'A:A')/6.28;
y=10^-6*xlsread(filename,1,'B:B')*6.28;
xi=round(min(x)):0.005:round(max(x));

```

```

z=interp1(x,y,xi,'linear');
d=1.85;
l=22;
h1=0.18;
h2=0.24;
h3=0.3;
Wx1=2.91*10^-4;
Wx2=2*I2/h2;
Wx3=2*I3/h3;
It=0.133*10^4;
Iv=0.129*10^6;
M0=2750*kf;
M1=91400*kf;
r1=71500;
c1=8.55*10^6;
ck0=5*10^8;
ts=(M0+M1)/4000;
dQ=9.8*500*[ts;ts;ts];
[Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2,
Wm3]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,0);
[Wz1_md, Wz2_md, Wz3_md, Wm1_md, Wm2_md,
Wm3_md]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d,0);
[Wz1_ml, Wz2_ml, Wz3_ml, Wm1_ml, Wm2_ml,
Wm3_ml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-l,0);
[Wz1_md1, Wz2_md1, Wz3_md1, Wm1_md1, Wm2_md1,
Wm3_md1]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d-l,0);
[Wz1_mdpl, Wz2_mdpl, Wz3_mdpl, Wm1_mdpl, Wm2_mdpl,
Wm3_mdpl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d+l,0);
[Wz1_mlpd, Wz2_mlpd, Wz3_mlpd, Wm1_mlpd, Wm2_mlpd,
Wm3_mlpd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-l+d,0);
[Wz1_pd, Wz2_pd, Wz3_pd, Wm1_pd, Wm2_pd,
Wm3_pd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d,0);
[Wz1_pl, Wz2_pl, Wz3_pl, Wm1_pl, Wm2_pl,
Wm3_pl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,l,0);
[Wz1_pdl, Wz2_pdl, Wz3_pdl, Wm1_pdl, Wm2_pdl,
Wm3_pdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d+l,0);
Wz1Q0=[[Wz1,Wz1_md,Wz1_ml,Wz1_md1];
[Wz1_pd,Wz1,Wz1_mlpd,Wz1_ml];
[Wz1_pl,Wz1_mdpl,Wz1,Wz1_md];
[Wz1_pdl,Wz1_pl,Wz1_pd,Wz1]];
Wz2Q0=[[Wz2,Wz2_md,Wz2_ml,Wz2_md1];
[Wz2_pd,Wz2,Wz2_mlpd,Wz2_ml];
[Wz2_pl,Wz2_mdpl,Wz2,Wz2_md];
[Wz2_pdl,Wz2_pl,Wz2_pd,Wz2]];
Wz3Q0=[[Wz3,Wz3_md,Wz3_ml,Wz3_md1];
[Wz3_pd,Wz3,Wz3_mlpd,Wz3_ml];
[Wz3_pl,Wz3_mdpl,Wz3,Wz3_md];
[Wz3_pdl,Wz3_pl,Wz3_pd,Wz3]];
Wm1Q0=[[Wm1,Wm1_md,Wm1_ml,Wm1_md1];
[Wm1_pd,Wm1,Wm1_mlpd,Wm1_ml];
[Wm1_pl,Wm1_mdpl,Wm1,Wm1_md];
[Wm1_pdl,Wm1_pl,Wm1_pd,Wm1]];

```

```

Wm2Q0=[[Wm2,Wm2_md,Wm2_ml,Wm2_mdl];
        [Wm2_pd,Wm2,Wm2_mlpd,Wm2_ml];
        [Wm2_pl,Wm2_mdpl,Wm2,Wm2_md];
        [Wm2_pdl,Wm2_pl,Wm2_pd,Wm2]];
Wm3Q0=[[Wm3,Wm3_md,Wm3_ml,Wm3_mdl];
        [Wm3_pd,Wm3,Wm3_mlpd,Wm3_ml];
        [Wm3_pl,Wm3_mdpl,Wm3,Wm3_md];
        [Wm3_pdl,Wm3_pl,Wm3_pd,Wm3]];
dz1=abs(sum(Wz1Q0*dQ)/4);
dz2=abs(sum(Wz2Q0*dQ)/4);
dz3=abs(sum(Wz3Q0*dQ)/4);
dm1=abs(sum(Wm1Q0*dQ/Wx1)/4);
dm2=abs(sum(Wm2Q0*dQ/Wx2)/4);
dm3=abs(sum(Wm3Q0*dQ/Wx3)/4);
for s=1:0.1:round(130*v/80*3.6)-1
    w=s;
    [Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2,
Wm3]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,w);
    [Wz1_md, Wz2_md, Wz3_md, Wm1_md, Wm2_md,
Wm3_md]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d,w);
    [Wz1_ml, Wz2_ml, Wz3_ml, Wm1_ml, Wm2_ml,
Wm3_ml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-l,w);
    [Wz1_mdl, Wz2_mdl, Wz3_mdl, Wm1_mdl, Wm2_mdl,
Wm3_mdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d-l,w);
    [Wz1_mdpl, Wz2_mdpl, Wz3_mdpl, Wm1_mdpl, Wm2_mdpl,
Wm3_mdpl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d+l,w);
    [Wz1_mlpd, Wz2_mlpd, Wz3_mlpd, Wm1_mlpd, Wm2_mlpd,
Wm3_mlpd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-l+d,w);
    [Wz1_pd, Wz2_pd, Wz3_pd, Wm1_pd, Wm2_pd,
Wm3_pd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d,w);
    [Wz1_pl, Wz2_pl, Wz3_pl, Wm1_pl, Wm2_pl,
Wm3_pl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,l,w);
    [Wz1_pdl, Wz2_pdl, Wz3_pdl, Wm1_pdl, Wm2_pdl,
Wm3_pdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d+l,w);
    Wz1Q=[[Wz1,Wz1_md,Wz1_ml,Wz1_mdl];
          [Wz1_pd,Wz1,Wz1_mlpd,Wz1_ml];
          [Wz1_pl,Wz1_mdpl,Wz1,Wz1_md];
          [Wz1_pdl,Wz1_pl,Wz1_pd,Wz1]];
    Wz2Q=[[Wz2,Wz2_md,Wz2_ml,Wz2_mdl];
          [Wz2_pd,Wz2,Wz2_mlpd,Wz2_ml];
          [Wz2_pl,Wz2_mdpl,Wz2,Wz2_md];
          [Wz2_pdl,Wz2_pl,Wz2_pd,Wz2]];
    Wz3Q=[[Wz3,Wz3_md,Wz3_ml,Wz3_mdl];
          [Wz3_pd,Wz3,Wz3_mlpd,Wz3_ml];
          [Wz3_pl,Wz3_mdpl,Wz3,Wz3_md];
          [Wz3_pdl,Wz3_pl,Wz3_pd,Wz3]];
    Wm1Q=[[Wm1,Wm1_md,Wm1_ml,Wm1_mdl];
          [Wm1_pd,Wm1,Wm1_mlpd,Wm1_ml];
          [Wm1_pl,Wm1_mdpl,Wm1,Wm1_md];
          [Wm1_pdl,Wm1_pl,Wm1_pd,Wm1]];
    Wm2Q=[[Wm2,Wm2_md,Wm2_ml,Wm2_mdl];
          [Wm2_pd,Wm2,Wm2_mlpd,Wm2_ml];

```

```

[Wm2_pl,Wm2_mdpl,Wm2,Wm2_md];
[Wm2_pdl,Wm2_pl,Wm2_pd,Wm2];
Wm3Q=[[Wm3,Wm3_md,Wm3_ml,Wm3_mdl];
[Wm3_pd,Wm3,Wm3_mlpd,Wm3_ml];
[Wm3_pl,Wm3_mdpl,Wm3,Wm3_md];
[Wm3_pdl,Wm3_pl,Wm3_pd,Wm3]];
E=[[1,0,0,0];
[0,1,0,0];
[0,0,1,0];
[0,0,0,1]];
e=exp(1);
R=[[1,e^(-d*i*w/v),e^(-1*i*w/v),e^((-1-d)*i*w/v)];
[e^(d*i*w/v),1,e^((-1+d)*i*w/v),e^(-1*i*w/v)];
[e^(1*i*w/v),e^((-d+1)*i*w/v),1,e^(-d*i*w/v)];
[e^((1+d)*i*w/v),e^(1*i*w/v),e^(d*i*w/v),1]];
SE=z(round(200*(w-x(1)),0))*R;
W1=(M1*w^2-2*i*r1*w-2*c1)/(M0*M1*w^4-1i*r1*(2*M0+M1)*w^3-
c1*(2*M0+M1)*w^2);
W2=(4*Iv*w^2-2*i*r1*1^2*w-2*c1*1^2)/(4*M0*Iv*w^4-1i*r1*(2*M0*1^2+4*Iv)*w^3-
c1*(2*M0*1^2+4*Iv)*w^2);
W11=(W1+W2)/2+d^2/4/It/w^2;
W12=(W1+W2)/2-d^2/4/It/w^2;
W13=(W1-W2)/2;
W0=[[W11,W12,W13,W13];
[W12,W11,W13,W13];
[W13,W13,W11,W12];
[W13,W13,W12,W11]];
RG=-Wz1Q+W0-1/ck0*E;
Wp=(-Wz1Q+W0-1/ck0*E)^(-1);
for jg=1:4
    for jh=1:4
        tWp(jg,jh)=Wp(jh,jg);
        cWp(jg,jh)=real(Wp(jg,jh))-1i*imag(Wp(jg,jh));
    end
end
end
Wq=Wp/w^2;
SQ=cWp*SE*tWp;
WW=cWp*tWp;
Sz1=conj(Wz1Q)*SQ*Wz1Q';
Sz2=conj(Wz2Q)*SQ*Wz2Q';
Sz3=conj(Wz3Q)*SQ*Wz3Q';
Sm1=conj(Wm1Q)*SQ*Wm1Q'/Wx1/Wx1;
Sm2=conj(Wm2Q)*SQ*Wm2Q'/Wx2/Wx2;
Sm3=conj(Wm3Q)*SQ*Wm3Q'/Wx3/Wx3;
isz11(round(10*s-9))=abs(Sz1(1,1));
isz12(round(10*s-9))=abs(Sz1(2,2));
isz13(round(10*s-9))=abs(Sz1(3,3));
isz14(round(10*s-9))=abs(Sz1(4,4));
isz21(round(10*s-9))=abs(Sz2(1,1));
isz22(round(10*s-9))=abs(Sz2(2,2));
isz23(round(10*s-9))=abs(Sz2(3,3));
isz24(round(10*s-9))=abs(Sz2(4,4));

```

```

isz31(round(10*s-9))=abs(Sz3(1,1));
isz32(round(10*s-9))=abs(Sz3(2,2));
isz33(round(10*s-9))=abs(Sz3(3,3));
isz34(round(10*s-9))=abs(Sz3(4,4));
ism11(round(10*s-9))=abs(Sm1(1,1));
ism12(round(10*s-9))=abs(Sm1(2,2));
ism13(round(10*s-9))=abs(Sm1(3,3));
ism14(round(10*s-9))=abs(Sm1(4,4));
ism21(round(10*s-9))=abs(Sm2(1,1));
ism22(round(10*s-9))=abs(Sm2(2,2));
ism23(round(10*s-9))=abs(Sm2(3,3));
ism24(round(10*s-9))=abs(Sm2(4,4));
ism31(round(10*s-9))=abs(Sm3(1,1));
ism32(round(10*s-9))=abs(Sm3(2,2));
ism33(round(10*s-9))=abs(Sm3(3,3));
ism34(round(10*s-9))=abs(Sm3(4,4));
X(round(10*s-9))=w;
FR(round(10*s-9))=Wq(1,1);
end
Iz11=trapz(X,isz11);
Iz12=trapz(X,isz12);
Iz13=trapz(X,isz13);
Iz14=trapz(X,isz14);
Iz21=trapz(X,isz21);
Iz22=trapz(X,isz22);
Iz23=trapz(X,isz23);
Iz24=trapz(X,isz24);
Iz31=trapz(X,isz31);
Iz32=trapz(X,isz32);
Iz33=trapz(X,isz33);
Iz34=trapz(X,isz34);
Im11=trapz(X,ism11);
Im12=trapz(X,ism12);
Im13=trapz(X,ism13);
Im14=trapz(X,ism14);
Im21=trapz(X,ism21);
Im22=trapz(X,ism22);
Im23=trapz(X,ism23);
Im24=trapz(X,ism24);
Im31=trapz(X,ism31);
Im32=trapz(X,ism32);
Im33=trapz(X,ism33);
Im34=trapz(X,ism34);
Dz1=(Iz11+Iz12+Iz13+Iz14)*1/4;
Dz2=(Iz21+Iz22+Iz23+Iz24)*1/4;
Dz3=(Iz31+Iz32+Iz33+Iz34)*1/4;
Dm1=(Im11+Im12+Im13+Im14)*1/4;
Dm2=(Im21+Im22+Im23+Im24)*1/4;
Dm3=(Im31+Im32+Im33+Im34)*1/4;
uz1=dz1^2+Dz1;
uz2=dz2^2+Dz2;
uz3=dz3^2+Dz3;

```

```

um1=dm1^2+Dm1;
um2=dm2^2+Dm2;
um3=dm3^2+Dm3;
A=[dz1,dz2,dz3,dm1,dm2,dm3,Dz1,Dz2,Dz3,Dm1,Dm2,Dm3,uz1,uz2,uz3,um1,um2,um3];
end

```

Подпрограмма « SQplot »

```

function [] = SQplot(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v)
filename = 'Spectr.xlsx';
x=v*100*xlsread(filename,1,'A:A')/6.28;
y=10^-6*xlsread(filename,1,'B:B')*6.28;
xi=round(min(x)):0.005:round(max(x));
z=interp1(x,y,xi,'linear');
d=1.85;
l=22;
It=0.133*10^4;
Iv=0.129*10^6;
M0=2750;
M1=91400;
r1=71500;
c1=8.55*10^6;
ck0=5*10^8;
[Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2,
Wm3]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,0);
[Wz1_md, Wz2_md, Wz3_md, Wm1_md, Wm2_md,
Wm3_md]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d,0);
[Wz1_ml, Wz2_ml, Wz3_ml, Wm1_ml, Wm2_ml,
Wm3_ml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-l,0);
[Wz1_mdml, Wz2_mdml, Wz3_mdml, Wm1_mdml, Wm2_mdml,
Wm3_mdml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d-l,0);
[Wz1_mdpl, Wz2_mdpl, Wz3_mdpl, Wm1_mdpl, Wm2_mdpl,
Wm3_mdpl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d+l,0);
[Wz1_mlpl, Wz2_mlpl, Wz3_mlpl, Wm1_mlpl, Wm2_mlpl,
Wm3_mlpl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-l+d,0);
[Wz1_pd, Wz2_pd, Wz3_pd, Wm1_pd, Wm2_pd,
Wm3_pd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d,0);
[Wz1_pl, Wz2_pl, Wz3_pl, Wm1_pl, Wm2_pl,
Wm3_pl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,l,0);
[Wz1_pdl, Wz2_pdl, Wz3_pdl, Wm1_pdl, Wm2_pdl,
Wm3_pdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d+l,0);
for s=1:0.01:130
w=s;
[Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2,
Wm3]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,w);
[Wz1_md, Wz2_md, Wz3_md, Wm1_md, Wm2_md,
Wm3_md]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d,w);
[Wz1_ml, Wz2_ml, Wz3_ml, Wm1_ml, Wm2_ml,
Wm3_ml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-l,w);
[Wz1_mdml, Wz2_mdml, Wz3_mdml, Wm1_mdml, Wm2_mdml,
Wm3_mdml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d-l,w);
[Wz1_mdpl, Wz2_mdpl, Wz3_mdpl, Wm1_mdpl, Wm2_mdpl,
Wm3_mdpl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d+l,w);

```

```

[Wz1_mlpd, Wz2_mlpd, Wz3_mlpd, Wm1_mlpd, Wm2_mlpd,
Wm3_mlpd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-1+d,w);
[Wz1_pd, Wz2_pd, Wz3_pd, Wm1_pd, Wm2_pd,
Wm3_pd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d,w);
[Wz1_pl, Wz2_pl, Wz3_pl, Wm1_pl, Wm2_pl,
Wm3_pl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,l,w);
[Wz1_pdl, Wz2_pdl, Wz3_pdl, Wm1_pdl, Wm2_pdl,
Wm3_pdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d+1,w);
Wz1Q=[[Wz1,Wz1_md,Wz1_ml,Wz1_mdl];
[Wz1_pd,Wz1,Wz1_mlpd,Wz1_ml];
[Wz1_pl,Wz1_mdpl,Wz1,Wz1_md];
[Wz1_pdl,Wz1_pl,Wz1_pd,Wz1]];
E=[[1,0,0,0];
[0,1,0,0];
[0,0,1,0];
[0,0,0,1]];
e=exp(1);
R=[[1,e^(-d*1i*w/v),e^(-1*1i*w/v),e^((-1-d)*1i*w/v)];
[e^(d*1i*w/v),1,e^((-1+d)*1i*w/v),e^(-1*1i*w/v)];
[e^(1*1i*w/v),e^((-d+1)*1i*w/v),1,e^(-d*1i*w/v)];
[e^((1+d)*1i*w/v),e^(1*1i*w/v),e^(d*1i*w/v),1]];
SE=z(round(200*(w-x(1)),0))*R;
W1=(M1*w^2-2*1i*r1*w-2*c1)/(M0*M1*w^4-1i*r1*(2*M0+M1)*w^3-
c1*(2*M0+M1)*w^2);
W2=(4*Iv*w^2-2*1i*r1*1^2*w-2*c1*1^2)/(4*M0*Iv*w^4-1i*r1*(2*M0*1^2+4*Iv)*w^3-
c1*(2*M0*1^2+4*Iv)*w^2);
W11=(W1+W2)/2+d^2/4/It/w^2;
W12=(W1+W2)/2-d^2/4/It/w^2;
W13=(W1-W2)/2;
W0=[[W11,W12,W13,W13];
[W12,W11,W13,W13];
[W13,W13,W11,W12];
[W13,W13,W12,W11]];
RG=-Wz1Q+W0-1/ck0*E;
Wp=(-Wz1Q+W0-1/ck0*E)^(-1);
for jg=1:4
    for jh=1:4
        tWp(jg,jh)=Wp(jh,jg);
        cWp(jg,jh)=real(Wp(jg,jh))-1i*imag(Wp(jg,jh));
    end
end
end
Wq=Wp/w^2;
SQ=cWp*SE*tWp;
WW=cWp*tWp;
t=round(100*s)-99;
X(t)=w;
RZ1(t)=abs(Wp(1,1));
RZ2(t)=abs(Wp(2,2));
RZ3(t)=abs(Wp(3,3));
RZ4(t)=abs(Wp(4,4));
Y1(t)=abs(SQ(1,1));
Y2(t)=abs(SQ(2,2));

```

```

Y3(t)=abs(SQ(3,3));
Y4(t)=abs(SQ(4,4));
ZZ1(t)=angle(SQ(1,1));
ZZ2(t)=angle(SQ(2,2));
ZZ3(t)=angle(SQ(3,3));
ZZ4(t)=angle(SQ(4,4));
Wq1(t)=abs(Wq(1,1));
Wq2(t)=abs(Wq(2,2));
Wq3(t)=abs(Wq(3,3));
Wq4(t)=abs(Wq(4,4));
W01(t)=abs(W0(1,1));
W02(t)=abs(W0(2,2));
W03(t)=abs(W0(3,3));
W04(t)=abs(W0(4,4));
WW1(t)=abs(WW(1,1));
Z1=unwrap(ZZ1);
Z2=unwrap(ZZ2);
Z3=unwrap(ZZ3);
Z4=unwrap(ZZ4);
ARZ1(t)=angle(Wp(1,1));
ARZ2(t)=angle(Wp(2,2));
ARZ3(t)=angle(Wp(3,3));
ARZ4(t)=angle(Wp(4,4));
AZ1=unwrap(ARZ1);
AZ2=unwrap(ARZ2);
AZ3=unwrap(ARZ3);
AZ4=unwrap(ARZ4);
ARZQ1(t)=angle(Wq(1,1));
ARZQ2(t)=angle(Wq(2,2));
ARZQ3(t)=angle(Wq(3,3));
ARZQ4(t)=angle(Wq(4,4));
AZQ1=unwrap(ARZQ1);
AZQ2=unwrap(ARZQ2);
AZQ3=unwrap(ARZQ3);
AZQ4=unwrap(ARZQ4);
end
rg=1;
p1=plot(X,Y1,'b');
p1.LineWidth=1;
hold on;
p2=plot(X,Y2,'y');
p2.LineWidth=1;
hold on;
p3=plot(X,Y3,'g');
p3.LineWidth=1;
hold on;
p4=plot(X,Y4,'r');
p4.LineWidth=1;
hold off;
end
Подпрограмма « findspec »
function [res,err]=findspec(v,w1,w2,sheet)

```



```
filename = 'Spectr.xlsx';  
xx=xlsread(filename,sheet,'A:A');  
yy=xlsread(filename,sheet,'B:B');  
% v=80/3.6;  
x=100*v*xx;  
y=10^-6*yy;  
xi=round(min(x)):0.1:round(max(x));  
z=interp1(x,y,xi,'linear');  
for w=w1:w2  
res(w)=z(10*w);  
end
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ГОСТ Р Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.

Требования безопасности и методы контроля (первая редакция)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р
*(проект,
первая редакция)*

БЕЗБАЛЛАСТНЫЙ ПУТЬ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ

Требования безопасности и методы контроля

*Настоящий проект стандарта не подлежит применению
до его утверждения*

Москва
Стандартинформ
201_

ГОСТ Р*(проект, первая редакция)*Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля**Предисловие**

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 45 «Железнодорожный транспорт»

3 УТВЕРЖДЕН Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от №

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Национальный орган Российской Федерации по стандартизации не несет ответственности за патентную чистоту настоящего стандарта. Патентообладатель может заявить о своих правах и направить в национальный орган по стандартизации аргументированное предложение о внесении в настоящий стандарт поправки для указания информации о наличии в стандарте объектов патентного права и патентообладателе.

Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0–2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок – в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования – на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет (www.gost.ru)

Стандартинформ, 201_

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

ГОСТ Р*(проект, первая редакция)*Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля**Содержание**

1	Область применения
2	Нормативные ссылки
3	Термины и определения
4	Общее положение
5	Общие требования безопасности.....
5.1	Габариты приближения строений и железнодорожного подвижного состава.....
5.2	Продольный профиль и план железнодорожного пути.....
5.3	Земляное полотно.....
5.4	Верхнее строение железнодорожного пути.....
5.4.1	Геометрические размеры бетонной несущей плиты.....
5.4.2	Переходные участки.....
5.4.3	Промежуточные рельсовые скрепления.....
5.4.4	Несущие слои.....
6	Требования безопасности при эксплуатации.....
6.1	Контролируемые параметры рельсовой колеи.....
6.2	Контролируемые параметры деформативности пути.....
7	Методы контроля.....
8	Охрана окружающей среды.....
	Библиография

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

БЕЗБАЛЛАСТНЫЙ ПУТЬ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ

Требования безопасности и методы контроля

Ballastless track for high-speed railway lines.
Safety requirements and control methods

Дата введения -

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на безбалластный путь, предназначенный для высокоскоростных железнодорожных линий, а также для совмещенного движения поездов.

Настоящий стандарт устанавливает требования безопасности и методы контроля безбалластного пути, предназначенного для движения:

- высокоскоростного подвижного состава со скоростью не более 400 км/ч с максимальной статической нагрузкой на ось не более 170 кН.
- пассажирских и специальных грузовых поездов со скоростью не более 160 км/ч с максимальной статической нагрузкой на ось не более 226 кН;
- поездов для обслуживания инфраструктуры со скоростью не более 90 км/ч.

ГОСТ Р*(проект, первая редакция)*Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля**2 Нормативные ссылки**

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ 9238 Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений

ГОСТ 22733 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности

ГОСТ 25100 Грунты. Классификация

ГОСТ 27751 Надежность строительных конструкций и оснований.
Основные положения

ГОСТ Р 55050 Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний

ГОСТ 26633 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия

ГОСТ 10060 Бетоны. Методы определения морозостойкости

ГОСТ 882 Щупы. Технические условия

ГОСТ 20276 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости

ГОСТ 12248 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости

ГОСТ 22733 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности

ГОСТ Р 54748 Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия

ГОСТ 32698 Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля

ГОСТ 22261 Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия

ГОСТ 23706 Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 6. Особые требования к омметрам (приборам для измерения полного сопротивления) и приборам для измерения активной проводимости

СП 35.13330 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84

СП 51.13330 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003

СП 237.1326000 Инфраструктура железнодорожного транспорта. Общие требования

СП 238.1326000 Железнодорожный путь

СП 22.13330 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83

СП 131.13330 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99

Проект, первая редакция

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов (сводов правил и/или классификаторов) в информационной системе общего пользования – на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячно издаваемого информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт (документ), на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать

ГОСТ Р*(проект, первая редакция)*Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля

действующую версию этого стандарта (документа) с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт (документ), на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта (документа) с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт (документ), на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт (документ) отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения и сокращения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 инфраструктура железнодорожного транспорта:

Технологический комплекс, включающий в себя подсистемы инфраструктуры железнодорожного транспорта, составные части подсистем и элементы составных частей подсистем инфраструктуры железнодорожного транспорта, обеспечивающие функционирование этого комплекса.

[Технический регламент Таможенного союза «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта», статья 2]

3.2 безбалластный путь: Технологическая система, включающая в себя совокупность рельсов, промежуточных рельсовых скреплений, подрельсового основания, основания несущего слоя и земляного полотна.

3.3 безбалластное верхнее строение пути; БВСП: Технологическая система, включающая в себя совокупность рельсов,

промежуточных рельсовых скреплений, подрельсового основания и основания несущего слоя.

Примечание – Подрельсовое основание проектируют в виде монолитной конструкции или в виде сборных плит, которые опирающуюся на слой гидравлически связанного бетона с низким содержанием цемента и несущие слои из уплотненной песчано-гравийной смеси с различными вариантами крепления рельсов к основанию. Упругая передача нагрузок от рельсов на подрельсовое основание осуществляется за счет конструкции промежуточных скреплений.

3.4 совмещенное движение поездов: Движение на одном участке железной дороги грузовых и пассажирских поездов.

3.5 защитный слой: Специально сформированный верхний слой земляного полотна из несвязного грунта непосредственно под балластной призмой, предназначенный для обеспечения несущей способности и предупреждения остаточных деформаций рабочей зоны земляного полотна.

[СП 238.1326000.2015, пункт 3.18]

3.6 эксплуатационные обустройства: Сооружения и устройства, предназначенные для обслуживания искусственных сооружений и прокладки коммуникаций, а также устройства, связанные с обеспечением пожарной безопасности, безопасности движения поездов.

3.7 высокоскоростное железнодорожное движение: Железнодорожное движение со скоростью более 200 км/ч.

[ГОСТ Р 55056–2012, статья 370]

3.8 железнодорожная линия: Технологический комплекс, включающий в себя железнодорожные пути, железнодорожные станции с полосой отвода и совокупность устройств железнодорожного электроснабжения, железнодорожной автоматики и телемеханики, железнодорожной электросвязи, здания, строения, сооружения,

ГОСТ Р*(проект, первая редакция)*Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля

устройства и оборудование, обеспечивающие функционирование этого комплекса и безопасное движение железнодорожного подвижного состава.

[СП 238.1326000.2015, пункт 3.12]

3.9 поездная нагрузка: Нагрузка, передаваемая от подвижного состава на железнодорожный путь.

3.10 гидравлический связанный несущий слой: Смесь из минеральных веществ (смесь из естественных песков, дробленых песков и гравия) ступенчатого гранулометрического состава (максимальная фракция 32 мм), которая уплотняется гидравлическим связующим веществом.

Примечание - В качестве связующего вещества применяют портландцементы. Содержание связующего вещества составляет 110 кг/м³. Гидравлически связанный несущий слой служит для постепенного выравнивания увеличивающейся сверху вниз жесткости и, тем самым, повышает несущую способность системы в целом.

3.11 морозозащитный слой: Слой для выравнивания разностей по жесткости отдельных слоев в направлении к основанию и защиты от пучения.

Примечание - Он может состоять из гравелистого песка, стойкого к выветриванию и морозу. В силу его пресекающего капиллярность эффекта задачей морозозащитного слоя является предотвращение поднятия воды из основания. Кроме того, необходимо быстро отводить поверхностные воды.

3.12 мониторинг состояния земляного полотна: Наблюдения, заключающиеся в измерении изменяющихся во времени параметров земляного полотна.

Список сокращений

БВСП - безбалластное верхнее строение пути

СЦБ - сигнализация, централизация, блокировка

ГСНС - гидравлически связанный несущий слой

ВКС - высокоточная координатная сеть

4 Требования безопасности

4.1 Расчетный срок службы конструкции должен составлять не менее 60 лет.

4.2 Конструкции верхнего строения пути и земляного полотна рассчитываются по нормам воздействия на железнодорожный путь железнодорожного подвижного состава в соответствии с ГОСТ Р 55050.

4.3 Безбалластный путь, предназначенный для пропуска высокоскоростного подвижного состава со скоростью более 200 км/ч, должен соответствовать габариту С250 по ГОСТ 9238.

Безбалластный путь, по которому не предусматривается пропуск высокоскоростного подвижного состава, должен соответствовать габариту С по ГОСТ 9238.

Расстояние между осями главных железнодорожных путей на прямых участках перегонов и станций должно быть не менее 4100 мм для скоростей движения до 250 км/ч включительно и не менее 4800 мм для скоростей движения более 250 км/ч.

4.4 Проектирование и строительство БВСП на мостах и трубах осуществляют в соответствии с требованиями СП 35.13330.

4.5 На двухпутных участках не допускается проектирование и строительство БВСП только одного пути.

4.6 Междупутье между двумя безбалластными путями должно быть забетонировано или заасфальтировано с обеспечением отвода воды.

4.7 Конструкция БВСП должна обеспечивать расположение элементов эксплуатационного обустройства.

ГОСТ Р*(проект, первая редакция)*Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля

4.8 Продольный профиль и план безбалластного пути следует предусматривать:

- при скоростях движения до 140 км/ч в соответствии с требованиями СП 238.1326000;
- при скоростях движения от 140 до 200 км/ч включительно в соответствии с требованиями СП
- при скоростях движения свыше 250 км/ч по разработанным специальным техническим условиям.

4.9 Проектирование земляного полотна выполняют на основе результатов инженерно-геологических, инженерно-геодезических, инженерно-гидрометеорологических и гидрологических изысканий.

При проектировании земляного полотна БВСП следует учитывать вид и свойства грунтов по ГОСТ 25100, влияние климатических условий района по СП 131.13330.

Для обеспечения прочности и устойчивости земляного полотна БВСП следует предусматривать:

- защиту земляного полотна от морозного пучения и обратимых (упругих) и остаточных осадок оснований (для земляного полотна из глинистых грунтов с учетом степени их засоленности, просадочности, набухаемости в соответствии с СП 22.13330);
- плотность грунта по ГОСТ 22733;
- защитный слой из дренирующих грунтов под БВСП;
- отвод поверхностных и подземных вод от БВСП (в том числе с применением водоотводных лотков);
- мероприятия по обеспечению виброустойчивости земляного полотна.

4.10 На всем протяжении БВСП необходимо укладывать бесстыковой путь. Рельсовые плети бесстыкового пути должны быть

закреплены в интервале температур, обеспечивающим его устойчивость против температурного выброса.

4.11 Вертикальная жесткость БВСП должна быть в пределах от 80 до 110 МН/м, а вертикальная жесткость узла скрепления - от 30 до 50 МН/м.

4.12 При проектировании БВСП необходимо предусматривать нормы допустимого шумового воздействия в соответствии с требованиями СП 51.13330.

4.13 При проектировании БВСП необходимо обеспечить возможность укладки стрелочных переводов и особенности расположения узлов скрепления. В узлах скрепления должны быть уложены упругие элементы для обеспечения равномерного прогиба рельсов и конструктивных элементов стрелочных перевода под поездной нагрузкой.

4.14 Конструкция БВСП должна иметь такие начальные характеристики прочности, чтобы при различных расчетных воздействиях не происходило образование или сверхнормативное раскрытие трещин, а также не возникали сверхнормативные перемещения, колебания, деформации, изломы затрудняющие нормальную эксплуатацию.

4.15 В местах перехода от безбалластного верхнего строения пути к железнодорожному пути на балласте следует применять переходные участки с плавным изменением жесткости. В пределах переходного участка не допускается размещение изолирующих или сварных стыков рельсов. Переходный участок должен обеспечить плавное изменение упругих осадок по длине железнодорожного пути под колесами подвижного состава и остаточных осадок, возникающих в процессе перехода от пути на балласте к БВСП. При этом в качестве критериев переходного участка принимают:

ГОСТ Р*(проект, первая редакция)*Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля

- силовой уклон по головке рельса не более 0,5 ‰;
- приращение силового уклона по головке рельса не более 0,2 ‰;
- разность давлений на смежные опоры рельса не более 12 кН;
- длина переходного участка - не менее 25 м.

Для устойчивости бесстыкового пути на переходных участках должны быть уложены дополнительные рельсы внутри колеи. Оптимальная длина дополнительных рельсов внутри колеи на переходном участке железнодорожного пути должна быть не менее 10 м при типовом очертании балластной призмы. При этом 1/4 их длины следует располагать на БВСП, а 3/4 - на балластном пути.

4.13 Промежуточными рельсовыми скреплениями (далее – скрепления), обеспечивают стабильность положения рельсовой колеи за счет:

- прижатия рельса к подрельсовому основанию с усилием не менее 25 кН;
- сопротивления продольному сдвигу рельса в узле скрепления не менее 16,5 кН.

Для БВСП следует применять упругие скрепления, позволяющие производить регулировку по высоте не менее 20 мм, в плане – не менее ± 4 мм.

Электрическое сопротивление изоляции промежуточных рельсовых скреплений должно быть не менее 5 кОм.

Изменение ширины колеи промежуточных рельсовых скреплений с учетом всех допусков на их элементы не должно превышать ± 1 мм.

4.14 Допуск по профилю поверхности бетонных несущих слоев ± 2 мм. Качество бетона должно соответствовать сорту В35 по ГОСТ 26633 с морозостойкостью F₁₃₀₀ по ГОСТ 10060. Содержание цемента в бетоне должно составлять от 350 до 370 кг/м³. Доля арматуры для ограничения ширины поверхностных трещин до 0,5 мм должна быть от

0,8 % до 0,9 % поперечного сечения бетона. Монтажная толщина слоя должна составлять не менее 200 мм. При использовании бесшпальной конструкции для достижения контролируемого образования трещин на поверхности бетонного несущего слоя выполняют надрезы, в процессе укладки бетона при помощи поперечных планок или после его затвердевания прорезают дисковой пилой. Бетонный несущий слой разрешается подвергать нагрузке только по окончании процесса отвердевания, обеспечивающего минимальную прочность при сжатии более 12 Н/мм². Толщина слоя должна быть не менее 18 см.

Для обеспечения долговечности БВСП прочность бетона должна быть не менее 30 МПа (куб/цилиндр).

Асфальтный несущий слой

Асфальтные несущие слои наносятся 4 слоями толщиной не менее 300 мм. На поверхности требуется точность укладки ± 2 мм. Движение по асфальтному несущему слою разрешается, когда собственная температура асфальта ниже 50° С.

Гидравлически связанный несущий слой

Под бетонным или асфальтным слоем устанавливается ГСНС. Толщина этого слоя должна быть не менее 300 мм.

При устройстве БВСП с ГСНС минимальная толщина ГСНС должна составлять 0,4 м., ширина - не менее 3,8 м.

ГСНС рассчитывают так, чтобы на поверхности самого верхнего несвязного несущего слоя (морозозащитного слоя) достигался модуль упругости не менее 120 Н/мм².

Морозозащитный слой

Толщина морозозащитного слоя должна быть не менее 1,8 м. Его величину устанавливают из условия промерзания грунтов так, чтобы исключить морозное пучение. Значения проницаемости - от $1 \cdot 10^{-5}$ до

ГОСТ Р*(проект, первая редакция)*Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля

$1 \cdot 10^{-4}$ м/с. Для новых линий требуется модуль упругости не менее 120 Н/мм², а для реконструируемых - не менее 100 Н/мм².

Электросопротивление

Переходное сопротивление «рельс-земля» участка БВСП должно быть не менее 9 Ом · км.

4.15 Отклонения положения рельсовой колеи от средней линии отметок продольного профиля длиной 400 м в пределах одного элемента профиля длиной отклонений - от 50 до 150 м.

Средний уклон отвода неровностей не должен превышать 0,5 ‰.

4.16 Отклонения положения рельсовой колеи в плане от геодезической прямой в прямых участках должны быть длиной от 50 до 150 м.

Средний уклон отвода неровностей не должен превышать 0,25 ‰.

Максимальные отклонения от проектного положения в кривых точек неровностей длиной от 50 до 150 м не должно превышать 3 мм.

4.17 Отклонение положения рельсовой колеи в плане на длине менее 50 м от проектного положения точек через 10 м на прямых и кривых участках пути не должно превышать 2 мм.

Сумма смежных разнонаправленных отклонений от проектного положения в прямых участках в точках через 10 м не должна превышать 4 мм.

4.18 Перекосы, т.е. последовательные отклонения по уровню не должны превышать 4 мм.

Отвод отклонений по уровню не должен превышать 0,5 ‰.

4.13 Допустимые деформации ГСПС в вертикальной плоскости не должны превышать 10 мм.

4.19 Деформации ГСНС связанные с выщелачиванием бетона не допускается.

4.20 Скопление воды между ГСНС и несущей плитой не допускается.

4.21 Раскрытие осадочных трещин в несущей плите более 0,5 мм не допускается.

4.22 Суммарные деформации конструкции в вертикальной плоскости по поверхности катания головок рельсов не должны превышать 20 мм.

4.23 Деформации несущих конструкций в горизонтальной плоскости не должны превышать ± 5 мм.

4.24 Деформации в горизонтальной плоскости положения рельсов не должны превышать величины возможной регулировки в узлах промежуточных скреплений.

5 Методы контроля

5.1. Контроль конструкций верхнего строения пути и земляного полотна производится по нормам воздействия на железнодорожный путь железнодорожного подвижного состава в соответствии с ГОСТ Р 55050

5.2 Габариты приближения строений и железнодорожного подвижного состава контролируют в соответствии с ГОСТ 9238.

5.3 Контроль проектирования и строительства БВСП на мостах и трубах осуществляют в соответствии с требованиями СП 35.13330.

5.4 Контроль ширины рельсовой колеи при строительстве и в эксплуатации производится путевыми шаблонами ЦУП.

Ширина рельсовой колеи должна составлять 1520 мм.

5.5 Контроль подуклонки подрельсовых площадок и их пропеллерность производится при строительстве _____.

Подуклонка подрельсовых площадок должна быть в пределах от 1/18,4 до 1/21,9. Пропеллерность подрельсовых площадок (разность

ГОСТ Р*(проект, первая редакция)*Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля

углов наклона подрельсовых площадок по левой и правой рельсовым нитям в поперечном к оси шпалы направлении) - не более 1/143.

5.6 Контроль бетонных и железобетонных конструкций БВСП должны быть проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 27751 по:

- предельным состояниям первой группы, приводящим к полной непригодности эксплуатации конструкций;

- предельным состояниям второй группы, затрудняющим нормальную эксплуатацию конструкций, или уменьшающим долговечность по сравнению с назначенным сроком службы.

Максимальные допустимые напряжения для ГСНС – 0,8 Н/мм², для бетонной несущей плиты сплошного армирования – 1,8 Н/мм².

Для увеличения прочности конструкции также возможно увеличивать ширину и толщину бетонной несущей плиты и ГСНС.

Раскрытие трещин контролируется при визуальном осмотре с помощью измерительных щупов ГОСТ 882.

5.7 Геометрические размеры бетонной несущей плиты контролируют на соответствие проектной документации. Контроль качества бетона производится при строительстве. Бетонный несущий слой должен соответствовать сорту В35 по ГОСТ 26633 с морозостойкостью F₁300 по ГОСТ 10060. Толщина слоя должна быть не менее 18 см. Допуск по профилю поверхности бетонных несущих слоев ± 2 мм. Деформации несущей плиты определяют геодезической съемкой на базе ВКС.

Геометрические размеры асфальтной несущей плиты контролируют на соответствие проектной документации. Асфальтный несущий слой наносится 4 слоями толщиной не менее 300 мм. На поверхности требуется точность укладки ±2 мм.

Геометрические размеры ГСНС контролируют на соответствие проектной документации. Толщина этого слоя должна быть не менее 300 мм.

Контроль модуля деформации несущих слоев по второй ветви нагружения в соответствии с СП 22.13330, при штамповых испытаниях - по ГОСТ 20276

Деформации подстилающих слоев и ГСНС определяют при помощи оптоволоконной системы диагностики или нивелировкой по маркерам, установленным в обсадные трубы.

Электрическое сопротивление контролируют средствами измерений по ГОСТ 22261 и ГОСТ 23706.

5.8 Модуль деформации слоев земляного полотна принимают по второй ветви нагружения в соответствии с СП 22.13330, при штамповых испытаниях - по ГОСТ 20276

Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости грунтов - по ГОСТ 12248.

Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости грунтов по - ГОСТ 20276.

Метод лабораторного определения максимальной плотности грунтов - по ГОСТ 22733.

Для БВСП следует дополнительно предусматривать мониторинг состояния земляного полотна. В качестве которого используются оптоволоконные системы диагностики вертикальных осадков с точностью измерения ± 2 мм и точностью определения места просадки по длине пути ± 1 м.

5.9 Длинные неровности в плане и профиле контролируют геодезическими методами на базе высокоточной координатной системы от постоянных реперов или путем измерения стрелы прогиба от хорды.

ГОСТ Р*(проект, первая редакция)*Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля

Для проведения измерений как в плане так и в профиле принимают критерии:

- длинные неровности – расстояние между точками замера до 150 м.

Допустимые отклонения продольного профиля пути (отклонение фактической высоты стрелы прогиба соседних точек замера от заданной высоты стрелы прогиба):

- 10 мм для точек, находящихся на расстоянии 150 м.

Допустимые отклонения положения пути в плане (отклонение фактической высоты стрелы прогиба соседних точек замера от заданной высоты стрелы прогиба):

- 10 мм для точек, находящихся на расстоянии 150 м.

При контрольной проверке критерия длинных неровностей длина хорды S составляет 300 м.

5.10 Короткие неровности контролируются скоростными путеизмерителями, аппаратурой, установленной на высокоскоростных поездах, предназначенной для измерений ускорений на буксах, рамах тележек и кузовах с последующим преобразованием в параметры неровностей или измерением стрел прогиба от хорды.

Для проведения измерений как в плане так и в профиле принимают критерии:

- короткие неровности – расстояние между точками замера до 5 м.

Допустимые отклонения продольного профиля пути (отклонение фактической высоты стрелы прогиба соседних точек замера от заданной высоты стрелы прогиба):

- 2 мм для точек, находящихся на расстоянии 5 м;

Допустимые отклонения положения пути в плане (отклонение фактической высоты стрелы прогиба соседних точек замера от заданной высоты стрелы прогиба):

- 2 мм для точек, находящихся на расстоянии 5 м;

При контрольной проверке критерия коротких неровностей длина хорды S составляет 30 м.

Для контрольной проверки одной точки все вычисленные разницы высоты стрелок контрольной точки на расстоянии 5 м сравнивают с соответствующей заданной разностью высоты стрелки. Максимальное отличие не должно превышать 2 мм.

5.11 Методы контроля щебня на переходных участках по ГОСТ Р 54748.

5.12 Методы контроля промежуточных рельсовых скреплений по ГОСТ 32698.

ГОСТ Р

(проект, первая редакция)

Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий.
Требования безопасности и методы контроля

УДК

Заместитель генерального
директора –
Начальник ИЦ ЖТ АО «ВНИИЖТ»

А.В. Савин

Руководитель центра «Стандартизация
и методология технического
регулирования»

Л.И. Копчугова

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Предложения по изменению ГОСТ 32698-2014 Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля (Письмо № 073/7599 от 27.05.2022)



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**РОССИЙСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА
РУТ (МИИТ)**

ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, ГСП-4, 127994
Тел./факс: (495) 681-13-40, e-mail: info@rut-miit.ru
ИНН/КПП 7715027733/771501001
ОГРН 1027739733922

27.05.2022 № 073/7599
На № _____ от _____

Исполнительному директору
АО «ВНИИЖТ»

К.П. Шенфельду

Уважаемый Константин Петрович!

В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года предполагается строительство высокоскоростной железнодорожной магистрали (далее ВСМ) Москва – Санкт-Петербург. Одним из проектных решений данной ВСМ является безбалластное верхнее строение пути. Необходимо отметить, что в техническом регулировании РФ отсутствует нормативно-правовая база, регламентирующая требования к рельсовым скреплениям, применяемым в безбалластных конструкциях пути.

АО «ВНИИЖТ» является разработчиком межгосударственного стандарта ГОСТ 32698-2014 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля». Исходя из вышеизложенного направляем Вам предложение по внесению дополнений в указанный межгосударственный стандарт касательно требований к рельсовым скреплениям для безбалластного верхнего строения пути.

Приложение: 1. Предложения «Требования к узлу рельсового скрепления безбалластной конструкции пути» на 2 л. в 1 экз.

Проректор

А.В. Савин

Ислова Алина Александровна
+ 7 (495) 684-40-77

Требования к узлу рельсового крепления безбалластной конструкции пути

1. Силовые характеристики узла и его элементов

- 1.1 Усилие прижатия рельса к основанию не менее 20 кН;
- 1.2 Расчетное усилие от одной клеммы не менее 9 кН;
- 1.3 Монтажный упругий ход рабочих рукавов клеммы не менее 12 мм.

2. Испытания с приложением продольной нагрузки

- 2.1 Сопротивление продольному перемещению рельса не менее 14 кН.

3. Циклические испытания

3.1 Удерживающая способность узла крепления при действии циклических нагрузок на базе 4 млн. циклов с частотой нагружения 4Гц. Угол приложения нагрузки 27°.

3.1.1 Остаточное перемещение головки рельса не более 3 мм;

3.1.2 Не допускается повреждений и выхода элементов креплений;

3.1.3 Коэффициент изменения продольного сопротивления рельса не должен превышать 20%;

3.1.4 Коэффициент изменения вертикальной статической жесткости не должен превышать 25%;

3.1.5 Коэффициент изменения усилия прижатия рельса не должен превышать 20%;

3.2 Усталостные испытания элементов крепления

3.2.1 Не допускается выхода прижимных деталей после приложения циклической нагрузки на базе 5 млн. циклов с амплитудой колебаний (-2,0/+0,5 мм);

3.2.2 После приложения 3 млн. циклов нагружения не должно быть повреждений упругих прокладок, необратимая деформация не должна превышать 10%, а изменение статической жесткости не должно превышать 20%.

4. Упругие характеристики узла крепления

4.1 Вертикальная статическая жесткость узла рельсового крепления должна находиться в диапазоне 16-27 кН/мм;

4.2 Изменение статической жесткости эластичных прокладок, эксплуатируемых в условиях низких температур (от -50 °С до +23°С), не должно превышать коэффициент 4;

5. Электрическое сопротивление

5.1 Электрическое сопротивление узла рельсового крепления, кОм, не менее – 10.

6. Дополнительные требования

6.1 После проведения испытаний в солевом тумане длительностью 300 часов узлы скрепления должны разбираться и собираться ручным монтажным инструментом без разрушения;

6.2 Сопротивление вырыванию замоноличенных и клеенных закладных элементов нагрузкой не менее 60кН в течение 3 мин. Отсутствие трещин, разрушений элементов рельсового скрепления и зоны подрельсового основания;

6.3 Минимальный диапазон регулировки положения рельса в плане ± 5 мм с шагом 1мм;

6.4 Минимальный диапазон регулировки положения рельса в профиле от -4 мм до +26 мм с шагом 1мм.

Исполнители:

Петров Александр Владимирович



Михайлов Сергей Владимирович



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

**Копии заявок на патенты № 2022112623, 2022112624, 2022112625, 2022112626,
2022112627 от 11.05.2022**

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)

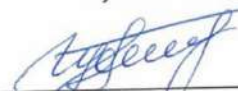
Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

11.05.2022	026318	2022112624
<i>Дата поступления</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

ФИПС ФОРМА 17 (дата регистрации) Федеральная служба по интеллектуальной собственности 11.05.2022	(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №	ВХОДЯЩИЙ №
(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу		
<input type="checkbox"/> Гусейнова Т.Р. <small>Фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование юридического лица) Полное и (или) краткое наименование международной заявки</small>	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ <small>(полное наименование организации)</small> 127055, Москва, ул. Образцова 9, стр.9, РУТ (МИИТ) Телефон: (495) 631-07-78 Факс: Адрес электронной почты: stup05@mail.ru	
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель		В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., 30, корп.1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993 Российская Федерация
(54) НАЗВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ Изолирующий элемент рельсового скрепления		
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ <small>(фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование юридического лица), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс)</small> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)) 127055, Москва, ул. Образцова 9, стр.9, «Российский университет транспорта» <input type="checkbox"/> полезная модель создана за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком, исполнителем работ <small>(указать наименование)</small> <input type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заказчик работ <small>(указать наименование)</small> Контракт от _____ № _____	ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1027739733922 КПП 771501001 ИНН 7715027733 СНИЛС ДОКУМЕНТ <small>(серия, номер)</small> КОД страны по стандарту ВОИС ST.3 RU	
(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ (И) ЗАЯВИТЕЛЯ <small>(фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, наименование организации, наименование страны происхождения (для подачи дел по изобретению патентов от его имени в Федеральную службу по интеллектуальной собственности или являющийся таковым в день подачи заявки))</small> Фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии)	<input type="checkbox"/> патентный поверенный <input type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону	Телефон: Факс: E-mail:
Адрес <small>(если в заявке приложена доверенность представителя заявителя, срок ее действия не ограничен)</small>	Регистрационный номер патентного поверенного _____	

Общее количество документов в листах	23	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия <small>(для промышленного образца)</small>	0	Гусейнова Т.Р.
Количество платёжных документов	1	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/registers-web		

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)


Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

11.05.2022	026319	2022112625
Дата поступления	Входящий №	Регистрационный №

<p>5 ДАТА ПРИЕМА ЗАЯВКИ Дата регистрации заявки 11.05.2022</p>		(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №	ВХОДЯЩИЙ №
(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу			
<input type="checkbox"/> Гусейнова Т.Р. фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) заявителя и дата международной заявки и дата международной публикации патентного документа <input type="checkbox"/> (87) номер и дата международной публикации международной заявки		АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ (укажите адрес, факс или e-mail) 127055, Москва, ул. Образцова 9, стр.9, РУТ (МИИТ) Телефон: (495) 631-07-78 Факс: Адрес электронной почты: stur05@mail.ru	
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель		В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., 30, корп.1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993 Российская Федерация	
(54) НАЗВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ Амортизирующая прокладка рельсового скрепления			
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование документа), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)), РУТ (МИИТ) 127055, Москва, ул. Образцова 9, стр.9, «Российский университет транспорта» <input type="checkbox"/> полезная модель создана за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком, исполнитель работ _____ (укажите наименование) <input type="checkbox"/> исполнителем работ по <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту <input type="checkbox"/> заказчик работ _____ (укажите наименование) Контракт от _____ № _____		ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1027739733922 КПП 771501001 ИНН 7715027733 СНИЛС ДОКУМЕНТ (серия, номер) КОД страны по стандарту ВОИС ST.3 RU	
(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ (И) ЗАЯВИТЕЛЯ (укажите фамилию, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, назначенного заявителем или представителем для подачи дел по патентному праву от его имени в Федеральную службу по интеллектуальной собственности или заявителем и исполнителем в день заявки) Фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии)		<input type="checkbox"/> патентный поверенный <input type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону Телефон: Факс: E-mail: Регистрационный номер патентного документа: _____	
Адрес: Сфера представительства (полное наименование организации, в которой заявитель, срок защиты не указывается)			

Общее количество документов в листах	21	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)	0	Гусейнова Т.Р. 
Количество платежных документов	1	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/registers-web		

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

11.05.2022	026321	2022112626
<i>Дата поступления</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

		(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № ВХОДЯЩИЙ №
ФИПС ОТ 17 ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (дата регистрации) оригинал документа заявки 11.05.2022		
(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу ГУСЕЙНОВА Т.Р.		
<input type="checkbox"/> (86) (информационный номер международной заявки и дата международной подачи, дата принятия международной заявки) <input type="checkbox"/> (87) (номер и дата международной публикации международной заявки)	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ (почтовый адрес, факс и контактный телефон заявителя) 127055, Москва, ул. Образцова 9, стр.9, РУТ (МИИТ) Телефон: (495) 631-07-78 Факс: Адрес электронной почты: stur05@mail.ru	
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель		В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., 30, корп.1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993 Российская Федерация
(54) НАЗВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ <p align="center">Анкерный болт рельсового крепления</p>		
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полностью умышленному документу), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)) 127055, Москва, ул. Образцова 9, стр.9, «Российский университет транспорта» <input type="checkbox"/> полезная модель создана за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком, исполнитель работ _____ (указать наименование) <input type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту _____ заказчику работ _____ (указать наименование) Контракт от _____ № _____		ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1027739733922 КПП 771501001 ИНН 7715027733 СНИЛС _____ ДОКУМЕНТ (серия, номер) _____ КОД страны по стандарту ВОИС СТ. 3 RU
(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ (И) ЗАЯВИТЕЛЯ (полностью фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, назначенного заявителем своим представителем для ведения дел по процедуре заявки от его имени в Федеральной службе по интеллектуальной собственности или действующим членом в этой области) Фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии)		<input type="checkbox"/> патентный поверенный <input type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону Телефон: Факс: E-mail: Адрес: Сфера представительства (если в заявке заявлено доверенность представителя заявителя, срок доверия не указывается)
Адрес: _____ Сфера представительства (если в заявке заявлено доверенность представителя заявителя, срок доверия не указывается)		Регистрационный номер патентного описания _____

Общее количество документов в листах	23	Лицо, зарегистрировавшее документы Гусейнова Т.Р.
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)	0	
Количество платяжных документов	1	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/registers-web		

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение

**«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

11.05.2022	026322	2022112627
<i>Дата поступления</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

<p>17 (21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №</p> <p>11.05.2022 (85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу</p>		<p>ВХОДЯЩИЙ №</p>
<p><input type="checkbox"/> РУСЕЙНОВА Т.Р.</p> <p>АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ (полностью адрес, включая индекс или почтовый ящик)</p> <p>127055, Москва, ул. Образцова 9, стр.9, РУТ (МИИТ)</p> <p>Телефон: (495) 631-07-78 Факс:</p> <p>Адрес электронной почты: stup05@mail.ru</p>		<p>ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ</p> <p>ОГРН 1027739733922</p> <p>КПП 771501001</p> <p>ИНН 7715027733</p> <p>СНИЛС</p> <p>ДОКУМЕНТ (серия, номер)</p> <p>КОД страны по стандарту ВОНС СТ. 3 RU</p>
<p>ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель</p> <p>(54) НАЗВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ</p> <p align="center">Узел рельсового крепления</p> <p>(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (исключительно юридическому лицу), являющегося заявителем или иным заявителем, являющимся гражданином и местом жительства)</p> <p>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)) 127055, Москва, ул. Образцова 9, стр.9, «Российский университет транспорта»</p> <p><input type="checkbox"/> полезная модель создана за счет средств федерального бюджета Заявитель является:</p> <p><input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком, исполнитель работ _____ (указать наименование)</p> <p><input type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заказчик работ _____ (указать наименование)</p> <p>Контракт от _____ № _____</p>		<p>(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ (И) ЗАЯВИТЕЛЯ (полное наименование физического лица, являющегося заявителем, или наименование юридического лица, назначенного заявителем своим представителем для ведения дела по получению патента от его имени в Федеральной службе по интеллектуальной собственности или являющегося таковым в соответствии с законодательством Российской Федерации, имя, отчество (последнее – при наличии))</p> <p>Телефон:</p> <p>Факс:</p> <p>Е-мэйл:</p> <p>Адрес _____</p> <p>Срок представительства (если к заявлению приложены документы, подтверждающие срок полномочий заявителя): _____</p> <p>Регистрационный номер патентного договора _____</p>

Общее количество документов в листах	29	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)	0	
Количество платёжных документов	1	
<p>Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/registers-web</p>		

Гусейнова Т.Р.

