

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Перебейнос Дмитрий Игоревич

**МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УПЛОТНЕНИЯ
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ
ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЯЕМОГО МАТЕРИАЛА**

Специальность: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Емельянов Рюрик Тимофеевич

Красноярск – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ И ФОРМИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ГИПОТЕЗЫ	9
1.1 Современное состояние вопроса уплотнения асфальтобетонных покрытий в дорожном строительстве	10
1.2 Обзор систем автоматизированного контроля уплотнения асфальтобетона вибрационными катками	15
1.3 Обзор предшествующих исследований	22
1.4 Рабочая гипотеза	32
Выводы по первой главе.....	34
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВАЛЬЦА ВИБРАЦИОННОГО КАТКА С АСФАЛЬТОБЕТОНОМ	35
2.1 Разработка имитационной модели процесса взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном	35
2.2 Результаты имитационного моделирования	50
2.3 Усовершенствование имитационной модели с целью исследования систем автоматизированного контроля уплотнения асфальтобетона	56
2.4 Исследование математической зависимости параметров уплотнения асфальтобетона	59
Выводы по второй главе.....	67
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ	69
3.1 Методика эксперимента	69
3.2 Моделирование аппаратно-программной системы контроля параметров уплотнения асфальтобетонных покрытий.....	71
3.3 Полевые испытания разработанной системы.....	78
Выводы по третьей главе.....	86
4 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	87
4.1 Система автоматизированной оценки качества уплотнения асфальтобетонных покрытий	87
4.2 Система автоматизированного контроля для дооснащения вибрационных катков.....	91

4.3 Информационная модель контроля параметров формирования асфальтобетонных покрытий	96
Выводы по четвертой главе.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
Список условных обозначений	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ А	123
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. На сегодняшний день в рамках приведения сети автомобильных дорог в нормативное состояние по всей стране реализуется национальный проект «Безопасные качественные дороги», что имеет существенное значение для развития транспортной системы страны и отвечает национальным целям, обозначенным в Транспортной стратегии РФ на период до 2023 года с прогнозом на период 2035 года и Стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021-2025 годов, согласно которым также предусматриваются мероприятия, направленные на развитие дорожной науки, усовершенствование технических требований и технологической базы, а приоритетными задачами являются: повышение качества автомобильных дорог, увеличение их эксплуатационного ресурса и повышение экономической эффективности дорожной деятельности в целом.

Согласно статистике, эксплуатационный ресурс отечественных асфальтобетонных (АБ) дорожных покрытий в настоящее время не соответствует положениям нормативной и проектной документации и заметно меньше, чем в странах с развитой технологической инфраструктурой и экономикой. При этом для увеличения срока службы АБ покрытий и улучшения их основных технико-эксплуатационных характеристик, таких как прочность, износостойкость, шероховатость и ровность проезжей части, главным образом необходимо строго соблюдать рассчитанный при проектировании гранулометрический состав АБ смесей и применять современную дорожную технику, обеспечивающую оптимальные условия проведения строительных работ и позволяющую использовать цифровые модели, построенные на базе BIM технологий.

Известно, что одним из основных этапов строительства дорог является уплотнение дорожного полотна вибрационными катками, в процессе которого учитывается множество факторов. Это изменение температуры окружающей среды, характеристик основания и асфальтобетонной смеси, а также режимов работы катков и их конструкций. Большинство ведущих зарубежных

производителей дорожной техники ведут разработки методов непрерывного контроля качества уплотнения дорожных покрытий и оснащают выпускаемые модели катков разработанными на их основе автоматизированными системами контроля. Данные технологии позволяют производить регистрацию информационных сигналов процесса уплотнения, а также хранить и передавать полученную информацию в режиме реального времени, что, в свою очередь, позволяет оператору катка, руководителю работ и представителям надзорных структур контролировать состояние асфальтобетона и рабочих органов катка в ходе производства работ и своевременно реагировать на их изменение. Основной недостаток таких методов заключается в недостаточности теоретических данных, учитывающих взаимосвязь и взаимообусловленность реологии асфальтобетона с характеристиками уплотняющего оборудования. Таким образом, на сегодняшний день исследование параметров процесса уплотнения в совокупном их проявлении и разработка новых методов контроля дорожно-строительных работ являются актуальными научными задачами.

Помимо всего, на данный момент также существует потребность дооснащения отечественных моделей катков системами автоматизированного контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий, обуславливаемая общемировыми тенденциями развития рыночной экономики, а также запросом Правительства РФ на развитие цифровизации и импортозамещения.

Степень разработанности темы. Исследованию вопросов устройства и качества уплотнения дорожных одежд, а также разработке технологий автоматизированного контроля материалов и технологических процессов посвящены труды значительного числа ученых: В. В. Бадалова, А. М. Богуславского, С. А. Варганова, Н. В. Горельшева, В. В. Дубкова, Р. Т. Емельянова, А. В. Захаренко, С. Н. Иванченко, В. И. Иванчуры, Я. А. Калужского, Ю. Я. Коваленко, М. П. Костельова, С. М. Кузнецова, Г. В. Кустарева, В. П. Ложечко, М. С. Мелик-Багдасарова, С. В. Носова, В. Б. Пермякова, А. П. Прокопьева, В. С. Серебренникова, А. И. Солдатова, А. П. Суржикова, А. В. Телушкина, И. С. Тюремнова, Н. Я. Хархуты, А. А. Шестопалова, D. Adam, F.

Akesson, J. L. Briaud, W. Cao, G. Chang, P. Erdmann, N. Guo, V. Hirsch, B. Horan, M. A. Mooney, L. W. Nijboer, T. K. Pellinen, S. Ryan, A. J. Sandstrom, J.A. Scherocman, C. W. Schwartz, T. Scullion, X. Shu, D. V. Thanh, P. G. Van Susante, P. KR. Vennapusa, D. J. White, M. W. Witzak и др.

Лидерами среди компаний, разрабатывающих и выпускающих дорожную технику со встроенными системами автоматизированного контроля строительства автомобильных дорог, являются фирмы: CAT (США), AMMANN (Швейцария), BOMAG (Франция), DYNAPAC (Швеция) и SAKAI (Япония).

Соответствие диссертации паспорту специальности. Работа выполнена в соответствии с пунктами направления исследований 3, 4 и 7 паспорта специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Цель исследования – повышение эффективности использования вибрационных катков и улучшение качества строительства автомобильных дорог за счет автоматизации контроля параметров формирования асфальтобетонных покрытий в процессе уплотнения, и, как следствие, увеличение их эксплуатационного ресурса, что опосредованно также отразится на экологической безопасности окружающей среды ввиду сокращения хозяйственной деятельности, связанной с ремонтом и обслуживанием таких дорог.

Задачи исследования:

1. Разработать имитационную модель взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном в среде Matlab&Simulink.
2. Разработать метод контроля качества уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий на основе оценки параметров уплотняемого материала.
3. Разработать алгоритм системы автоматизированного контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий, обеспечивающий оперативную оценку эффективности процесса уплотнения.
4. Разработать отечественную аппаратно-программную систему контроля параметров процесса уплотнения асфальтобетонных покрытий, реализуемую средствами неразрушающего действия.

Методы исследования. Диссертационная работа базируется на методах математического и компьютерного моделирования в программной среде Matlab&Simulink, математической статистики, теории планирования эксперимента, электронного управления средствами неразрушающего действия в процессе уплотнения. Решение поставленных в исследовании задач реализовано в соответствии с известными теоретическими положениями механики поведения дорожных материалов под нагрузкой, создаваемой рабочими органами вибрационного катка.

Научная новизна работы.

1. Впервые разработана имитационная модель взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном в среде Matlab&Simulink, отличающаяся возможностью преобразования полученных последовательностей данных методом Фурье, позволяющая исследовать алгоритмы работы систем автоматизированного контроля с учетом изменяющихся параметров уплотняемого материала, а также выявлять стационарные состояния системы вибровозбуждения вальца и характер ее динамики.

2. Разработан метод контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий на основе оценки параметров уплотняемого материала, отличающийся от известных введением дополнительного ультразвукового контроля ровности и толщины формируемого покрытия дороги и позволяющий вести комплексный мониторинг процесса уплотнения дорожных покрытий вибрационными катками.

3. Впервые разработан алгоритм двухфакторной оценки степени уплотнения асфальтобетона и создана на его основе система автоматизированного контроля для дооснащения вибрационных катков с возможностью построения информационной модели процесса уплотнения, позволяющие вести оперативный контроль параметров формирования асфальтобетонного покрытия дороги в режиме онлайн-наблюдения.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в разработке имитационной модели, которая позволяет подробно исследовать поведение рабочего органа вибрационного катка и уплотняемого материала на

протяжении всего процесса уплотнения, моделировать функционирование систем автоматизированного контроля, а также решать широкий спектр задач, возникающих при проектировании новых и модернизации существующих моделей вальцовых катков; разработке метода, алгоритма и аппаратно-программной системы автоматизированного контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий; внедрении результатов исследования в производственную деятельность ООО «ЦИЭС», МКУ «УСГХ» и в учебный процесс Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, что подтверждается соответствующими актами.

Степень достоверности диссертационной работы обусловлена применением фундаментальных положений теории уплотнения нежестких дорожных одежд; использованием апробированных измерительных, регистрирующих и программных средств для проведения теоретических и натурных исследований процесса уплотнения; корреляцией полученных результатов исследования с экспериментально доказанными зависимостями качества уплотнения асфальтобетонных покрытий от режимных параметров дорожных катков.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Имитационная модель взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном в среде Matlab&Simulink позволяет исследовать алгоритмы работы систем автоматизированного контроля с учетом изменяющихся параметров уплотняемого материала, а также выявлять стационарные состояния системы вибровозбуждения вальца и характер ее динамики.

2. Метод контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий на основе оценки параметров уплотняемого материала позволяет вести комплексный мониторинг процесса уплотнения дорожных покрытий вибрационными катками.

3. Алгоритм двухфакторной оценки степени уплотнения асфальтобетона и созданная на его основе система автоматизированного контроля для дооснащения вибрационных катков с возможностью построения информационной модели процесса уплотнения позволяют вести оперативный контроль параметров

формирования асфальтобетонного покрытия дороги в режиме онлайн-наблюдения.

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования были представлены на международных конференциях: «Перспектив Свободный» в 2016-2022 годах, г. Красноярск; «Неделя науки СПбПУ», г. Санкт-Петербург, СПбПУ, 2016; «ММТТ-29», г. Самара, 2016; «Наука и современность 2021», г. Москва, 2021; «ICMSIT-II-2021», г. Красноярск, 2021.

Публикации. Основные научные результаты исследования опубликованы в 12 научных работах, в том числе: 1 статья в издании, индексируемом Scopus; 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК; 4 программы для ЭВМ зарегистрированные в ФИПС.

Личный вклад автора заключается в анализе применяемых методов автоматизированного контроля качества формирования асфальтобетонного покрытия дороги; в разработке динамической модели процесса уплотнения в среде MATLAB&Simulink; в разработке и апробации нового метода контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий с помощью автоматизированной системы, построенной на платформе Arduino; в проведении теоретических (для имитационной модели) и натурных (для аппаратно-программной системы) испытаний с целью регистрации и анализа изменяющихся параметров рабочего органа катка и асфальтобетона при уплотнении.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений, списка литературы из 133 источников. Объем работы составляет 136 страниц, включая 76 рисунков, 8 таблиц, 37 формул и 2 приложения на 14 страницах.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю – профессору, д-ру техн. наук Р. Т. Емельянову и доценту, канд. техн. наук А. П. Прокопьеву за помощь в развитии научного знания и формировании научных интересов, за внимание и поддержку, оказанные на всех этапах выполнения диссертационной работы.

1 ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ И ФОРМИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ГИПОТЕЗЫ

1.1 Современное состояние вопроса уплотнения асфальтобетонных покрытий в дорожном строительстве

Заключительным этапом строительства дорог с нежестким типом покрытия является укладка и уплотнение асфальтобетонного полотна заданной толщины [57] на заранее подготовленном основании. Применяемые при этом марки и типы основания и асфальтобетонной смеси, а также количество их слоев строго регламентируется нормативной документацией в зависимости от класса дороги [11, 83].

В таблице 1.1 приведено соотношение основных применяемых в дорожном строительстве марок и типов асфальтобетонных смесей.

Таблица 1.1 – Основные марки и типы асфальтобетонных смесей [14]

Марка	Тип	Состав
I	высокоплотные; плотные А, Б, В; пористые; высокопористые	песок или отсев, щебень, минеральный порошок, битум
II	плотные А, Б, В, Г, Д; пористые; высокопористые	песок, отсев, щебень, минеральный порошок, битум
III	плотные Б, В, Г, Д	песок, отсев дробления, минеральный порошок, битум

По технологии асфальтобетонная смесь укладывается в горячем виде (около 140 °С) на захватках длиной от 25 до 150 м в зависимости от температуры окружающего воздуха, при этом температура воздуха не должна быть ниже 5 °С. Толщина однослойного, как и верхнего слоя многослойного асфальтобетонного полотна дороги должна составлять от 3 до 6 см, а каждого из последующих нижних слоев многослойного полотна должна быть в диапазоне от 4 до 8 см [89].

Начальная плотность асфальтобетона задается на стадии укладки асфальтоукладчиком, в дальнейшем доуплотнение осуществляется вальцовыми катками до требуемого коэффициента уплотнения [89], который выражается отношением плотности натурального образца (берутся пробы через 3 суток после укладки) к плотности образца, переформованного в лабораторных условиях. При этом толщина слоя асфальтобетонного полотна в процессе уплотнения уменьшается в 1,2-1,45 раза от изначальной.

На протяжении всего процесса формирования дорожного покрытия производится контроль качества выполняемых работ в соответствии с требованиями государственных стандартов [12, 13]. Контроль зачастую осуществляется с помощью применения таких инструментов и приборов как: уровни, механические и лазерные рулетки, металлические щупы, нивелиры и плотномеры.

В России широкое распространение получил прибор ПАБ (измеритель плотности асфальтобетона) [24] (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Внешний вид прибора ПАБ [24]

Измеритель плотности асфальтобетона (ПАБ) предназначен для оперативной оценки однородности асфальтобетонной смеси, укладываемой на полотно дороги. Он основан на принципе электромагнитного метода измерения материала и дополнительно содержит датчик температуры.

В Санкт-Петербургском политехническом университете разработан прибор-пористомер (рисунок 1.2) для неразрушающего контроля качества уплотнения асфальтобетона. Принцип работы прибора основан на продувании воздуха через толщу асфальтобетона.

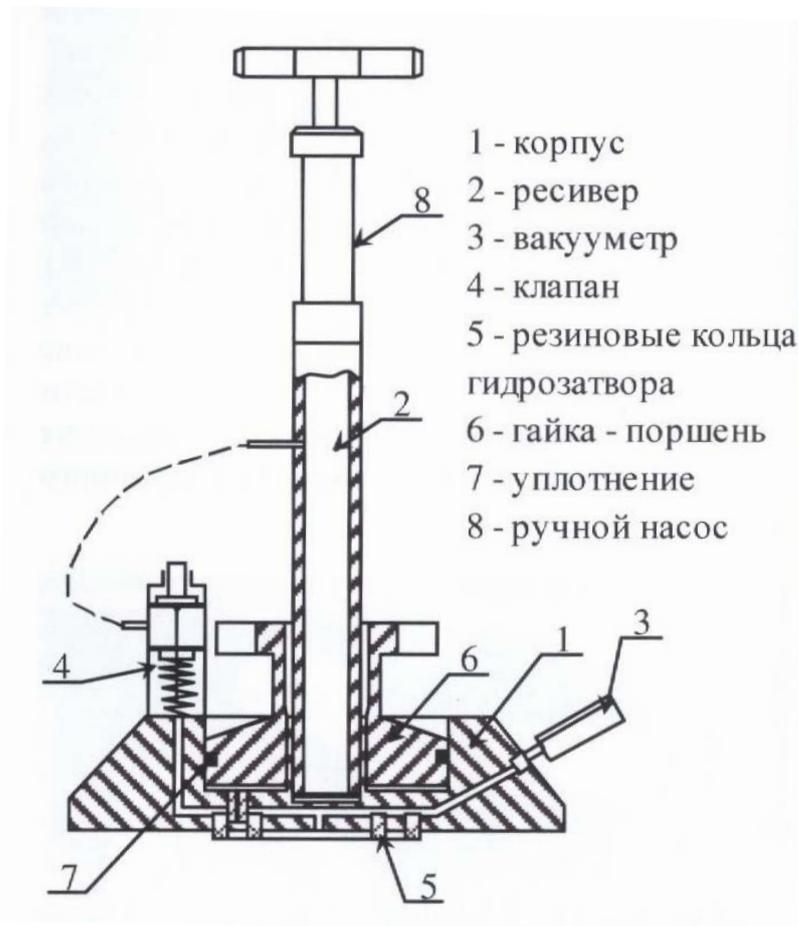


Рисунок 1.2 – Схема прибора-пористомера

При работе прибор устанавливают на поверхность контролируемого покрытия. Резиновые кольца гидрозатвора создают между корпусом прибора и покрытием замкнутый объём, который вместе с ресивером образует рабочую камеру. Для полной герметизации рабочей камеры от окружающей атмосферы в зазор между резиновыми кольцами выдавливается консистентная смазка путём

вращения гайки-поршня. С помощью ручного насоса в рабочей камере создаётся разрежение, которое фиксируется вакуумметром. Воздух, проходя через поры в дорожном полотне, попадает в рабочую камеру. Первоначально созданное в ней разрежение падает. В зависимости от пористости материала расход воздуха, поступающего через него в камеру, будет различным. По скорости изменения разрежения в рабочей камере судят о плотности и пористости асфальтобетонного полотна. Имеются научные и конструкторские проработки по установке подобного автоматизированного устройства на дорожных катках.

За рубежом широкое распространение получил радиометрический контроль плотности асфальтобетонных покрытий, основанный на применении радиоактивных изотопов, возникающих при распаде γ -лучей и представляющих одну из форм электромагнитного излучения. Проходя через слой асфальтобетона, последний ослабляет (фотоадсорбция) или рассеивает (эффект Комптона) поток этого излучения. Это явление позволяет определять изменение плотности исследуемого материала. Этот метод измерения плотности часто называют методом вторичного рассеяния. При измерениях по этому методу источник излучения и детектор находятся в определенных позициях вблизи поверхности контролируемого слоя. Проникающие в испытываемую среду γ -кванты рассеиваются и возвращаются к детектору, который воспринимает определенное количество γ -квантов.

Эти кванты преобразуются в электрические импульсы, поступающие в измерительный прибор (рисунок 1.3). С увеличением количества единичных измерений возрастает и число подсчитанных импульсов. Поэтому точность измерения радиоактивного излучения возрастает с увеличением количества подсчитываемых импульсов и зависит от длительности времени измерения, толщины слоя, плотности прилегания прибора к поверхности контролируемого покрытия и т.п. Имеются разработки, предусматривающие установку таких радиоизотопных приборов на конструкцию катка для непрерывного контроля плотности в процессе укатки.



Рисунок 1.3 – Прибор радиометрического контроля плотности асфальтобетона

Особым преимуществом изотопных методов измерений является их нечувствительность к высоким температурам, с которыми приходится сталкиваться при укладке асфальта. Это даёт возможность производить замеры на горячем асфальтобетоне непосредственно возле асфальтоукладчика или катка. Однако подобные приборы меньше подходят для грунтов, так как нуждаются в тарировке по каждому виду материала и очень чувствительны на включения в грунте камней.

На сегодняшний день на смену традиционным методам контроля состояния строительных материалов пришли электронные системы, позволяющие вести контроль качества производства изделий в момент их изготовления. Эта тенденция наблюдается и в дорожном строительстве: уже сегодня уплотнение асфальтобетона за рубежом преимущественно осуществляется вибрационными катками с автоматизированными системами контроля. Основой таких систем является динамический непрерывный контроль качества уплотнения посредством измерителей ускорения. Измеритель ускорения (акселерометр) входит в состав

измерительного комплекса и монтируется на вибрирующем вальце катка. Измерительный комплекс также содержит микропроцессор, обрабатывающий результаты измерения ускорения, индикатор, печатающее или записывающее устройство, либо экран для вывода обработанных данных, а также ряд дополнительных датчиков. На рисунке 1.4 показан измерительный комплекс виброускорений на основе платы Arduino.

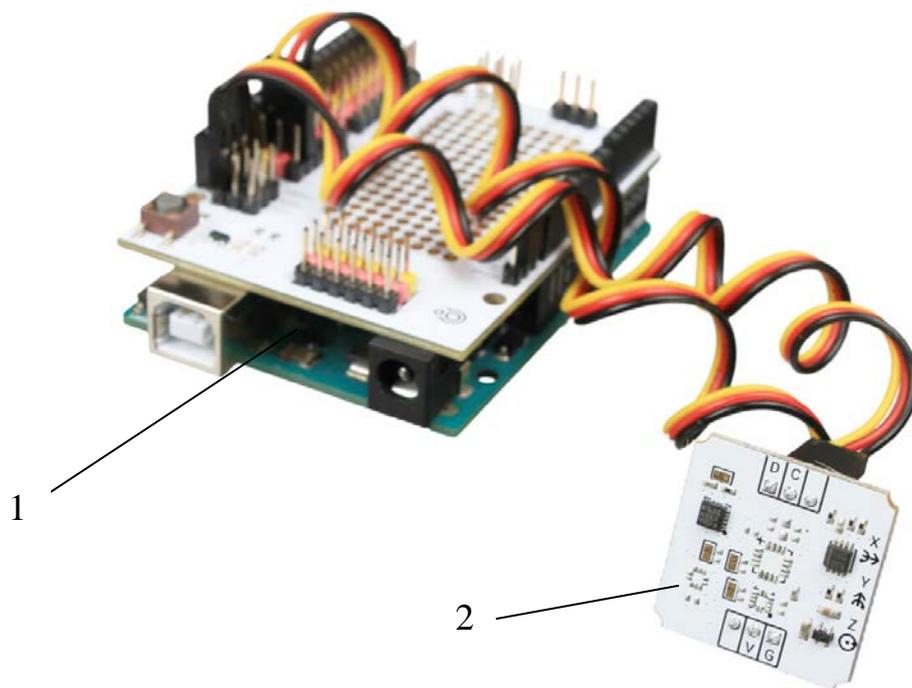


Рисунок 1.4 – Измерительный комплекс виброускорений на основе платы Arduino: 1 - плата Arduino; 2 – акселерометр

1.2 Обзор систем автоматизированного контроля уплотнения асфальтобетона вибрационными катками

В компаниях, выпускающих современные вибрационные катки широкое распространение получил метод «Continues Compaction Control» (непрерывный контроль уплотнения) в процессе укатки асфальтобетона [48]. На базе этого метода фирмы (CAT, AMMANN, BOMAG, DYNAPAC, SAKAI, CATERPILLAR) изготавливают асфальтовые катки со встроенными системами

автоматизированного контроля уплотнения асфальтобетона. Подобные системы позволяют автоматизировать процесс контроля плотности укатки асфальтобетона при устройстве твердого дорожного покрытия.

Метод «непрерывный контроль уплотнения» реализуется путем анализа спектров вертикальных ускорений, снимаемых с вальцов вибрационных катков акселерометрами [48]. Принцип работы этого метода заключен в замере и сопоставлении значений величин энергии, передаваемой виброкатком на поверхность уплотняемого материала и отраженной от него на корпус вальца. В зависимости от степени плотности материала величина поглощаемой им энергии будет различной. С увеличением плотности материала величина поглощаемой им энергии снижается, и большая часть её будет передаваться на корпус вальца. Число проходов виброкатка для достижения требуемой степени уплотнения, её приращения за каждый проход катка определяются на опытном участке.

На рисунке 1.5 приведено соотношение факторов уплотнения и режимов колебания вибрационных вальцов.

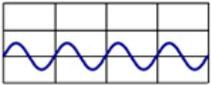
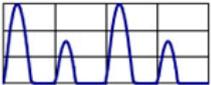
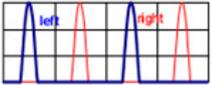
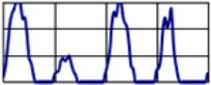
Движение вальца	Контакт	Режим работы	Характер колебаний	Работа с ССС	Плотность	Скорость катка	Амплитуда
Периодическое	Постоянный контакт	Постоянный контакт		Да	Низкая ↓ Высокая	Быстро ↑ Медленно	Низкая ↓ Высокая
		Периодический отрыв		Да			
	«Двойной прыжок»		Да				
	Раскачивание		Нет				
Хаотическое	Непериодический отрыв	Хаотическое движение		Нет			

Рисунок 1.5 – Соотношение факторов уплотнения и режимов колебания вибрационных вальцов. [65, 88]

При этом существует ряд различных показателей уплотненности, разработанных согласно методу «Continues Compaction Control». Показатель уплотнения (CMV) рассчитывается по формуле [48, 86]:

$$CMV = C \cdot \frac{A_{2f}}{A_f}, \quad (1.1)$$

где A_f, A_{2f} – амплитуды гармоник спектра ускорения вибровальца с частотой изменения вынуждающего усилия $f, 2f$, м/с²;

C – коэффициент калибровки [120].

Резонансный показатель уплотнения RMV – «Bouncing Value» (BV), также основывается на анализе пиков спектра виброускорений вальца и рассчитывается по формуле [48, 86]:

$$RMV = BV = C \cdot \frac{A_{0.5f}}{A_f}, \quad (1.2)$$

где $A_{0.5f}$ – амплитуда субгармоники спектра виброускорения вальца с частотой изменения вынуждающего усилия $0.5f$ м/с².

В показателе CCV учитывается целый ряд гармоник и субгармоник виброускорения вальца, возникающих в зависимости от степени уплотненности покрытий [48, 86]:

$$CCV = \frac{A_{0.5f} + A_{1.5f} + A_{2f} + A_{2.5f} + A_{3f}}{A_{0.5f} + A_f} \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

где $A_{1.5f}, A_{2.5f}$, – амплитуды субгармоник спектра виброускорения вальца с частотами изменения вынуждающего усилия $1,5f, 2,5f$;

A_{3f} – амплитуда гармоники спектра виброускорения вальца с частотой изменения вынуждающего усилия $3f$, м/с².

Изменение спектра виброускорений вальца в зависимости от степени уплотненности покрытия показано на рисунке 1.6.

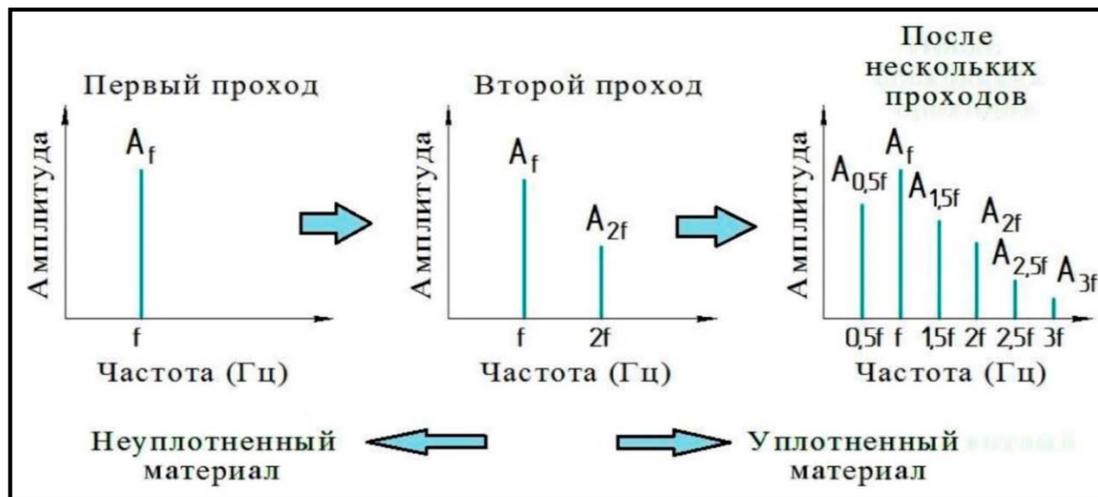


Рисунок 1.6 – Изменение спектра виброускорений вальца в зависимости от степени уплотненности покрытия [48, 86]

Исходя из этого, компания Caterpillar предлагает две технологии контроля уплотнения [81]: измерение значения уплотнения на основе акселерометров и систему измерения мощности привода машины. Обе технологии отображают результаты контроля в режиме реального времени, однако имеют свои сильные стороны и ограничения. Система измерения уплотнения на основе акселерометров работает только при вибрации барабана вальца и способна выполнять измерения на глубину от 1,0 до 1,2 м. Это даёт оператору помимо представления о степени уплотнения верхнего слоя, также и информацию о том, что находится под поверхностью дороги. Система измерения мощности привода машины определяет плотность материала, регистрируя сопротивление качению, однако измерение осуществляется в пределах толщины слоя уплотняемого материала. Эта система более гибкая, чем система на основе акселерометров, поскольку может использоваться на всех типах дорожных одежд.

Компания AMMANN предлагает систему AMMANN Compaction Expert (ACE) [99], которая плавно меняет частоту и амплитуду вибрации катка в соответствии со свойствами поверхности уплотняемого материала (рисунок 1.7).

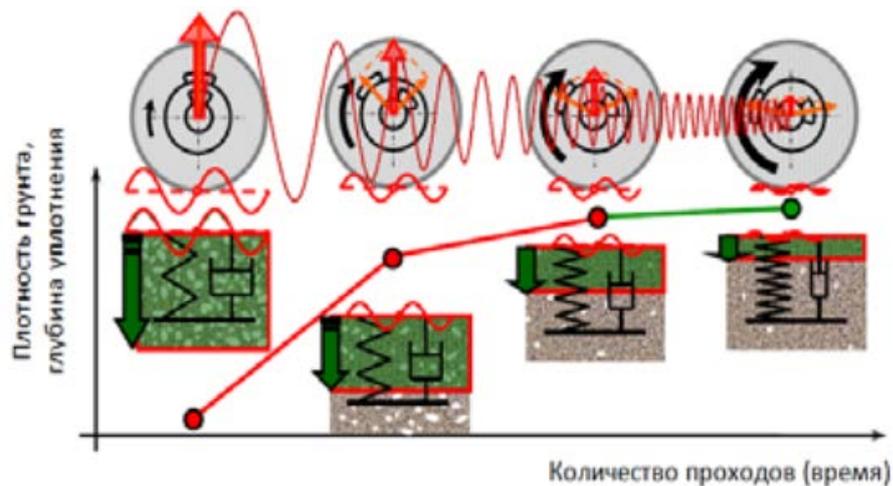


Рисунок 1.7 – Автоматическое регулирование частоты и вынуждающего усилия колебаний в процессе уплотнения грунта системой AMMANN Compaction Expert

Данная система позволяет регистрировать относительное уплотнение и подстраивать рабочие параметры машины под оптимальный режим. Вся необходимая информация выводится на дисплей (рисунок 1.8), сохраняется в памяти и может выводиться на принтер прямо в кабине оператора.

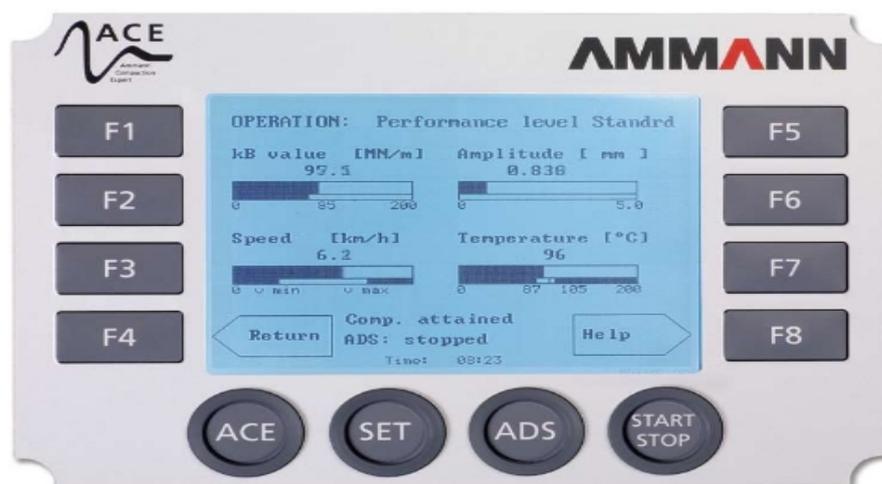


Рисунок 1.8 – Интерфейс системы AMMANN Compaction Expert [99]

Система компании AMMANN, обеспечивает максимальную эффективность и контроль качества для уплотнительных работ с грунтами и асфальтовыми материалами. Данная система измеряет значение жесткости материала,

соотносящееся с достигнутым качеством в процессе уплотнения. Затем это значение используется для автоматической регуляции и корректировки параметров уплотнения – амплитуды и частоты для наиболее эффективного и точного достижения намеченного результата уплотнения. Кроме того, предупреждая излишние уплотнительные циклы, система AMMANN Compaction Expert предотвращает переуплотнение или уничтожение материала, а также учитывает изменение температуры асфальтового материала при корректировке для достижения оптимальных параметров уплотнения. Это предупреждает неэффективное или даже разрушительное вибрационное уплотнение в областях так называемых «чувствительных зон».

Кроме того, на основе показателей CMV и RMV производят пакеты дооснащения обычных катков системами автоматизированного контроля плотности уплотнения дорожных одежд.

Компания TRIMBLE выпускает систему дооснащения вибрационных катков CCSFlex [82], особенностью которой является возможность работы как в связке со сторонней системой контроля уплотнения, расширяя ее возможности, так и в качестве самостоятельной системы автоматизированного уплотнения (рисунок 1.9).

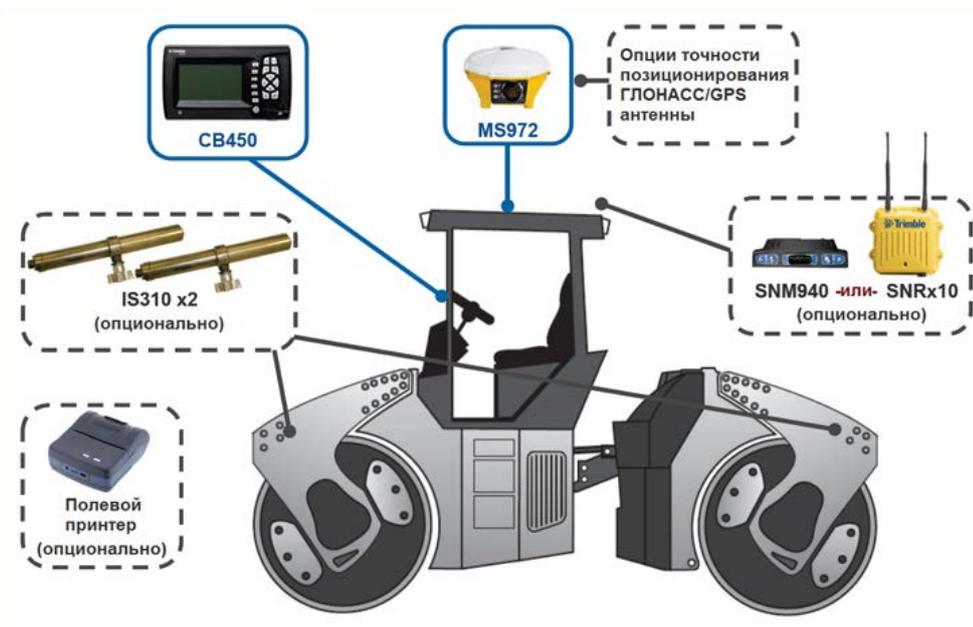


Рисунок 1.9 – Система дооснащения TRIMBLE CCSFlex [82]

На рисунке 1.10 представлена система дооснащения Compactometer ALFA-022R компании GEODYNAMIK [105], позволяющая задавать рабочие параметры вибрационного катка (амплитуду, частоту и скорость) с учетом жесткостных характеристик уплотняемого материала.

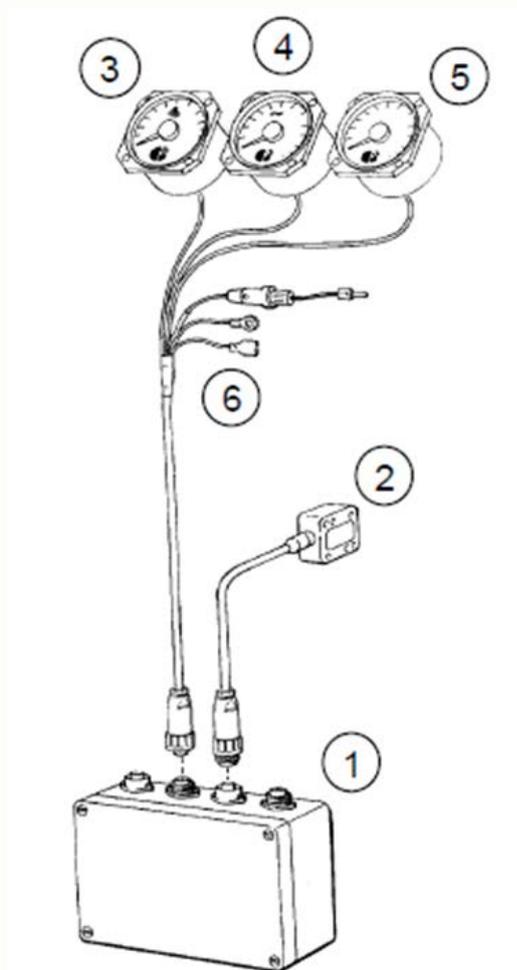


Рисунок 1.10 – Система дооснащения Compactometer ALFA-022R:

1 - блок управления; 2 - акселерометр; 3, 4 и 5 - указатели стрелочного типа (либо модель с жидкокристаллической панелью); 6 – кабель [105]

В Ярославской области на Заводе «Дорожных машин», ведутся разработки по созданию катков с отечественной системой контроля уплотнения DMControl. Для данной системы Моревым А.С. [48] было предложено использовать новый показатель «Compaction Value» (CV), отличающийся расширенным диапазоном учитываемых сигналов:

$$CV = K \cdot \frac{K_{0.5f} \cdot A_{0.5f} + K_{1.5f} \cdot A_{1.5f} + K_{2.0f} \cdot A_{2.0f} + K_{2.5f} \cdot A_{2.5f} + K_{3.0f} \cdot A_{3.0f}}{K_{0.5f} \cdot A_{0.5f} + K_{1.0f} \cdot A_{1.0f}}, \quad (1.4)$$

где K – общий тарифовочный коэффициент;

$K_{0.5f}$, $K_{1.0f}$, $K_{1.5f}$, $K_{2.0f}$, $K_{2.5f}$, $K_{3.0f}$ – коэффициенты гармоник спектра виброускорения вальца с частотами изменения вынуждающего усилия $0.5f$, $1.0f$, $1.5f$, $2.0f$, $2.5f$, $3.0f$.

1.3 Обзор предшествующих исследований

Исследованию процесса устройства асфальтобетонных покрытий посвящены работы обширного числа представителей научного сообщества. В этих работах рассмотрены как теоретические положения, связанные с распределением напряжений в уплотняемом материале при формировании асфальтобетонного покрытия, так и натурные вопросы, касающиеся совершенствования конструкций машин, практики функционирования систем управления дорожной техникой и автоматизированного контроля уплотнения.

Исключительный вклад в исследование теории уплотнения внесли такие отечественные ученые, как: В. В. Бадалов [1, 2, 3, 4], А. М. Богуславский [5, 6], С. А. Варганов [7, 8], Н. В. Горельшев [9, 10], А. В. Захаренко [16, 17, 18], С. Н. Иванченко [19, 20, 21, 22], Я. А. Калужский [25, 26], Ю. Я. Коваленко [31, 32], М. П. Костельов [35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42], В. П. Ложечко [44, 45, 46], С. В. Носов [50, 51, 52, 53, 54, 55], В. Б. Пермяков [58, 59, 60, 61, 62, 63, 64], Н. Я. Хархута [90, 91, 92], А. А. Шестопапов [93, 94, 95], а также иностранные ученые: V. Hirsch [110], L. W. Nijboer [115, 116], T. K. Pellinen [117, 118], M. W. Witczak [133].

Вопросы по теме контроля качества и диагностики материалов и изделий с помощью применения средств неразрушающего действия рассматривались в научных трудах отечественных ученых: Г. В. Кустарева [43], А. П. Прокопьева [68, 69, 70, 71, 72], А. И. Солдатова [79], А. П. Суржикова [80], А. В. Телушкина

[84], И.С. Тюремнова [86, 87, 88], а также иностранных: D. Adam [96, 97], F. Akesson [98], J. L. Briaud [101], G. Chang [103, 104], N. Guo [109], B. Horan [111], M. A. Mooney [118, 119], S. Ryan [120], J.A. Scherocman [122], C. W. Schwartz [123], T. Scullion [124], X. Shu [125], D. V. Thanh [126, 127], P. KR. Vennapusa [130], D. J. White [131, 132].

В работе [129] рассмотрено поведение трехмассовой системы «рама – вибрационный валец – уплотняемый материал» (рисунок 1.11).

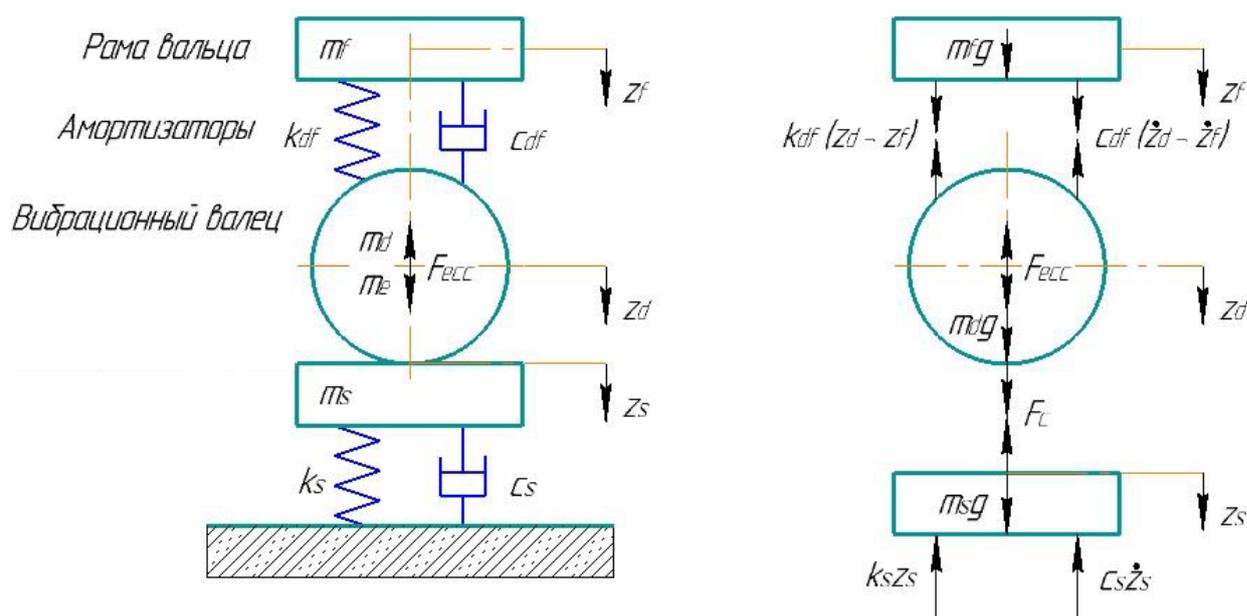


Рисунок 1.11 – Трехмассная система

«рама – вибрационный валец – уплотняемый материал» [48, 129]

Модель трехмассовой системы сформирована с учетом реологии асфальтобетона. Она содержит систему амортизаторов, размещенных между рамой вальца и вибрационным вальцом, а также между вибрационным вальцом и поверхностью уплотняемого материала. В результате исследования вышеуказанной модели авторами были предложены дифференциальные уравнения контактной силы, вертикальных ускорений рамы катка, вибрационного вальца и поверхности уплотняемого материала.

Контактная сила F_c рассчитывается по формуле [129]:

$$F_s = m_s \ddot{z}_d - m_s g + k_s z_d + c_s \dot{z}_d = \\ = m_0 e_0 \Omega^2 \sin(\Omega t) + m_d g + m_f g - m_d \dot{z}_d - m_f \dot{z}_f, \quad (1.5)$$

Система дифференциальных уравнений в такой системе для безотрывного режима приобретает вид:

$$\begin{cases} m_f \ddot{x}_f - b_f (\dot{x}_d - \dot{x}_f) - k_f (x_d - x_f) = m_f g ; \\ (m_d + m_s) \ddot{x}_d + b_f (\dot{x}_d - \dot{x}_f) + k_f (x_d - x_f) + \\ + b_s \dot{x}_d + k_s x_d = (m_d + m_s) g + Q \sin \omega t ; \\ \dot{x}_d = \dot{x}_s ; \\ x_d = x_s , \end{cases} \quad (1.6)$$

а для режима с отрывом:

$$\begin{cases} m_f \ddot{x}_f + b_f (\dot{x}_d - \dot{x}_f) + k_f (x_d - x_f) = m_f g ; \\ m_d \ddot{x}_d - b_f (\dot{x}_d - \dot{x}_f) - k_f (x_d - x_f) = m_d g + Q \sin \omega t ; \\ m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s + k_s x_s = m_s g , \end{cases} \quad (1.7)$$

где x_f – вертикальное перемещение рамы вальца, м;

x_d – вертикальное перемещение вальца, м;

x_s – вертикальное перемещение поверхности материала, м;

$\dot{x}_f, \dot{x}_d, \dot{x}_s$ – вертикальные скорости рамы, вальца и поверхности материала, м/с;

$\ddot{x}_f, \ddot{x}_d, \ddot{x}_s$ – ускорения рамы, вальца и поверхности материала, м/с²;

m_f – масса рамы вальца, кг;

m_d – масса вальца, кг;

m_s – масса присоединенного материала, кг;

b_f – коэффициент вязкого трения амортизаторов, Н·с/м²;

b_s – коэффициент вязкого трения деформируемого материала, Н·с/м²;

k_f – коэффициент жёсткости амортизаторов, Н/м;

k_s – коэффициент жёсткости уплотняемого материала, Н/м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Q – вынуждающее усилие, H ;

ω – угловая скорость вибровозбудителя, $рад/с$.

В работе [107] Р. Erdmann и D. Adam рассмотрели метод численного моделирования динамического процесса уплотнения вибрационным катком. Результатом исследования является полученная авторами зависимость контактной силы уплотняемого материала к постоянной нагрузке (рисунок 1.12).

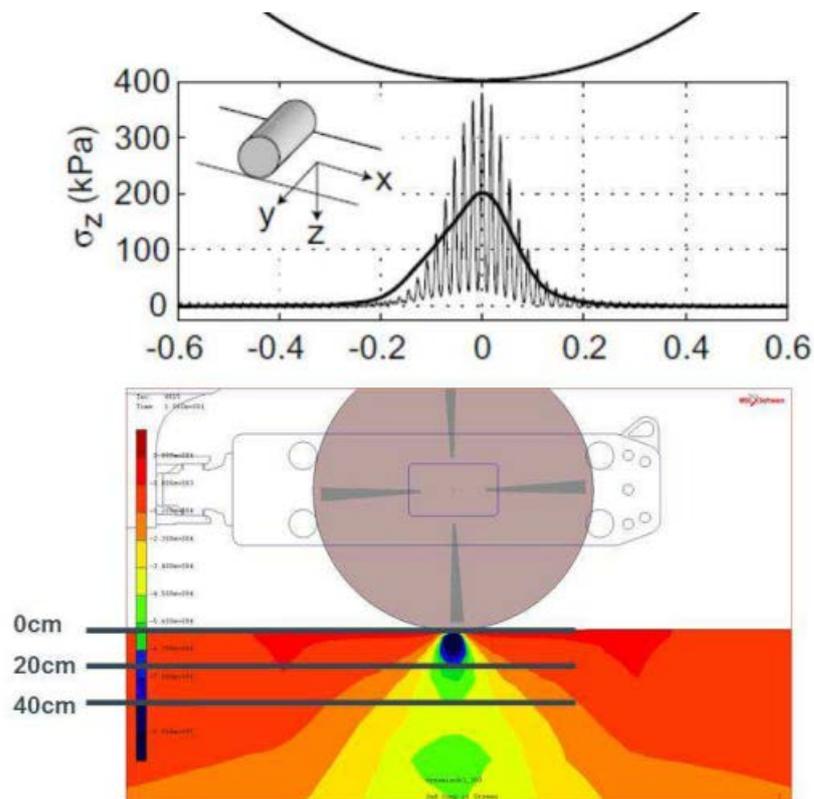


Рисунок 1.12 – Моделирования динамического процесса уплотнения вибрационным вальцом [48, 107]

В исследованиях [70, 119] рассматривается вопрос проектирования математических моделей взаимодействия дорожных машин с уплотняемым материалом методом пространства состояний.

Путем компьютерного моделирования авторами были получены зависимости параметров колебания уплотняющих органов дорожных машин (рисунок 1.13 – 1.14), сопоставимые действительному процессу.

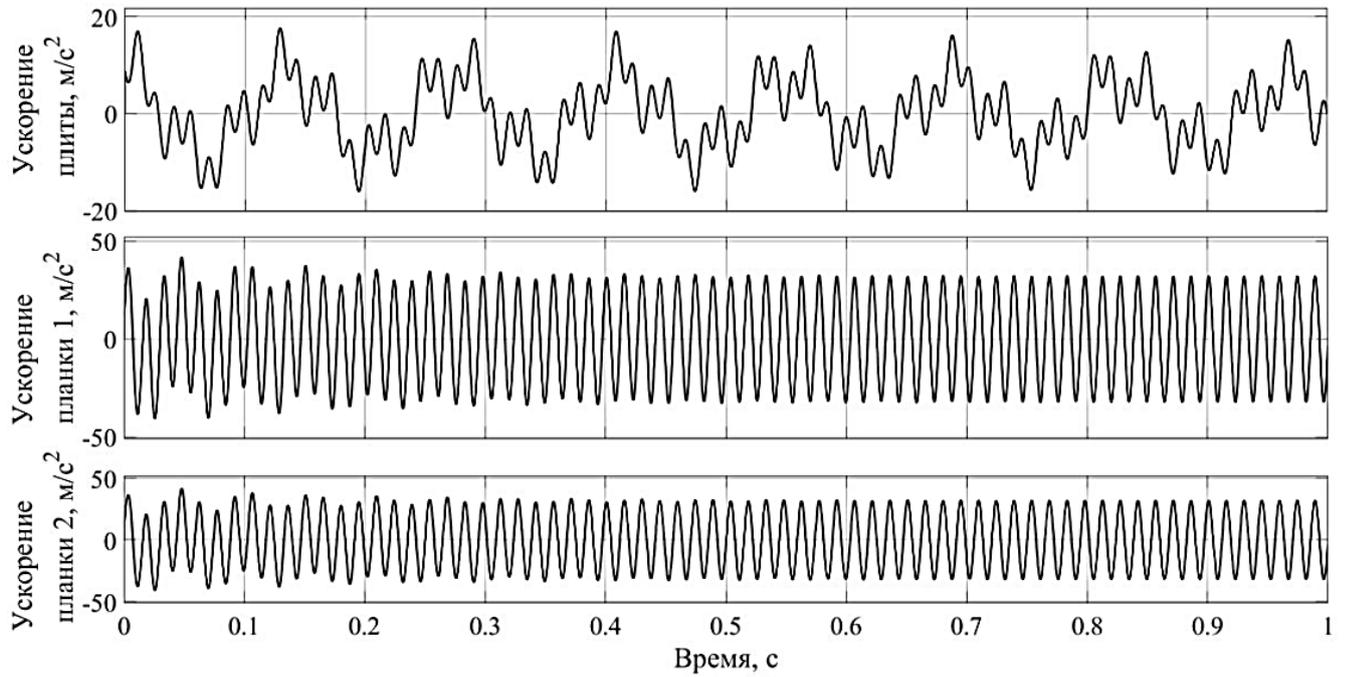


Рисунок 1.13 – Зависимости параметров колебания выглаживающей плиты асфальтоукладчика [70]

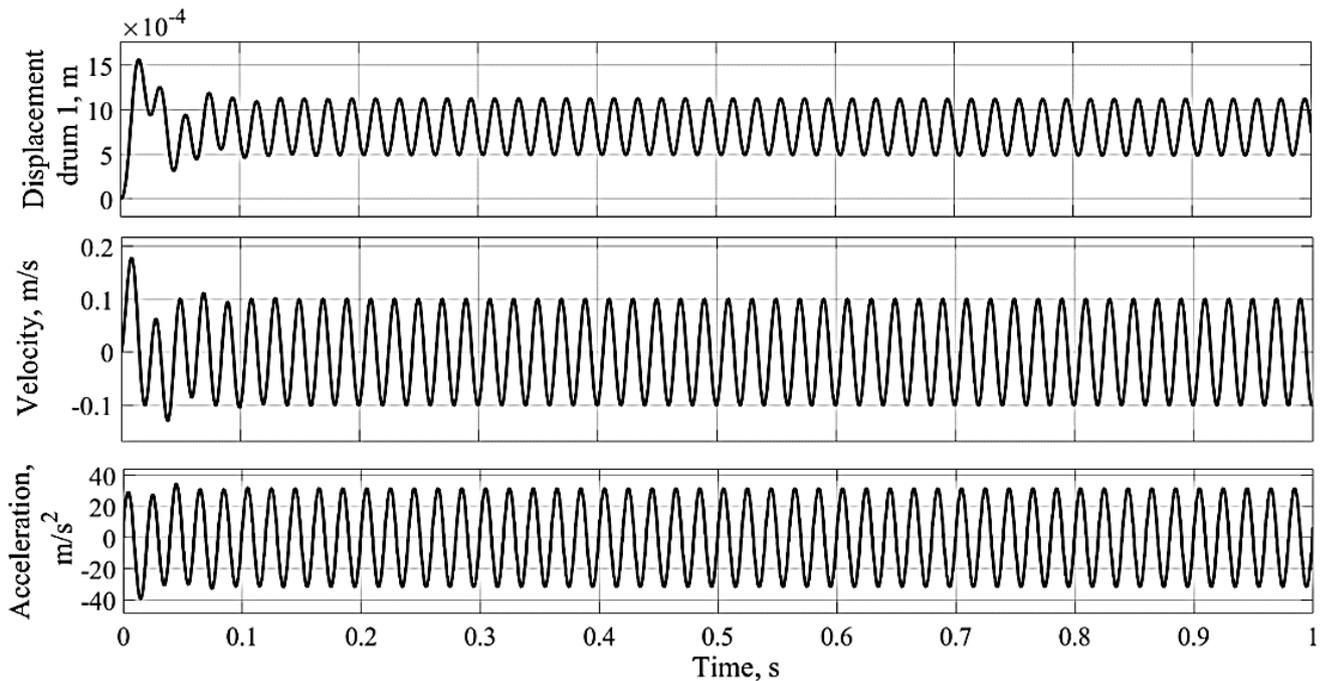


Рисунок 1.14 – Зависимости параметров колебания вальца дорожного катка [119]

Вместе с тем на данный момент активно развивается направление по разработке технологии интеллектуального уплотнения на базе искусственных нейронных сетей, с целью формирования простого и точного метода оценки

показателей уплотненности дорожных покрытий. К наиболее значимым трудам последних лет в этом направлении справедливо отнести исследования Weidong Cao и Shutang Liu. В работе [102] авторы предлагают рассмотреть каток и уплотняемый им материал, как единую систему, в которой образуются различные колебательные структуры, зависящие от степени уплотнения.

В качестве исходных данных в работе приняты сигналы виброускорения оси уплотняющего органа дорожного катка, полученные на испытательном полигоне при помощи акселерометров (рисунок 1.14).

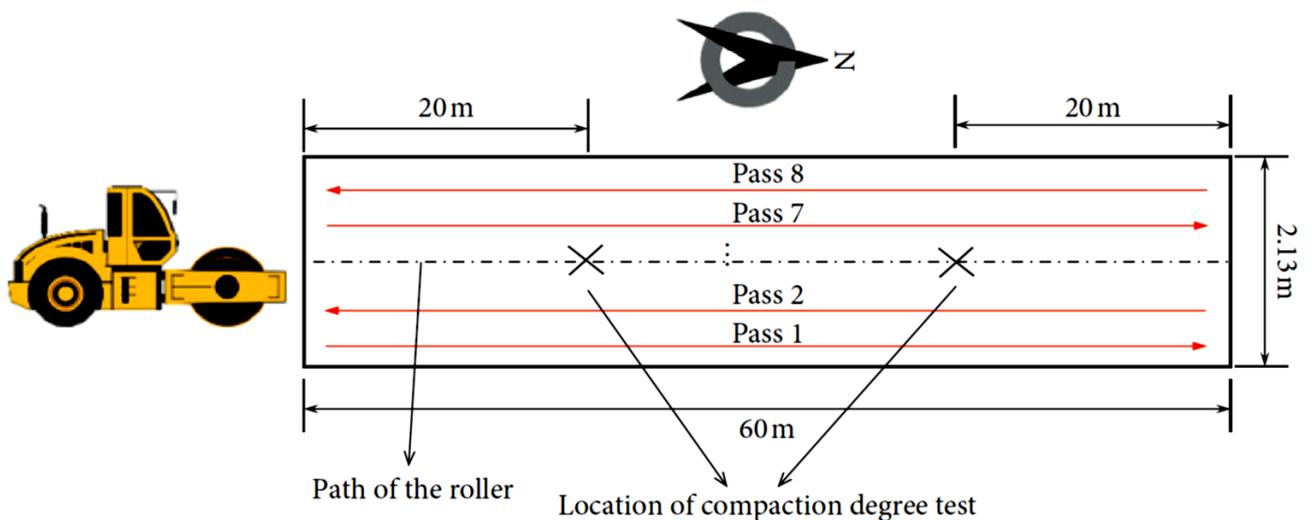


Рисунок 1.15 – Испытательный полигон [102]

В результате обработки вибрационных сигналов путем быстрого преобразования Фурье формируются массивы частотных характеристик в качестве исходных данных для обучения модели искусственной нейронной сети (рисунок 1.16).

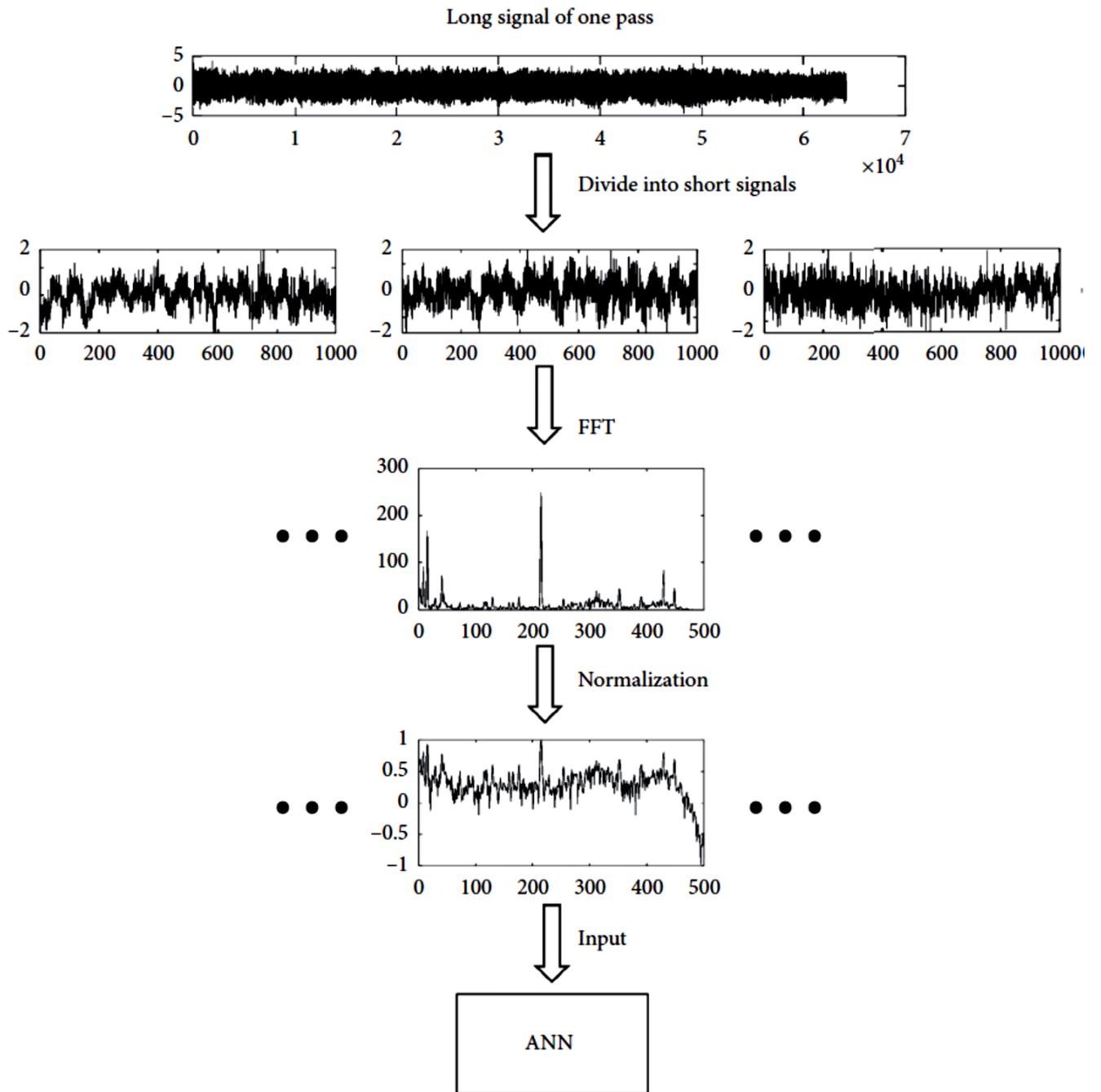


Рисунок 1.16 – Обработка сигналов [102]

В рамках исследования в работе принята многослойная нейросеть прямой связи перцептрона (рисунок 1.17).

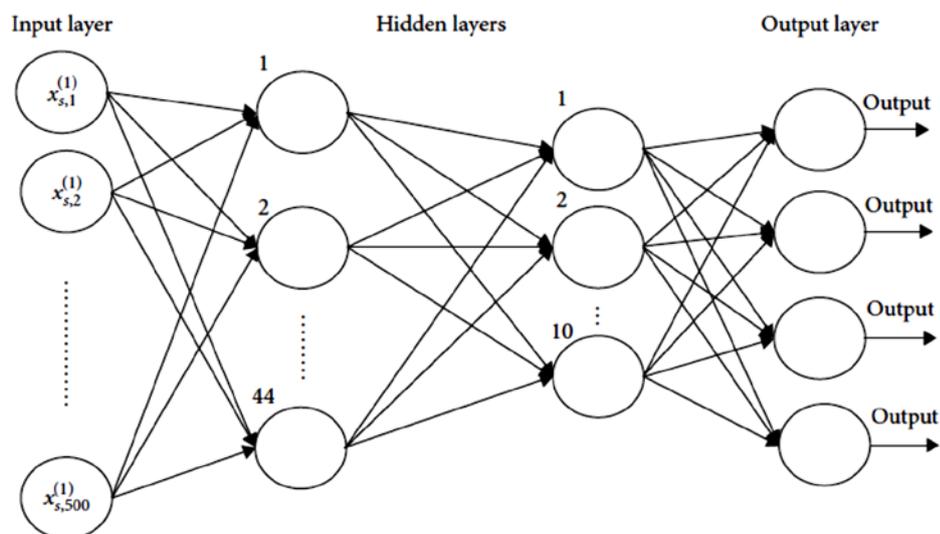


Рисунок 1.17 – Структурная схема нейросети [102]

Таким образом, сочетав метод обработки данных с интеллектуальной нейросетью, авторы получили классификатор для выявления различных характерных структур вибрации уплотняющего органа и классификации их по уровням уплотненности дорожного покрытия, производительность которого показана в виде матрицы путаницы (рисунок 1.18).

1	799 8.6%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100 0.0%
2	0 0.0%	2240 24.1%	55 0.6%	24 0.3%	96.6% 3.4%
3	0 0.0%	57 0.6%	3237 34.9%	110 1.2%	95.1% 4.9%
4	0 0.0%	19 0.2%	79 0.9%	2666 28.7%	96.5% 3.5%
	100 0.0%	96.7% 3.3%	96.0% 4.0%	95.2% 4.8%	96.3% 3.7%
	1	2	3	4	

Target class

Рисунок 1.18 – Матрица путаница по оценке уплотненности [102]

В Красноярском Сибирском федеральном университете проводятся подобные исследования по разработке систем интеллектуального контроля с использованием искусственных нейронных сетей. В работе [114] А.П. Прокопьевым и Ж.И. Набижановым с помощью программного комплекса MATLAB была создана нейросетевая система контроля уплотнения, с возможностью обучения и прогнозирования коэффициента уплотнения дорожных одежд (рисунок 1.19).

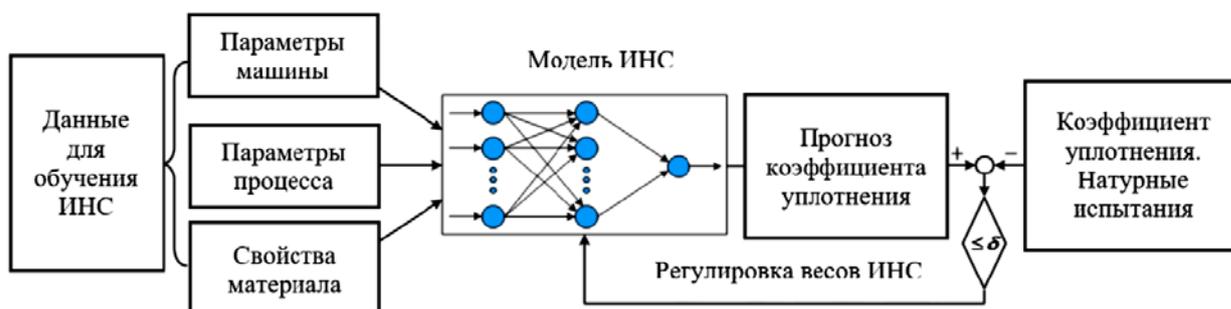


Рисунок 1.19 – Имитационная модель нейросетевой системы контроля [114]

Как итог моделирования искусственной нейронной сети авторами был получен график изменения коэффициента уплотнения асфальтовой смеси с ошибкой прогнозирования менее 10 %, что подтверждает эффективность выбранного метода (рисунок 1.20).

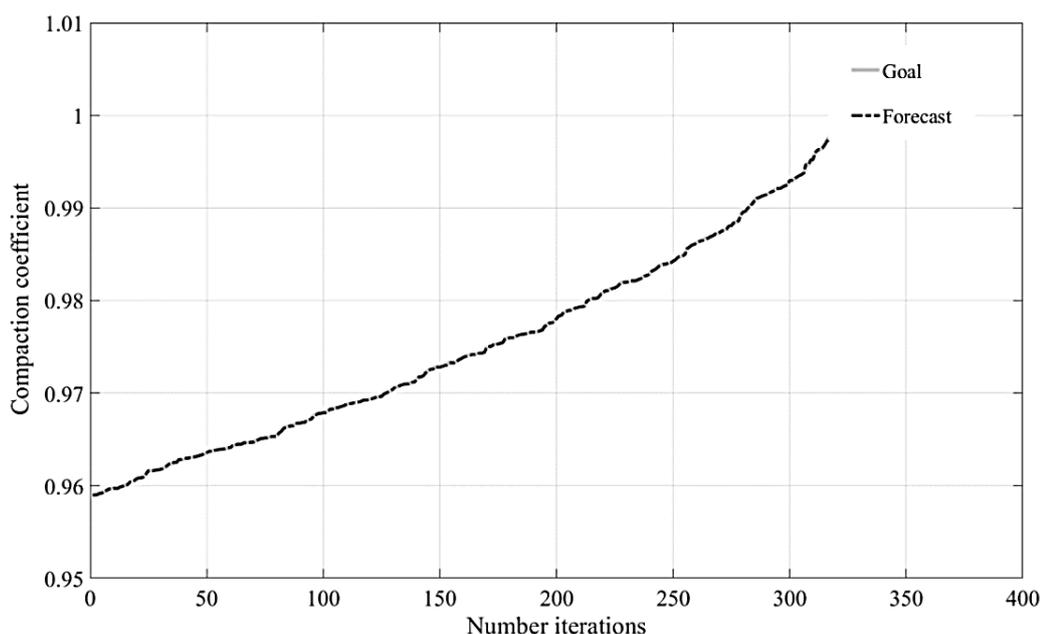


Рисунок 1.20 – Результат моделирования нейросетевой системы контроля [114]

В работах [27, 28, 29, 30] приведены сведения патентных исследований систем автоматического управления дорожными машинами в процессе формирования асфальтобетонного покрытия, за счет применения датчиков, обеспечивающих контроль состояния уплотняемой среды. На рисунках 1.21 – 1.24 представлены структурные схемы рассмотренных систем управления.



Рисунок 1.21 – Система автоматического управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси катком [27]



Рисунок 1.22 – Система автоматического управления винтового шнека асфальтоукладчика [28]



Рисунок 1.23 – Система автоматического управления дорожного катка [29]

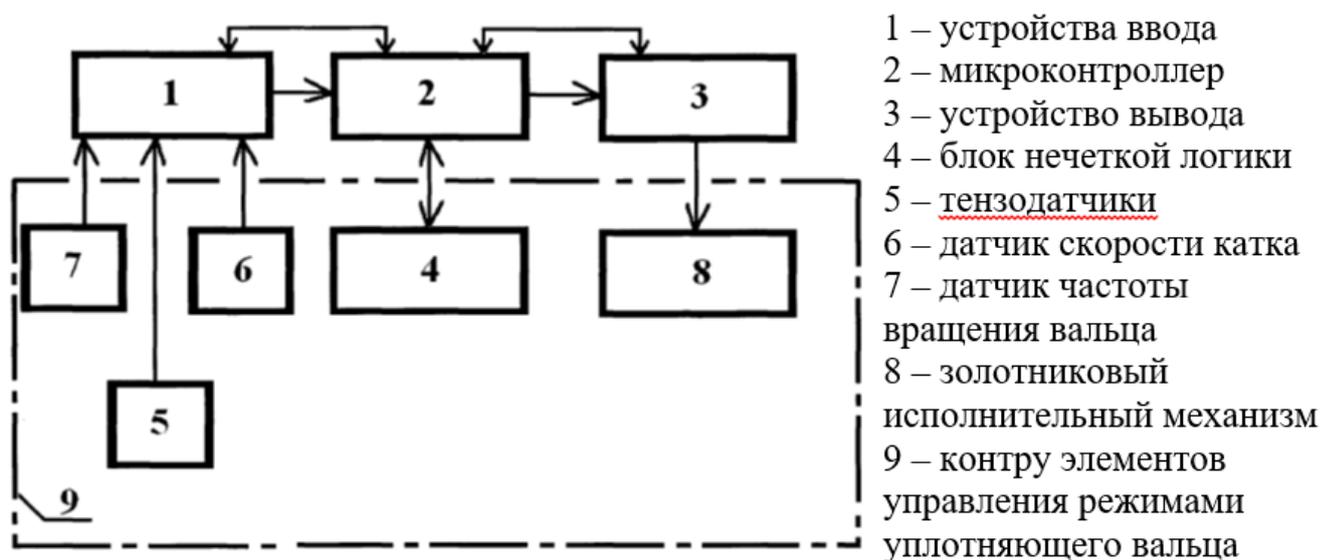


Рисунок 1.24 – Система автоматического управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком [30]

1.4 Рабочая гипотеза

Предлагается концепция метода контроля уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий вибрационными катками на основе оценки параметров уплотняемого материала. Метод базируется на внедрении комплексной автоматизированной системы контроля уплотнения в режиме онлайн-наблюдения.

Выявленные системой взаимосвязи между информационными сигналами виброколебаний вальца катка и параметрами укатываемого слоя позволят машинисту корректировать рабочие режимы катка, а также отправлять полученную информацию на соседнюю машину для оптимизации процесса при работе тандемом. Наличие подобной системы контроля с учетом известных САУ значительно повысит уровень автоматизации дорожного строительства и доведет катки до соответствия понятию «умный каток». Структурная схема автоматизированного контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий показана на рисунке 1.25.



Рисунок 1.25 – Структурная схема автоматизированного контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий

В процессе контроля качества уплотнения осуществляется измерение теплового состояния поверхности асфальтобетона инфракрасными датчиками, ровности и толщины формируемого покрытия ультразвуком, вибрационного воздействия вальца катка на асфальтобетонную смесь акселерометром. Сигналы с выхода датчиков поступают на вход блока управления контроллера для

преобразования в цифровую информацию в табличном виде. Полученная информация передается на информационное табло катка и в базу хранения. Одновременно осуществляется обмен информацией в онлайн-режиме.

Выводы по первой главе

На основании проведенного анализа существующих исследований по вопросу контроля уплотнения асфальтобетонных покрытий, сделаны следующие выводы:

1. Качество уплотнения асфальтобетона является определяющим показателем, оказывающим прямое влияние на срок службы автомобильных дорог за счет формирования в процессе уплотнения износостойкой, плотной упаковки компонентов дорожного покрытия.

2. Аспекты контроля плотности асфальтобетонных покрытий являются предметом научного интереса значительного числа ученых. За рубежом на данный момент выпускается обширный ряд систем автоматизированного контроля уплотнения, повышающих качество выполнения дорожных работ. Однако эти системы не предусматривают возможность определения действительной плотности асфальтобетона при укатке вибрационными катками и не обеспечивают комплексный мониторинг состояния параметров материала на протяжении всего процесса уплотнения.

3. С целью устранения выявленного недостатка рассмотрены теоретические предпосылки для разработки метода контроля уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий вибрационными катками на основе оценки параметров уплотняемого материала. Используемые в методе модели контроля ровности и толщины формируемого покрытия дороги, контроля вибрационного воздействия вальца катка на асфальтобетонную смесь и контроля ее температурного состояния во время укатки позволят определять качество уплотнения при различных рабочих режимах катка, условиях окружающей среды и состояниях уплотняемого материала.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВАЛЬЦА ВИБРАЦИОННОГО КАТКА С АСФАЛЬТОБЕТОНОМ

2.1 Разработка имитационной модели процесса взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном

Моделирование с целью регистрации динамических параметров реализуется с помощью разного рода программных комплексов, перечень наиболее популярных из них приведен ниже.

Среда MvStudium, функционирующая на платформе MS Windows, применяется для моделирования сложных динамических систем. MvStudium позволяет в короткие сроки разрабатывать визуальные интерактивные модели, состоящие из большого количества элементов. Этой возможностью MvStudium не ограничивается – в среде можно не только создавать модели, но и активно использовать их для проведения вычислительных экспериментов. MvStudium пригодна для работы с объектно-ориентированным моделированием, поддерживает 2D и 3D-анимацию, а также позволяет пользователям конструировать свои собственные компоненты, пользуясь входным языком.

LabVIEW является средой графического программирования и моделирования динамических систем, созданной компанией National Instruments. Пользователю доступны средства для разработки моделей с использованием графического языка пакета и возможности для проведения экспериментов над созданными моделями, сбора и анализа полученных данных.

Simulink является интегрированной средой моделирования к пакету MATLAB, который был разработан компанией MathWorks. При создании моделей с использованием Simulink происходит реализация принципа визуального программирования, сообразно которому пользователь разрабатывает модель дифференциального уравнения или устройства. Существенное отличие данного продукта от традиционных способов моделирования заключается в том, что пользователю не нужно обладать навыками программирования, глубокими

знаниями в областях языка программирования и численных методов математики, ему будет достаточно владения компетенциями в области своих научных интересов. Библиотека Simulink предоставляет набор сформированных модулей для создания различных моделей.

SimInTech - отечественная программа математического моделирования, предназначенная для модельно-ориентированной разработки систем автоматического управления, представленная компанией 3В Сервис. В качестве главной задачи продукта обозначена расчетная проверка функционирования устройств управления многокомпонентными техническими объектами. Программное обеспечение состоит из графической среды разработки и исполнительной системы реального времени NordWind. Стоит отметить многообразие областей, в которых может быть применена SimInTech: физика, электротехника, динамика механизмов, астрономия и другие. Данное обстоятельство говорит не только об универсальности продукта, но и об удобстве в использовании пользователями, интересы которых лежат в разных областях деятельности. Основные направления работы SimInTech заключаются в следующем: моделирование различных технологических процессов, которые наблюдаются в разного рода объектах, одновременное администрирование и моделирование системы их управления. Данная деятельность приводит к повышению качества в сфере проектирования САУ, благодаря контролю, анализу и проверке тех решений, которые принимаются на каждом этапе реализации проекта. Еще одним пунктом работы SimInTech является развернутое изучение, сбор и обработка данных о нестационарных процессах, происходящих в ядерных и тепловых энергетических установках, в САУ и других технических системах, динамика которых может быть изображена как система дифференциально алгебраических уравнений. Дополнительные возможности, предлагаемые продуктом, состоят в поиске и устранении ошибок в алгоритмах управления, создание исходного кода с использованием языка Си для программируемых контроллеров Scilab – пакет математических программ, предназначенных для выполнения вычислений инженерного и научного

характера, например, поиск решений нелинейных уравнений, вопросы в аспектах оптимизации, дифференцирование и интегрирование и другие.

Компаний Enterprises разработан продукт Scilab. Среди направлений работы Scilab следует выделить возможности для разработки и редактирования различных типов графиков. При многих достоинствах Scilab, таких как: довольно широкий выбор предустановленных команд, операторов и функций, самой характерной чертой системы является ее гибкость. Пользователю предоставляется возможность не только включить самостоятельно созданную им команду или функцию в число уже имеющихся, но и обращаться к ним так же, как и к встроенным. Схожесть языков программирования Scilab и Matlab и наличие утилитов, с помощью которых можно осуществлять конвертацию документов Matlab в Scilab, приводят к тому, что еще одним заметным достоинством Scilab является высокий уровень развитости языка. Среди остальных преимуществ данной программы необходимо отметить ее способность обращаться с различным числом специальных функций, возможность работать с матричными и многочленными структурами, а также наличие инструментов для построения и решения графиков.

OpenModelica представляет собой программное обеспечение, находящееся в открытом доступе для пользователей, предназначенное для решения различных задач, касающихся таких областей, как создание моделей, симуляция, анализ сложных систем. В основе данного продукта лежит язык Modelica, являющийся языком непосредственно моделирования. Именно с помощью создания Modelica был внесен значительный вклад в решение проблемы автоматизации компонентного моделирования в условиях применения компонентов с ненаправленными связями. Многие области прикладной деятельности характеризуются отсутствием направленности внешних переменных, так, в электрических схемах являются условными направления токов и знаки напряжений. Существенные проблемные вопросы, появляющиеся в свете этого обстоятельства, были преодолены создателями Modelica. Применение компонентов с ненаправленными связями дало начало тому, что сфера

использования компонентного моделирования стала расширяться. До этого подобные модели имели способность функционировать исходя только из заданного ряда основных компонентов, которые не имели возможности быть созданными на входном языке моделирования. Впоследствии язык Modelica поспособствовал тому, что наборы компонентов для механических, электрических и прочих систем стали создаваться посредством использования средств самого языка. Пользователь способен выстраивать из этих компонентов структуры любой сложности, а конечные уравнения для них будут сформулированы автоматически, по тому же принципу, что используется моделями Simulink.

На основании проведенного анализа программных продуктов исследование закономерностей параметров, возникающих при взаимодействии вальца катка с асфальтобетоном, реализовано в Matlab&Simulink.

Для этого принята математическая модель процесса уплотнения, рассмотренная в работе [62] (рисунке 2.1).

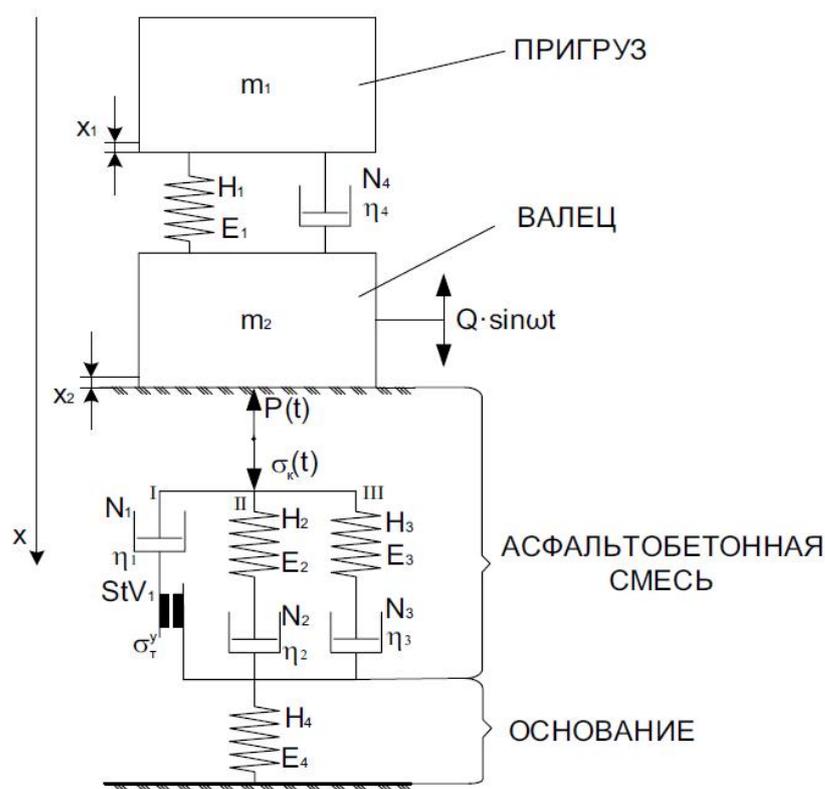


Рисунок 2.1 – Математическая модель процесса уплотнения [62]

Модель имитирует взаимодействие вибрационного катка с уплотняемым материалом. Модель выполнена в виде двухмассовой системы, платформы машины и вальца (m_1 и m_2), связанных упругими (E_1) и диссипативными (E_4) элементами. Асфальтобетонная смесь, в свою очередь, также содержит упругие элементы (E_2 и E_3), а основание дороги – диссипативные элементы ($E_{1,2,3}$).

Колебательный процесс рассматриваемой модели записывается в виде системы уравнений [63]:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b_f \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c(x_1 - x_2) = m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 - b_f \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c(x_1 - x_2) = Q \cdot \sin \omega t + m_2 \cdot g - P(t), \end{cases} \quad (2.1)$$

где m_1 – масса рамы вальца, кг;

m_2 – масса вальца, кг;

x_1 – вертикальное перемещение рамы вальца, м;

x_2 – вертикальное перемещение вальца, м;

b_f – коэффициент вязкого трения амортизаторов, Па·с/м;

c – жесткость амортизаторов, Н/м;

Q – вынуждающее усилие, Н;

ω – угловая скорость вращения вибровозбудителя, Гц;

t – текущее время вибрационного воздействия, с;

$P(t)$ – реакция уплотняемого материала на валец, Н.

Суммируем приведенные уравнения:

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 + m_2 \cdot \ddot{x}_2 = m_2 \cdot g + m_2 \cdot g + Q \cdot \sin \omega t - P(t) \quad (2.2)$$

Выводим $P(t)$:

$$P(t) = Q \cdot \sin \omega t - m_1 \cdot \ddot{x}_1 - m_2 \cdot \ddot{x}_2 + m_1 \cdot g + m_2 \cdot g \quad (2.3)$$

Вычисляем контактное давление вальца:

$$\sigma_k(t) = \frac{P(t)}{S(t)}, \quad (2.4)$$

где $S(t)$ – площадь контакта вальца с уплотняемым материалом, м^2 .

Вычисляем площадь контакта:

$$S(t) = L(t) \cdot B, \quad (2.5)$$

где $L(t)$ – длина дуги контакта вальца, м;

B – ширина вальца, м.

Контактное давление в любой момент времени вычисляется по формуле:

$$\sigma_k(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L(t) \cdot B} + \frac{Q}{L(t) \cdot B} \cdot \sin \omega t - \frac{0.02 \cdot m_1 + m_2}{L(t) \cdot B} \cdot h_c(t) \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2}, \quad (2.6)$$

где ε – относительная деформация уплотняемого материала;

$h_c(t)$ – толщина деформируемого слоя, м.

Реология модели состояния уплотняемого материала описывается тремя параллельными циклами при соблюдении следующих условий:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t) = \varepsilon_3(t) \quad (2.7)$$

$$\sigma_k(t) = \sigma_1(t) = \sigma_2(t) = \sigma_3(t) \quad (2.8)$$

После преобразования уравнений 2.7 и 2.8 получаем систему уравнений контактного давления вальца и относительной деформации уплотняемого материала:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2} = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{(0.02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_c(t)} + \frac{Q}{(0.02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_c(t)} \cdot \sin \omega t - \\ - \frac{L(t) \cdot B}{(0.02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_c(t)} \cdot \sigma_k(t) \\ \frac{d^2 \sigma_k(t)}{dt^2} = - \frac{\theta_2 \cdot n + \theta_3 \cdot m}{\theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m} \cdot \frac{d\sigma_k(t)}{dt} - \frac{[\sigma_k(t) - \sigma_T^y]}{\theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m} + \\ + \frac{\eta_2 + \eta_3}{\theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{\eta_2 \cdot \theta_3 + \eta_3 \cdot \theta_2}{\theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m} \cdot \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2}, \end{array} \right. \quad (2.9)$$

где θ_2, θ_3 – время быстрой и медленной релаксации напряжений, с; n, m – коэффициенты распределения напряжений; η_2, η_3 – вязкость материала во время быстрой и медленной релаксации напряжений, Па·с.

Упрощаем систему уравнений (2.9) [23]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2} = a_0 + b_0 \cdot \sin(\omega t) - c_0 \cdot \sigma_k(t); \\ \frac{d^2 \sigma_k(t)}{dt^2} = -c_1 \frac{d\sigma_k(t)}{dt} - c_2 [\sigma_k(t) - \sigma_T^y] + c_2 (\eta_2 + \eta_3) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \\ + c_2 (\eta_2 \cdot \theta_3 + \eta_3 \cdot \theta_2) \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2}, \end{array} \right. \quad (2.10)$$

$$\text{где } a_0 = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{(0.02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_c(t)}; \quad b_0 = \frac{Q}{(0.02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_c(t)}; \quad c_0 = \frac{L(t) \cdot B}{(0.02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_c(t)};$$

$$c_1 = \frac{\theta_2 \cdot n + \theta_3 \cdot m}{\theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m}; \quad c_2 = \frac{1}{\theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m}.$$

На основе математической модели в Matlab&Simulink построена имитационная модель взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетонным покрытием (рисунок 2.2), имеющая в своем составе две

подсистемы: SubSystem 1, описывающую колебательные движения вальца вибрационного катка (рисунок 2.3) и SubSystem 2, отражающую деформационные свойства уплотняемого материала (рисунок 2.4) [67].

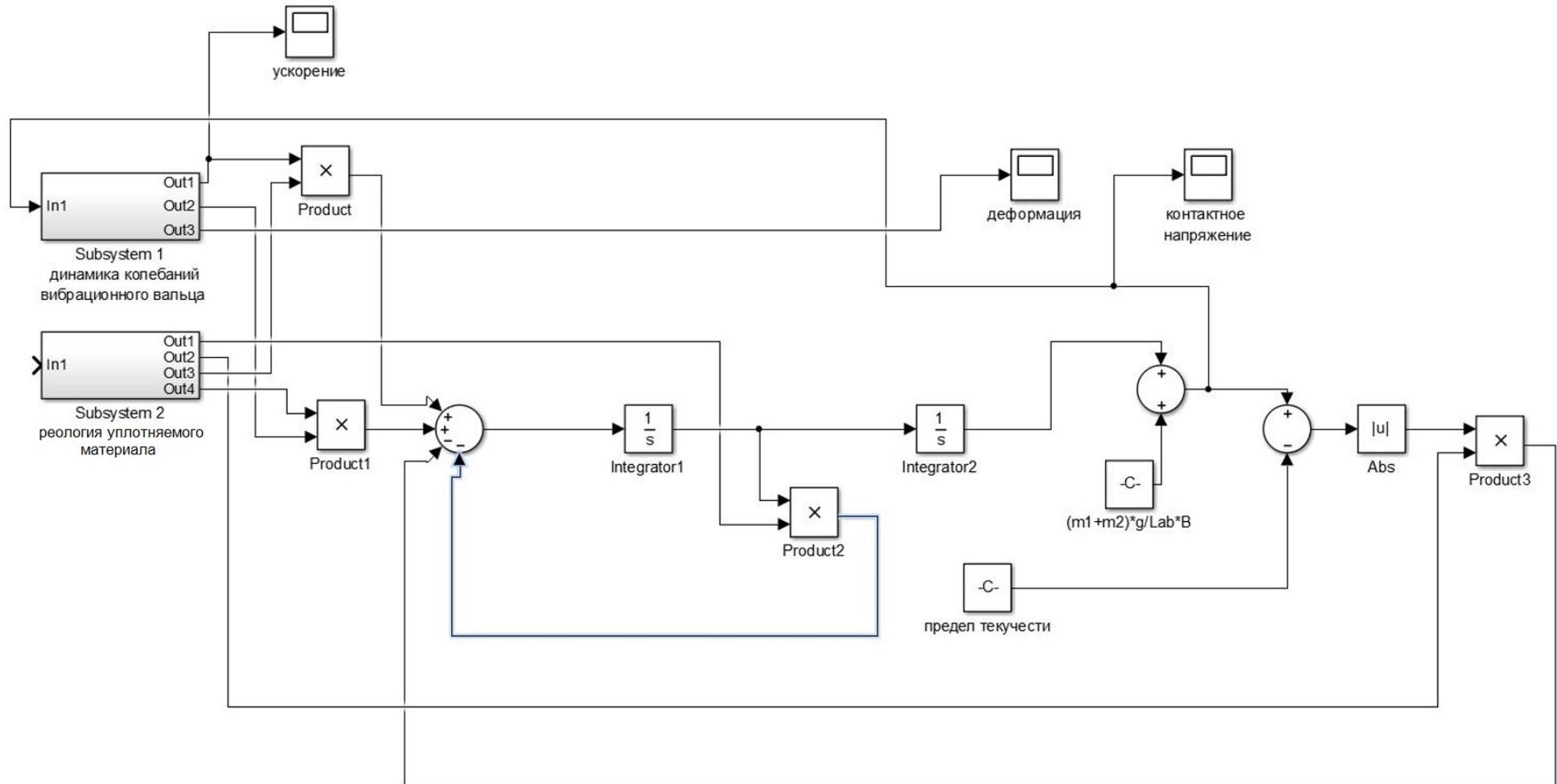


Рисунок 2.2 – Имитационная модель взаимодействия вальца катка с асфальтобетоном

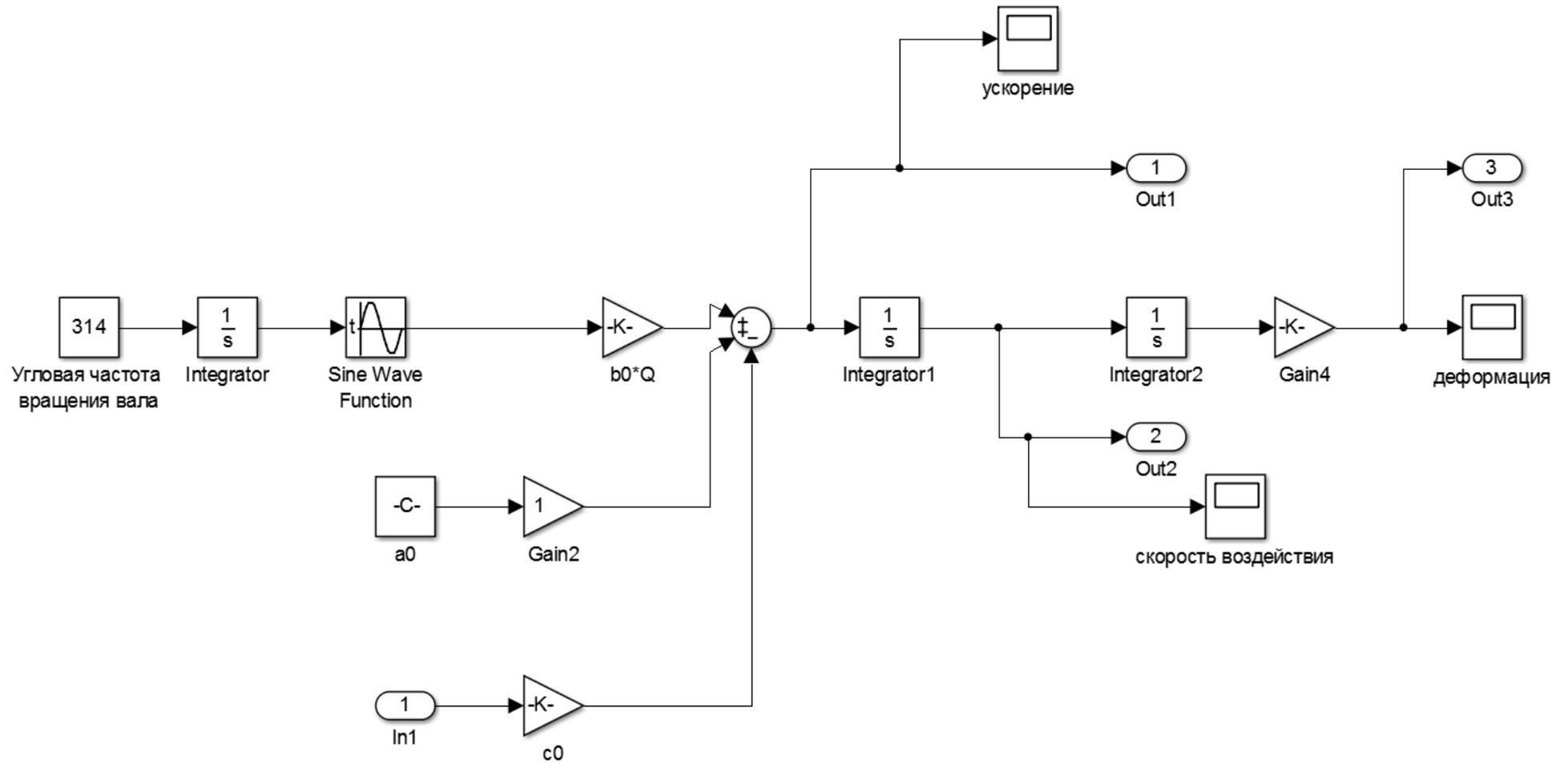


Рисунок 2.3 – SubSystem1

Задающим сигналом в системе выступает угловая частота вращения вибровозбудителя. Входом In1 в Subsystem 1 является величина контактного давления вальца, а выходом – величина деформации уплотняемого материала. Выходами SubSystem 2 являются параметры материала для реализации модели второго уравнения системы (2.10).

В результате моделирования были установлены несовершенства разработанной модели в части недостаточной информативности параметров вибрационного вальца и потребности определения вязкости асфальтобетона для каждого прохода катка, что, ввиду ее зависимости от множества факторов процесса уплотнения, затруднительно на подготовительном этапе.

С целью повышения информативности в модели была реализована возможность регистрации длины дуги контакта вальца при моделировании процесса уплотнения асфальтобетона путем преобразования первого уравнения системы уравнений (2.10). В результате уравнение приняло следующий вид [66]:

$$L(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{\sigma_k(t) \cdot B} + \frac{Q \cdot \sin \omega t}{\sigma_k(t) \cdot B} - \frac{(0.02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_c(t)}{\sigma_k(t) \cdot B} \cdot \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2} \quad (2.11)$$

С целью определения вязкости используется ее зависимость от времени релаксации, приведенная в работе [34]:

$$(n + m) \cdot E(t) = \frac{\eta_2}{\theta_2} + \frac{\eta_3}{\theta_3} = \eta(t) \cdot \left(\frac{n}{\theta_2} + \frac{m}{\theta_3} \right) \quad (2.12)$$

Вязкость деформируемой среды вычисляется по формуле:

$$\eta(t) = \frac{(n + m) \cdot E(t) \cdot \theta_2 \cdot \theta_3}{n \cdot \theta_3 + m \cdot \theta_2}, \quad (2.13)$$

где E – динамический модуль деформации, Па.

Преобразовав второе уравнение системы уравнений (2.10) с помощью формул (2.12 и 2.13), получаем выражение взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном, учитывающее параметр модуля деформации [34]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\sigma_k(t)}{dt^2} = & -c_1(n\theta_2 + m\theta_3) \cdot \frac{d\sigma_k}{dt} - c_2[\sigma_k(t) - \sigma_T^y] + \\ & + \frac{c_3 E(t) \cdot (n+m)}{m \cdot \theta_2 + n \cdot \theta_3} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + c_3 E(t) \frac{d^2\varepsilon(t)}{dt^2}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где $c_3 = \frac{n+m}{n \cdot m}$

Ввиду того, что в полученном выражении нет показателя вязкости материала, недостаток, выявленный в предыдущем уравнении, исключается и, как следствие, данное выражение позволяет описать процесс взаимодействия вальца вибрационного катка с уплотняемым материалом на всех этапах уплотнения.

Таким образом, после всех преобразований система уравнений (2.10), используемая при построении имитационной модели, принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} L(t) = & \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{\sigma_k(t) \cdot B} + \frac{Q \cdot \sin \omega t}{\sigma_k(t) \cdot B} - \frac{(0.02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_c(t)}{\sigma_k(t) \cdot B} \cdot \frac{d^2\varepsilon(t)}{dt^2}; \\ \frac{d^2\sigma_k(t)}{dt^2} = & -c_1(n\theta_2 + m\theta_3) \cdot \frac{d\sigma_k}{dt} - c_2[\sigma_k(t) - \sigma_T^y] + \\ & + \frac{c_3 E(t) \cdot (n+m)}{m \cdot \theta_2 + n \cdot \theta_3} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + c_3 E(t) \frac{d^2\varepsilon(t)}{dt^2} \end{aligned} \right. \quad (2.15)$$

Исходя из полученной системы уравнений (2.15), в представленные ранее подсистемы имитационной модели Subsystem1 и Subsystem2 были добавлены вспомогательные блоки с целью реализации возможности определения длины дуги контакта вальца и учета модуля деформации уплотняемого материала, вместо его вязкости (рисунок 2.5 и 2.6).

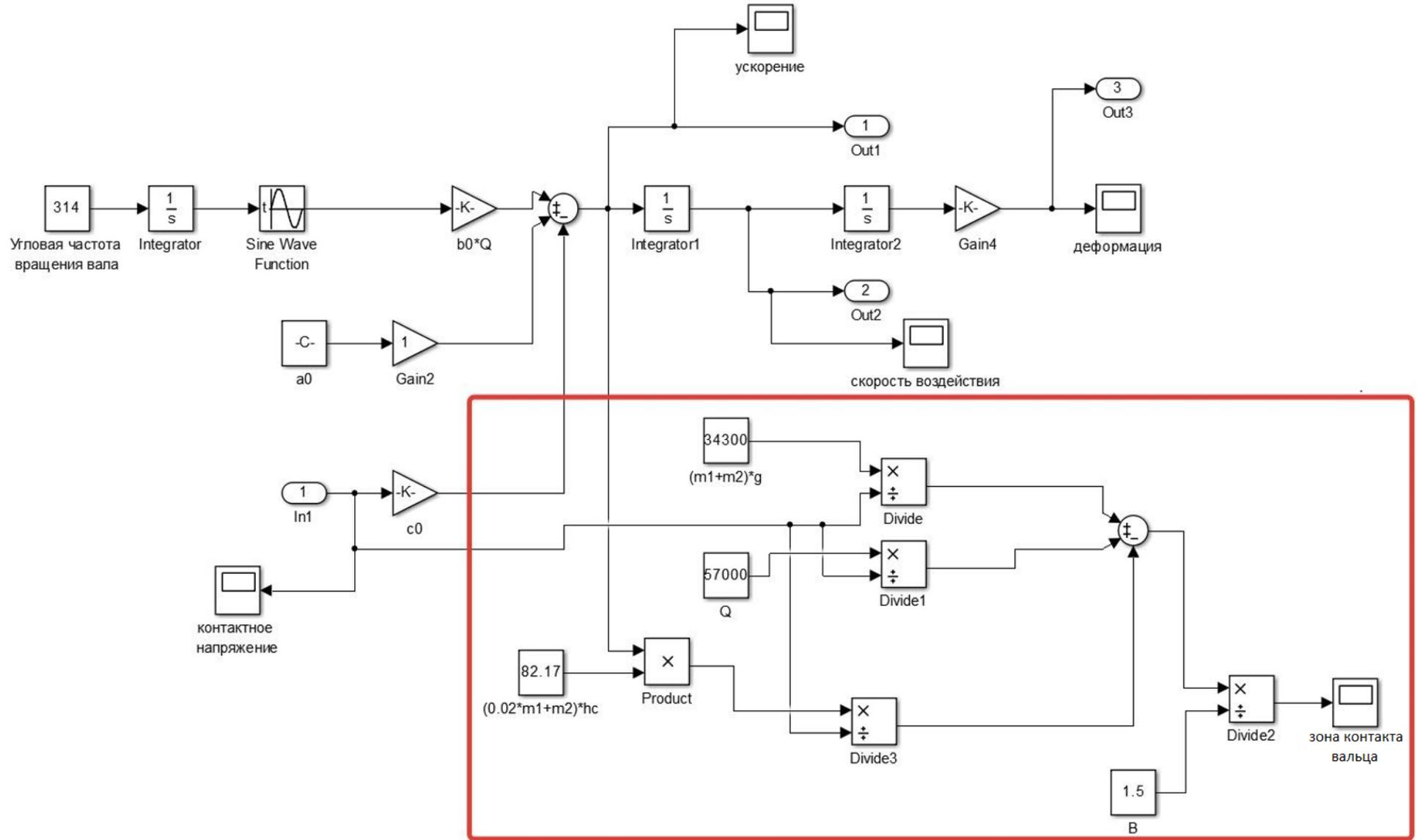


Рисунок 2.5 – Subsystem1, позволяющая определять зону контакта вальца

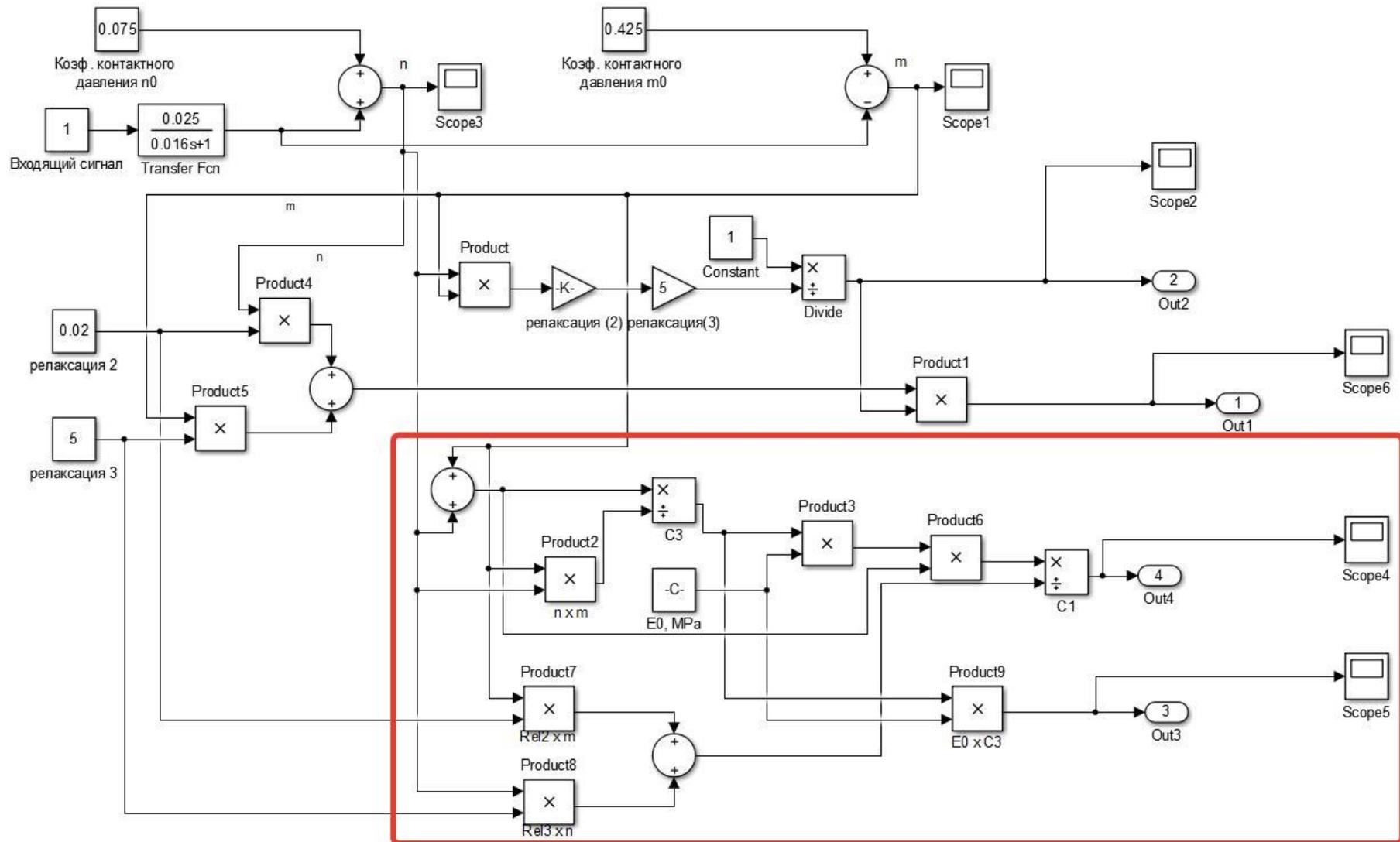


Рисунок 2.6 – Subsystem2, учитывающая параметр модуля деформации

2.2 Результаты имитационного моделирования

В рамках моделирования соблюдались сопоставимые реальному процессу укатки асфальтобетона динамические параметры: коэффициенты распределения контактного давления и уплотнения и обусловленные ими параметры уплотняемого материала.

В таблице 2.1 приведены исходные данные при моделировании процесса взаимодействия вальца дорожного катка с асфальтобетоном.

Таблица 2.1 – Исходные данные при моделировании процесса взаимодействия вальца дорожного катка с асфальтобетоном

Наименование	Условное обозначение	Величина параметра
Вынуждающее усилие вибратора, Н	Q	57000
Ширина вальца, м	B	1,5
Масса пригруза (масса рамы вальца), кг	m_1	2174
Масса вальца, кг	m_2	1326
Время релаксации в блоке 2, с	θ_2	0,02
Время релаксации в блоке 3, с	θ_3	5,0
Предел текучести, МПа	σ_m	0,9
Длина дуги контакта вальца, м	L	0,024
Коэффициенты распределения контактного давления	n_0	0,075
	m_0	0.425
Скорость катка, м/с	V	0,55
Толщина деформируемого слоя, м	h_c	0,056
Начальный коэффициент уплотнения	K_y	0,94

На рисунке 2.7 показаны временные зависимости ускорения вальца и рамы катка при моделировании рабочего процесса уплотнения.

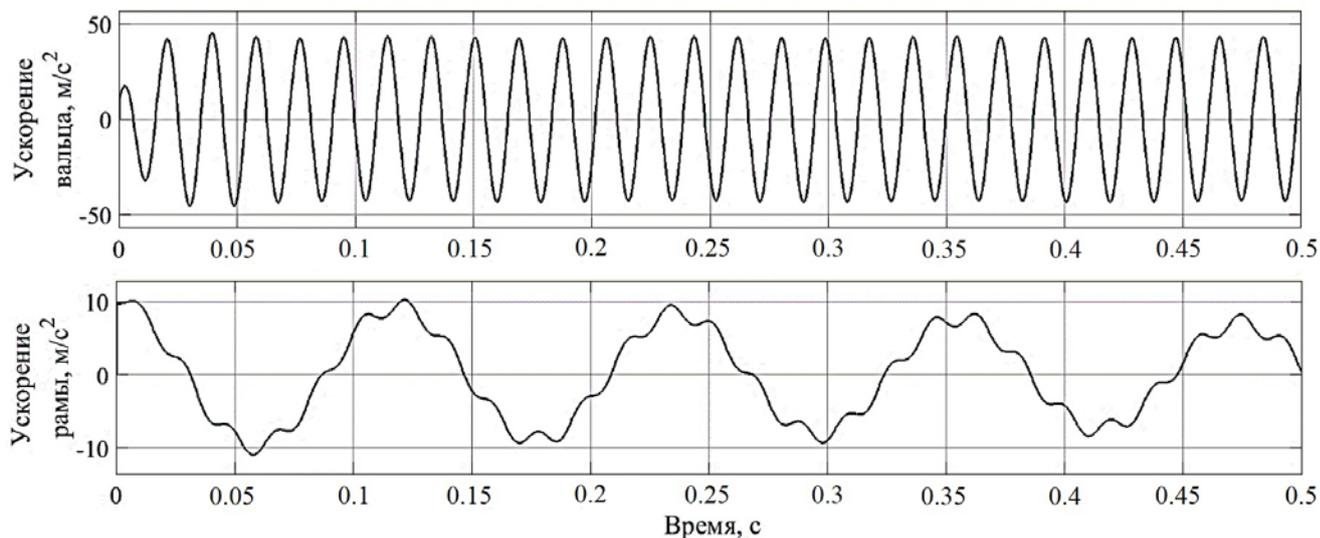


Рисунок 2.7 – Зависимости ускорения вальца и рамы вибрационного катка

Временные зависимости ускорения вальца и рамы катка носят синусоидальный характер. Частота колебаний вальца составила 54 Гц. Ускорение вальца составило 48 м/с², ускорение рамы катка – 10 м/с². При этом контактные усилия на вальце достигли 210 кН (рисунок 2.8).

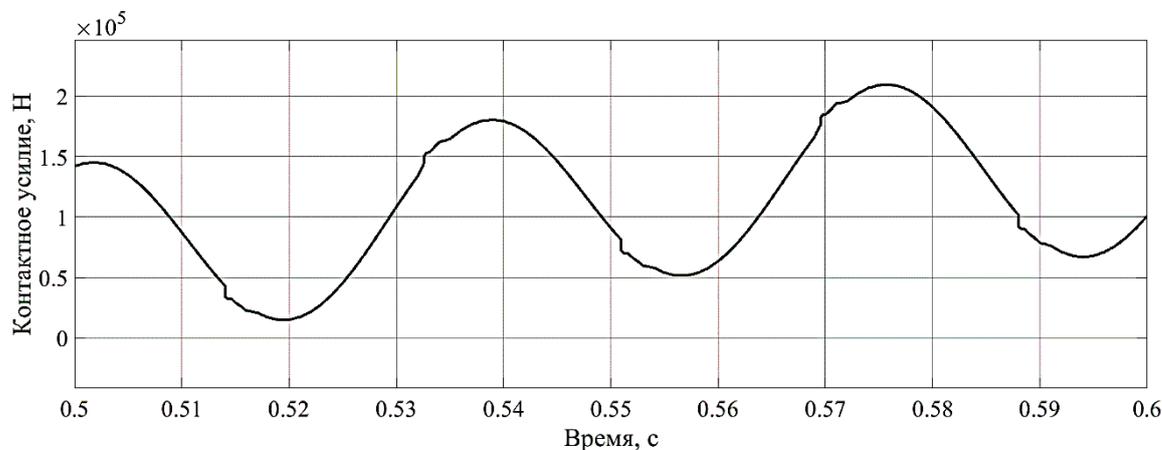


Рисунок 2.8 – Контактное усилие вальца на уплотняемый материал

Полученные графические зависимости, приведенные на рисунке 2.7, имеют хорошее соответствие с данными работ [119, 129]. Гармонические зависимости имеют линейный характер. Это соответствует начальному и среднему этапам уплотнения вибрационными катками.

Контактное усилие вальца, приведенное на рисунке 2.8, характеризуется как гармоническое с признаками нелинейности. Это связано с соотношением параметров вибрационного катка и асфальтобетона в процессе уплотнения. При этом значения контактного усилия удовлетворительно соответствуют данным полученным авторами в научной работе [77] (рисунок 2.9).

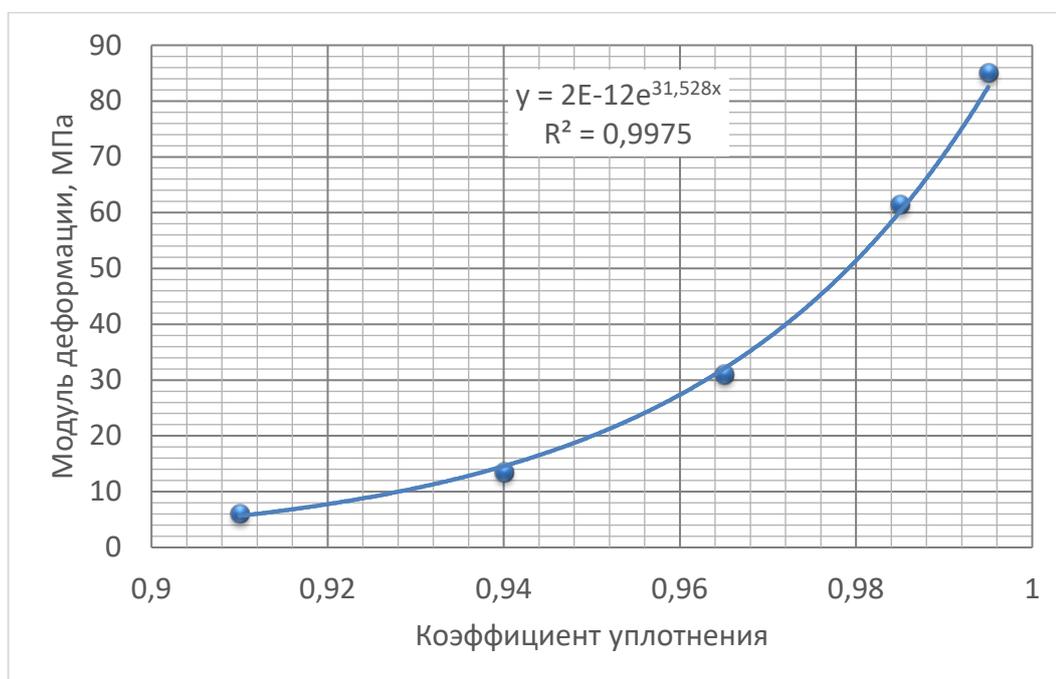


Рисунок 2.9 – Зависимость модуля деформации от коэффициента уплотнения

Коэффициент уплотнения в исследовании определялся по формуле [77]:

$$K_y = \frac{K_{i-1} h_c}{h_c - e}, \quad (2.16)$$

где e – абсолютная деформация уплотняемого материала;

i – номер прохода катка.

На рисунках 2.10 – 2.14 приведены зависимости изменяющихся с каждым проходом вибрационного катка параметров асфальтобетона, полученные в результате моделирования.

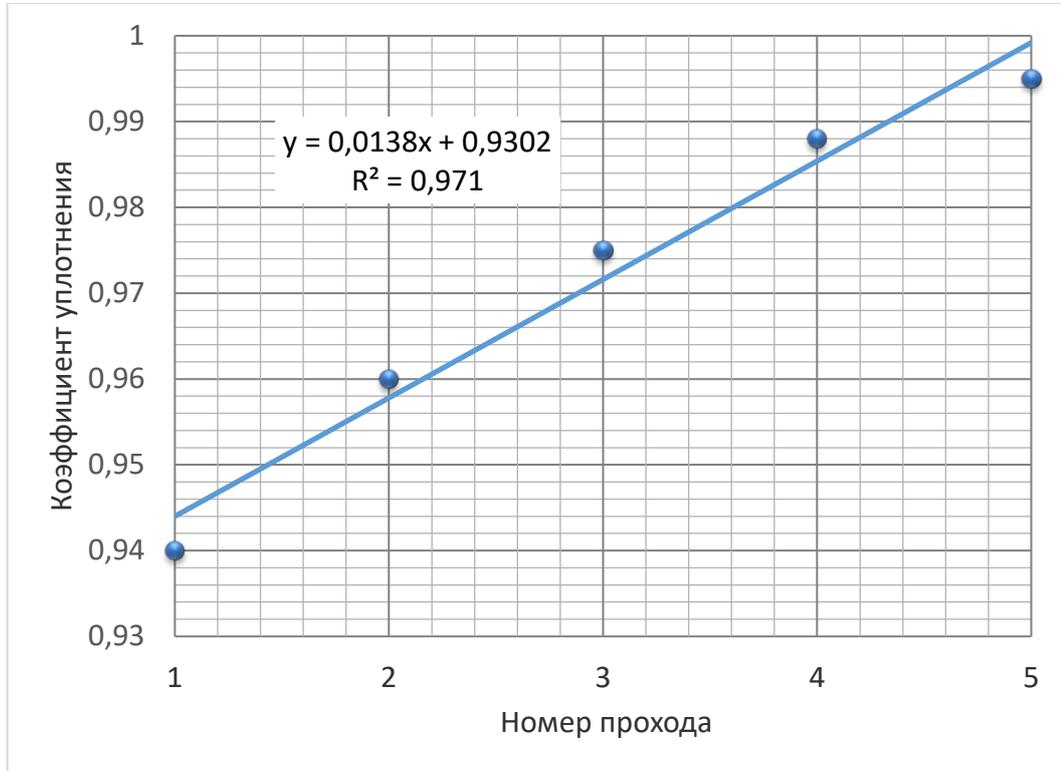


Рисунок 2.10 – График изменения коэффициента уплотнения

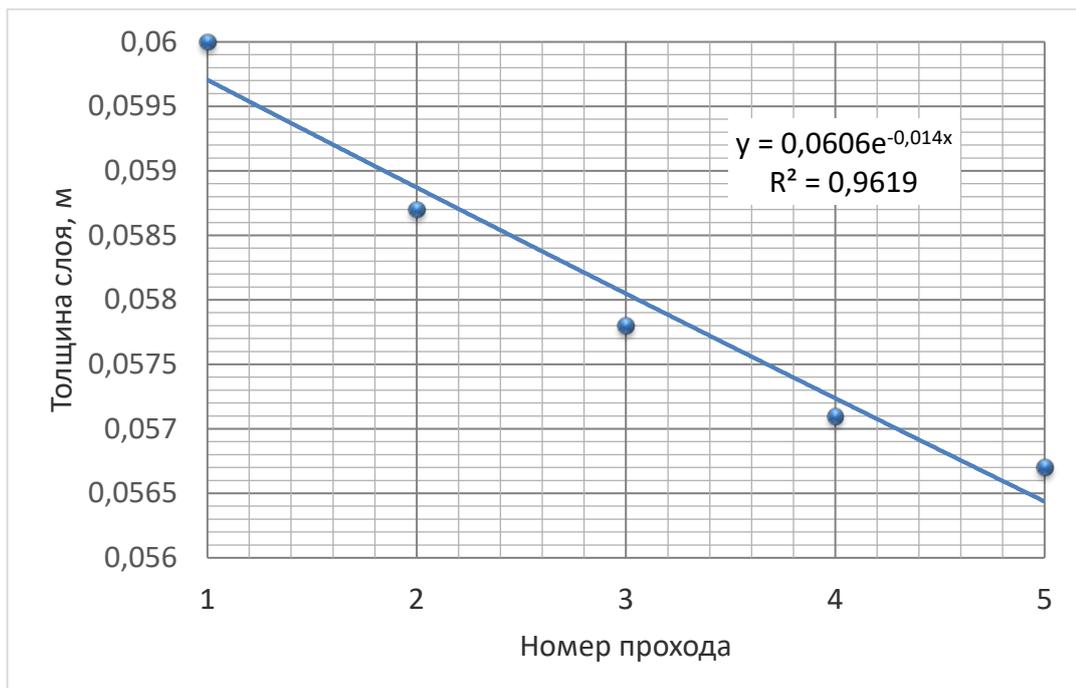


Рисунок 2.11 – График изменения толщины уплотняемого слоя

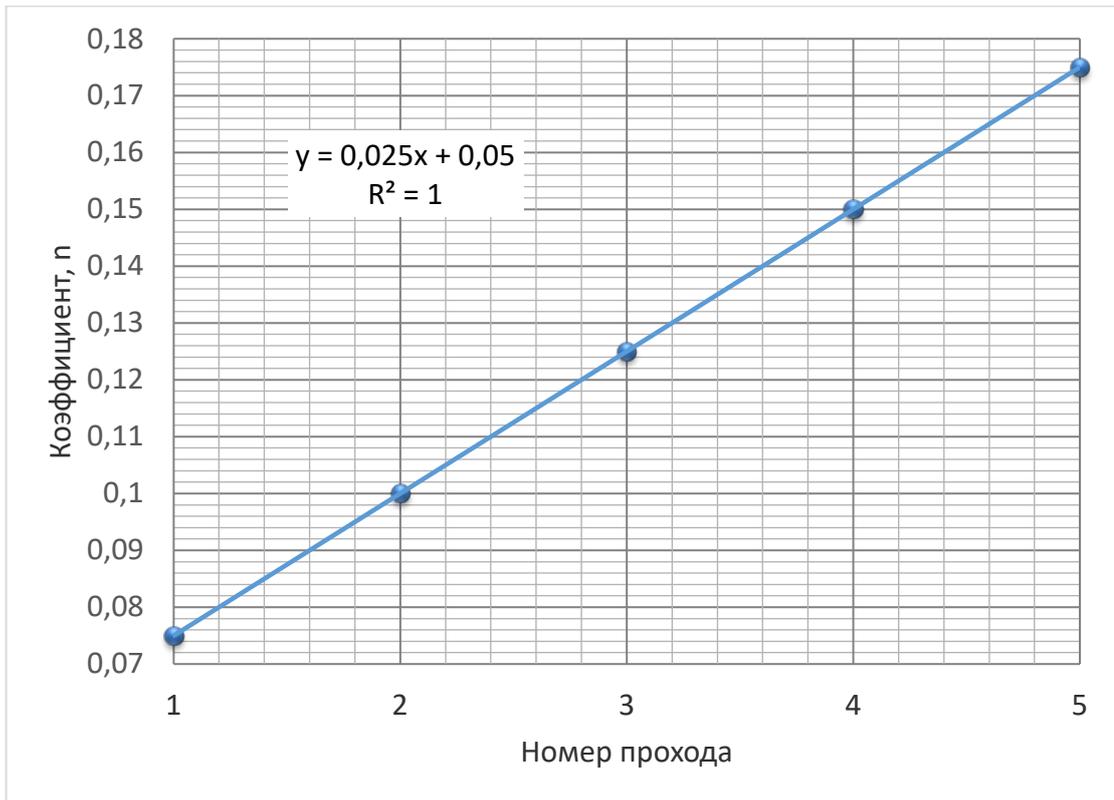


Рисунок 2.12 – График изменения коэффициента распределения напряжений «n»

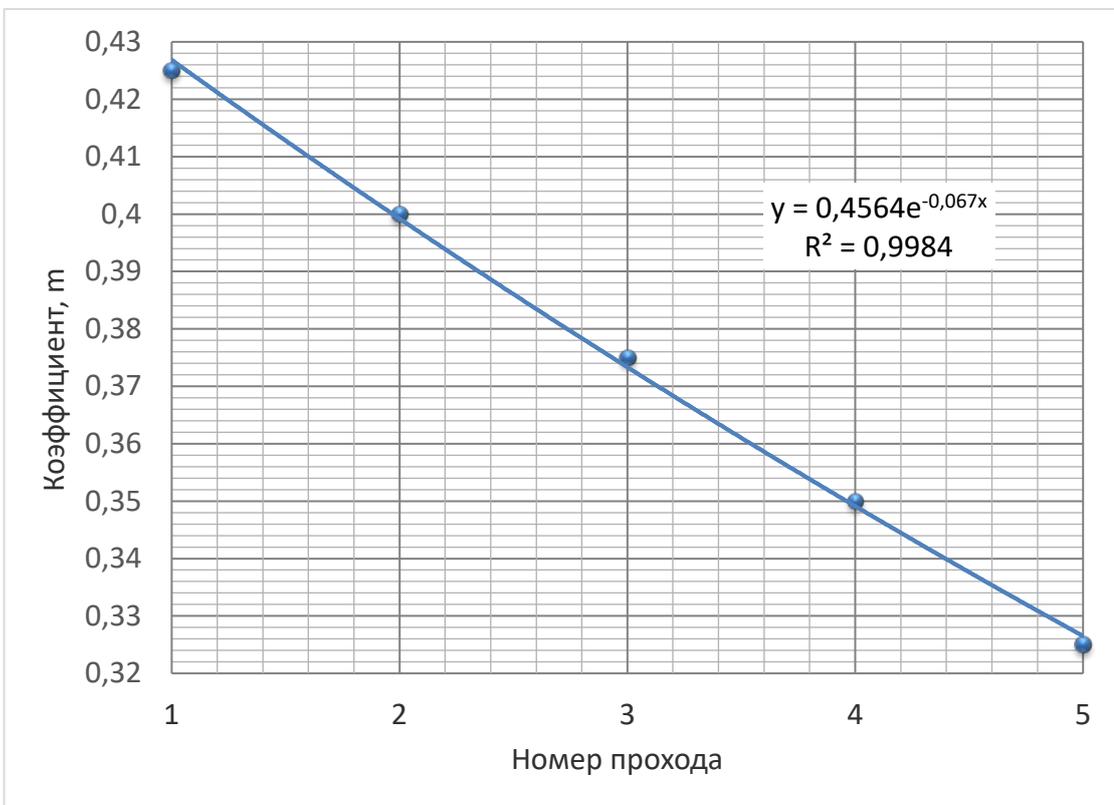


Рисунок 2.13 – График изменения коэффициента распределения напряжений «m»

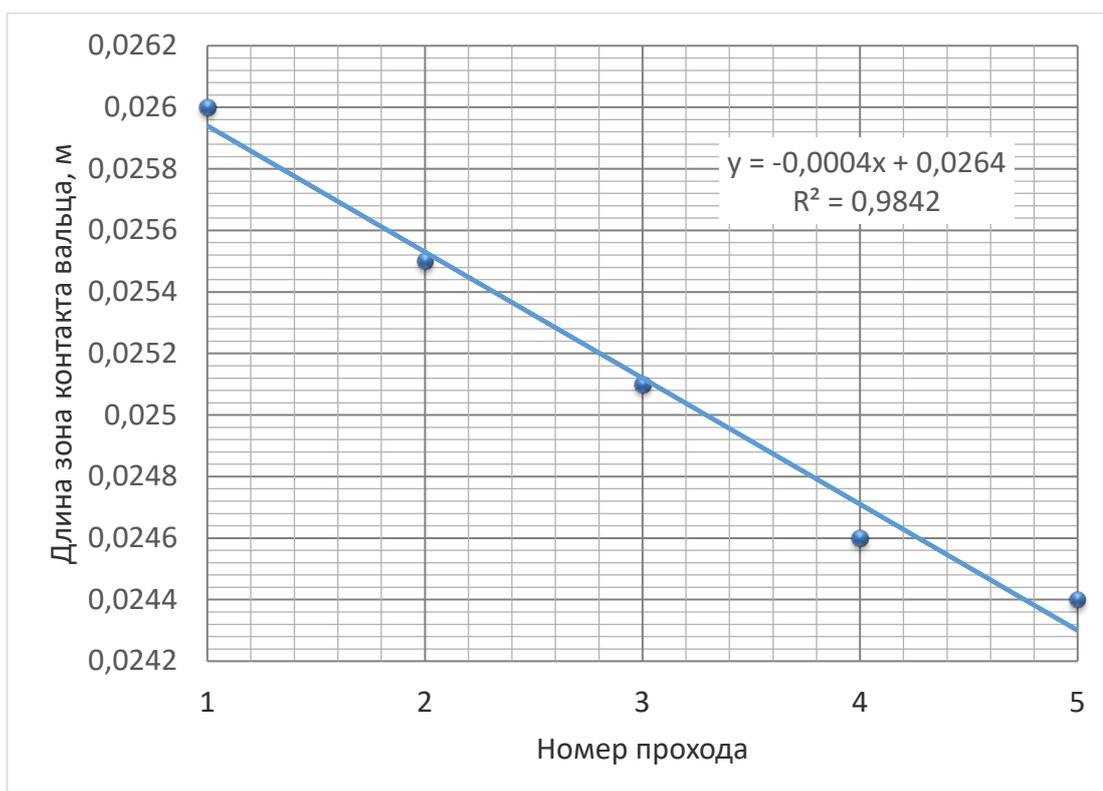


Рисунок 2.14 – График изменения длины дуги контакта вальца

Длина дуги контакта вальца с поверхностью асфальтобетона определялась в процессе моделирования по формуле:

$$L_i = \frac{K_{i-1} L_{i-1}}{K_i} \quad (2.17)$$

Поскольку площадь контакта главным образом зависит от устойчивости материала деформированию, длину дуги контакта в качестве допущения в данном исследовании принято выражать из достигнутого уровня уплотнения.

Приведенные зависимости носят совпадающую динамику изменения параметров уплотнения с зависимостями, сформированными СоюзДорНИИ и ВНИИСтройдормаш, подтверждая адекватность реакции асфальтобетонной смеси на динамический процесс уплотнения при нескольких проходах катка и адекватность самой имитационной модели.

2.3 Усовершенствование имитационной модели с целью исследования систем автоматизированного контроля уплотнения асфальтобетона

В процессе уплотнения слоев дорожного покрытия от рыхлого до плотного состояния изменяется частота колебаний вибровальца. Задачей систем автоматизированного контроля является регистрация изменений плотности уплотняемого материала при допустимых параметрах колебаний вальца и информирование о возникновении критических субгармонических режимов колебаний (режим хаотических колебаний, двойной прыжок, раскачивания вальца).

Современные системы непрерывного контроля уплотнения асфальтобетона основаны на вычислении интегральных показателей взаимодействия вальца дорожного катка с уплотняемым материалом. Наиболее популярные интегральные показатели на сегодняшний день разработаны производителями катков Dynapac (CMV) и Sakia America (CCV) и подробно рассмотрены в п. 1.3 гл. 1 настоящей работы.

Для исследования алгоритмов систем автоматизированного контроля качества уплотнения дорожных покрытий в разработанной имитационной модели реализована технология спектрального анализа на основе дискретного преобразования Фурье [85] путем добавления следующих дополнительных блоков (рисунок 2.15):

- Zero-Order Hold – производит дискретизацию входного сигнала по времени;
- Buffer – модулирует длину фрейма;
- FFT – выполняет дискретное преобразование Фурье (ДПФ);
- Gain – умножает входной сигнал на заданный коэффициент;
- Abs – производит вычисление абсолютного значения величины сигнала;
- Vector Scope – цифровой осциллограф [78].

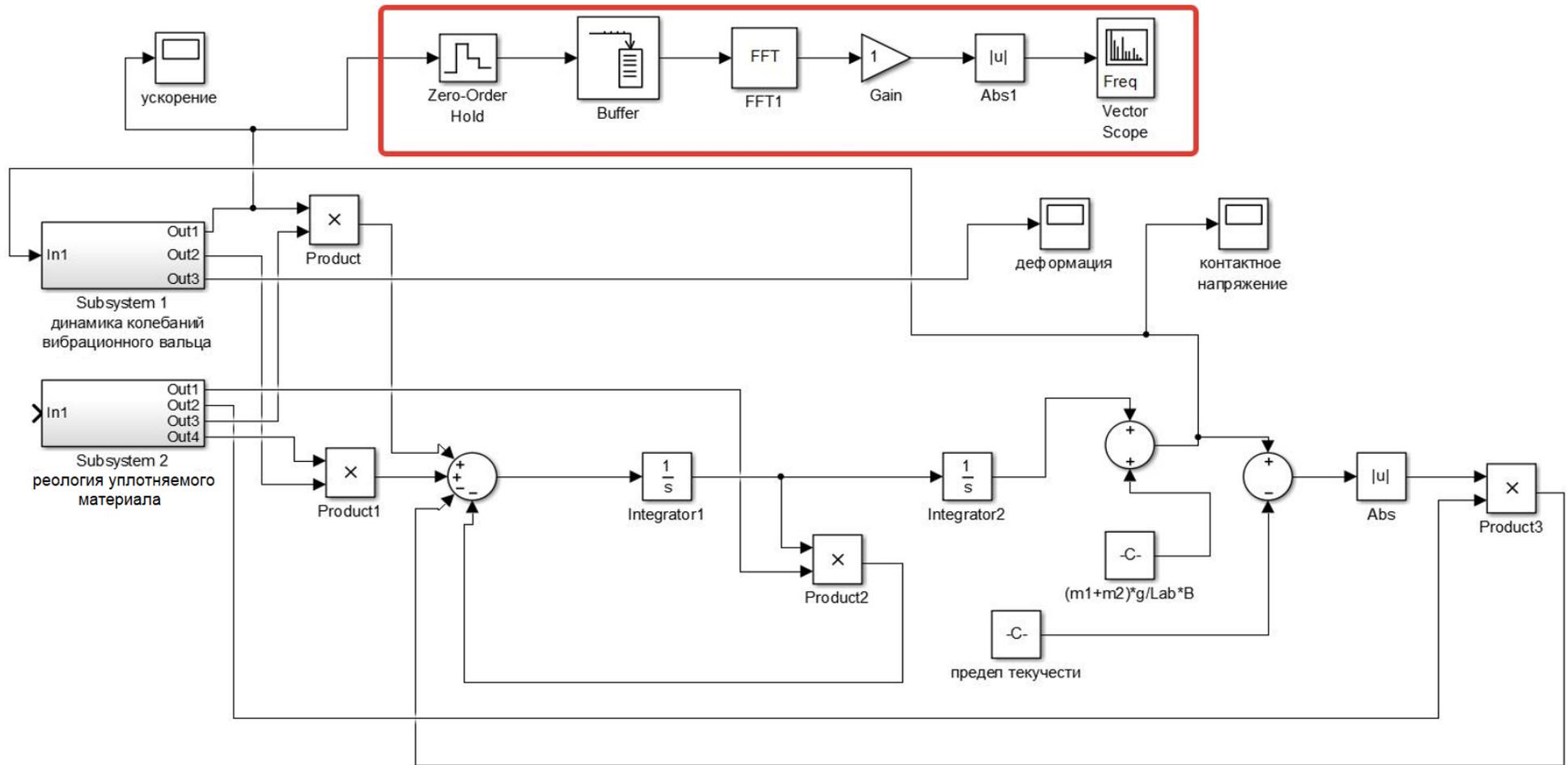


Рисунок 2.15 – Усовершенствованная имитационная модель

При испытании усовершенствованной имитационной модели были использованы параметры, сформированные в предыдущем параграфе настоящей работы, по итогам моделирования получены спектры ускорения вибровальца (рисунок 2.16). На основе спектров виброускорения построен график зависимости интегральных показателей CMV и CCV от коэффициентов уплотнения асфальтобетона (рисунок 2.17).

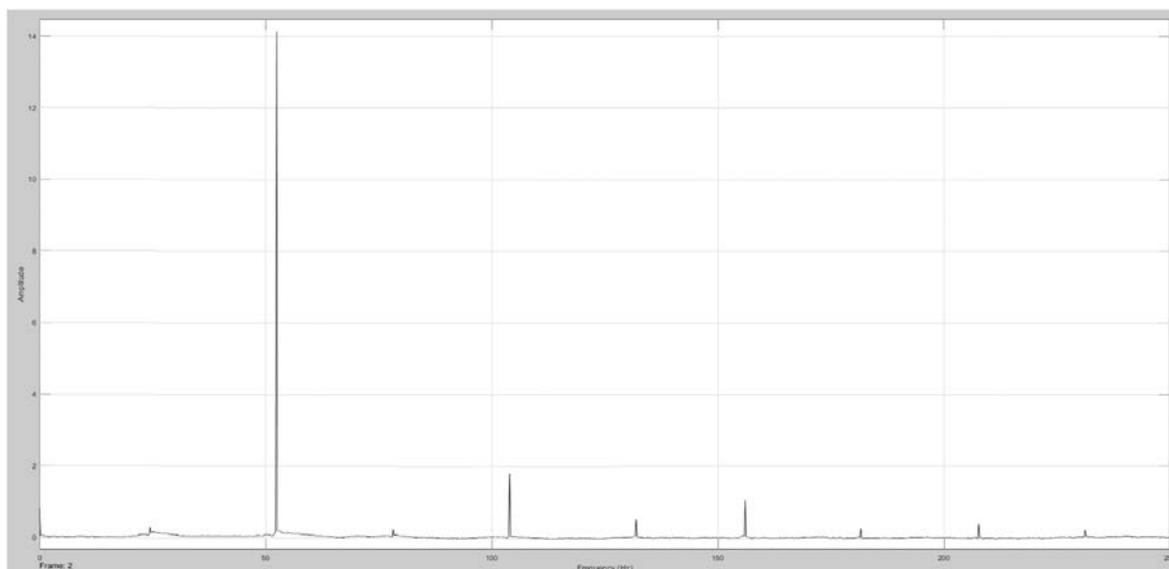


Рисунок 2.16 – Спектр ускорений вибровальца на момент окончания укатки (горизонтальная ось – частоты колебаний, вертикальная – амплитуда)

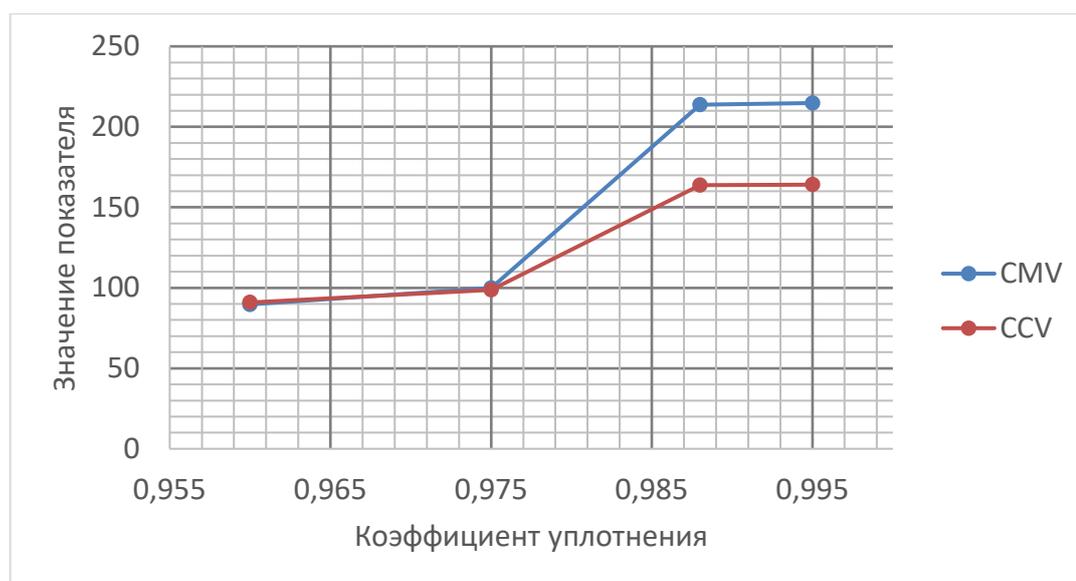


Рисунок 2.17 – График зависимости интегральных показателей CMV и CCV от коэффициентов уплотнения

2.4 Исследование математической зависимости параметров уплотнения асфальтобетона

С целью выявления влияния модуля деформации асфальтобетонной смеси и частоты вибровальца на его ускорение в среде MathCAD проведен математический эксперимент [33].

В таблицах 2.2 и 2.3 показаны уровни варьирования переменных, матрица планирования и результаты эксперимента.

Таблица 2.2 – Уровни варьирования переменных

Факторы	f – частота вращения вальца, Гц	E – модуль деформации, МПа
Нижний уровень (-1)	30	15
Верхний уровень (+1)	70	85
Основной уровень (0)	$(30+70)/2 = 50$	$(15+85)/2 = 50$
Интервал варьирования (ΔX)	$70-50 = 20$	$85-50 = 35$

Таблица 2.3 – Матрица планирования и результаты эксперимента

№ оп.	Безразмерный масштаб		Размерный масштаб		Ускорение, м/с ²
	X ₁	X ₂	f, Гц	E – МПа	
1	-1	-1	30	15	64,5
2	1	-1	70	15	83,4
3	-1	1	30	85	14,6
4	1	1	70	85	53,4
5	-1	0	30	50	25,2
6	1	0	70	50	83
7	0	-1	50	15	81,2
8	0	1	50	85	29,4

Далее приведена математическая обработка экспериментальных данных в части определения зависимости ускорения вибротальца при переходном процессе методом планирования эксперимента.

Последовательность выполнения расчетов с помощью MathCAD.

$$N := 8 \quad k := 6$$

$C0$ – единичный вектор-столбец.

$$C0 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$C1$ – вектор-столбец момента инерции, кг·м²; $C2$ – вектор-столбец момента сопротивления, Нм; Y – вектор-столбец амплитуды ускорения, м/с².

$$C1 := \begin{pmatrix} 30 \\ 70 \\ 30 \\ 70 \\ 30 \\ 70 \\ 50 \\ 50 \end{pmatrix} \quad C2 := \begin{pmatrix} 15 \\ 15 \\ 85 \\ 85 \\ 50 \\ 50 \\ 15 \\ 85 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 64.5 \\ 83.4 \\ 14.6 \\ 53.4 \\ 25.2 \\ 83 \\ 81.2 \\ 29.4 \end{pmatrix}$$

При этом:

$$f := C1; E := C2.$$

Функция объединения векторов-столбцов имеет следующий вид:

$$C := \text{augment} \left[C0, C1, C2, C1^2, C2^2, \left[\overrightarrow{(C1 \cdot C2)} \right] \right]$$

Полученная матрица планирования:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 30 & 15 & 900 & 225 & 450 \\ 1 & 70 & 15 & 4.9 \times 10^3 & 225 & 1.05 \times 10^3 \\ 1 & 30 & 85 & 900 & 7.225 \times 10^3 & 2.55 \times 10^3 \\ 1 & 70 & 85 & 4.9 \times 10^3 & 7.225 \times 10^3 & 5.95 \times 10^3 \\ 1 & 30 & 50 & 900 & 2.5 \times 10^3 & 1.5 \times 10^3 \\ 1 & 70 & 50 & 4.9 \times 10^3 & 2.5 \times 10^3 & 3.5 \times 10^3 \\ 1 & 50 & 15 & 2.5 \times 10^3 & 225 & 750 \\ 1 & 50 & 85 & 2.5 \times 10^3 & 7.225 \times 10^3 & 4.25 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Коэффициенты регрессии от B_0 к B_{11} :

$$B := \begin{pmatrix} C \\ \begin{pmatrix} 47.889 \\ 0.938 \\ -0.972 \\ -3.313 \times 10^{-3} \\ -1.02 \times 10^{-4} \\ 7.107 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

Уравнение регрессии в формате Mathcad:

$$y(f, E) := 47.889 + 0.938 \cdot f - 0.972 \cdot E - 3.313 \cdot 10^{-3} \cdot f^2 + 1.02 \cdot 10^{-4} \cdot E^2 + 7.107 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot E \quad (2.18)$$

На рисунке 2.18 представлен объемный график зависимости ускорения вальца при переходном процессе от частоты вибрации и модуля деформации уплотняемого материала, построенный в среде Mathcad по уравнению регрессии.

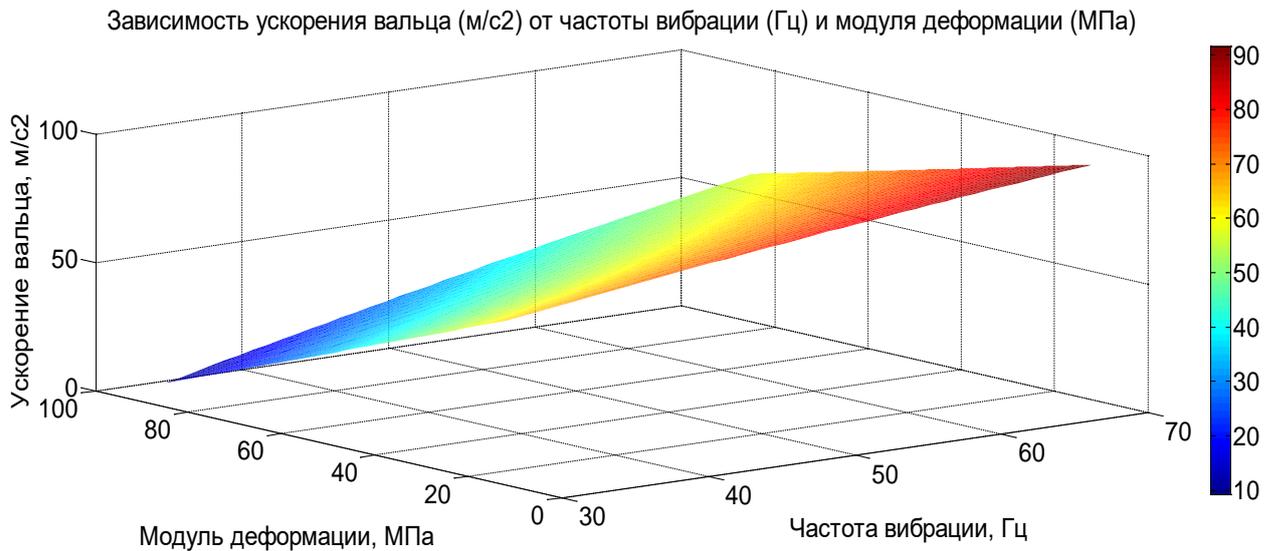


Рисунок 2.18 – График зависимости ускорения вальца от частоты вибрации и модуля деформации уплотняемого материала

Согласно полученной зависимости при увеличении модуля деформации асфальтобетонной смеси ускорение вальца уменьшается линейно от 80 м/с² до 15 м/с² при частоте вибрации от 30 Гц до 70 Гц.

Кроме того, данный метод позволяет вычислять амплитуду колебаний вибровальца, а также величину его отрыва от поверхности в режиме частичного отрыва. Представленная математическая модель может быть использована при расчете параметров и проектировании новых отечественных вибрационных катков.

Однако используемая модель не может достоверно описывать процесс уплотнения, так как в ней не рассматривается влияние рамы катка. А также вызывает трудности назначение численных значений коэффициентов жесткости и вязкого сопротивления асфальта в зависимости от его температуры и плотности вследствие недостаточной изученности этих взаимосвязей. Для уточнения численных значений жесткости и вязкого сопротивления асфальта используются следующие зависимости.

Коэффициент вязкого сопротивления деформируемого материала, $H \cdot c/m$ [59]:

$$bs = \frac{\eta S}{hc}, \quad (2.19)$$

где η – вязкость деформируемого материала, $H \cdot c/m^2$;

S – площадь контакта, m^2 ;

h_c – толщина деформируемого слоя, m ;

Жёсткость деформируемого материала, H/m :

$$c = \frac{ES}{h}, \quad (2.20)$$

где E – динамический модуль деформации, $Па$.

Площадь контакта находится как:

$$S = B \cdot L, \quad (2.21)$$

где L – длина дуги контакта вальца, m ;

B – ширина вальца, m .

По формуле Беляева-Герца [74] длина дуги L , находится как:

$$L = 4 \cdot \sqrt{\frac{q \cdot D}{2 \cdot E}}, \quad (2.22)$$

где q – линейное давление вальца, H/m ;

D – диаметр вальца, m ;

Толщину слоя h примем равной 5 см.

Так как на разных катках будет разная площадь контакта, то выполним расчет для каждого из выбранных катков на разных этапах уплотнения (Таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Расчет площади контакта и характеристик асфальтобетона на разных этапах уплотнения

Каток	Характеристики катка	Модуль деформации, МПа	Площадь контакта, м ²	Жёсткость, мН/м	Коэф. вязкого сопротивления, кН·с/м
ДУ-82	Ширина вальца $B = 1,3$ м Диаметр вальца $D = 0,8$ м Линейная нагрузка $q = 11900$ Н	5	0,160	16,0	115,5
		10	0,113	22,7	88,5
		25	0,072	35,9	77,5
		50	0,051	50,7	115,7
ДУ-96	Ширина вальца $B = 1,5$ м Диаметр вальца $D = 1,07$ м Линейная нагрузка $q = 28000$ Н	5	0,328	32,8	236,5
		10	0,232	46,4	181,1
		25	0,147	73,4	158,6
		50	0,104	103,9	236,8
ДУ-98	Ширина вальца $B = 1,7$ м Диаметр вальца $D = 1,2$ м Линейная нагрузка $q = 34000$ Н	5	0,434	43,4	312,7
		10	0,307	61,4	239,6
		25	0,194	97,1	209,8
		50	0,137	137,4	313,2

В соответствии с таблицей примем диапазон коэффициентов жесткости 15...130 мН/м, и будем использовать его для моделирования в среде MATLAB.

Таким образом, разработанная модель позволяет не только определять изменения свойств уплотняемого материала, но и характер колебаний в зависимости от параметров катка. Изменяя вынуждающее усилие и частоту вращения вибровозбудителя по графикам перемещения, можно узнать амплитуду колебаний и величину отрыва вальца от поверхности.

Для расчета возьмем параметры катка ДУ-96 (таблица 2.4) и свойства асфальтобетона при $K_y = 0,96$ ($bs = 160 \frac{\text{кН}\cdot\text{с}}{\text{м}}$, $c = 75 \frac{\text{МН}}{\text{м}}$).

Построим график зависимости амплитуды и величины отрыва от вынуждающей силы в диапазоне $Q = 10 \dots 70$ кН (рисунок 2.19). Частоту вращения вибровозбудителя примем постоянной ($f = 40$ Гц).

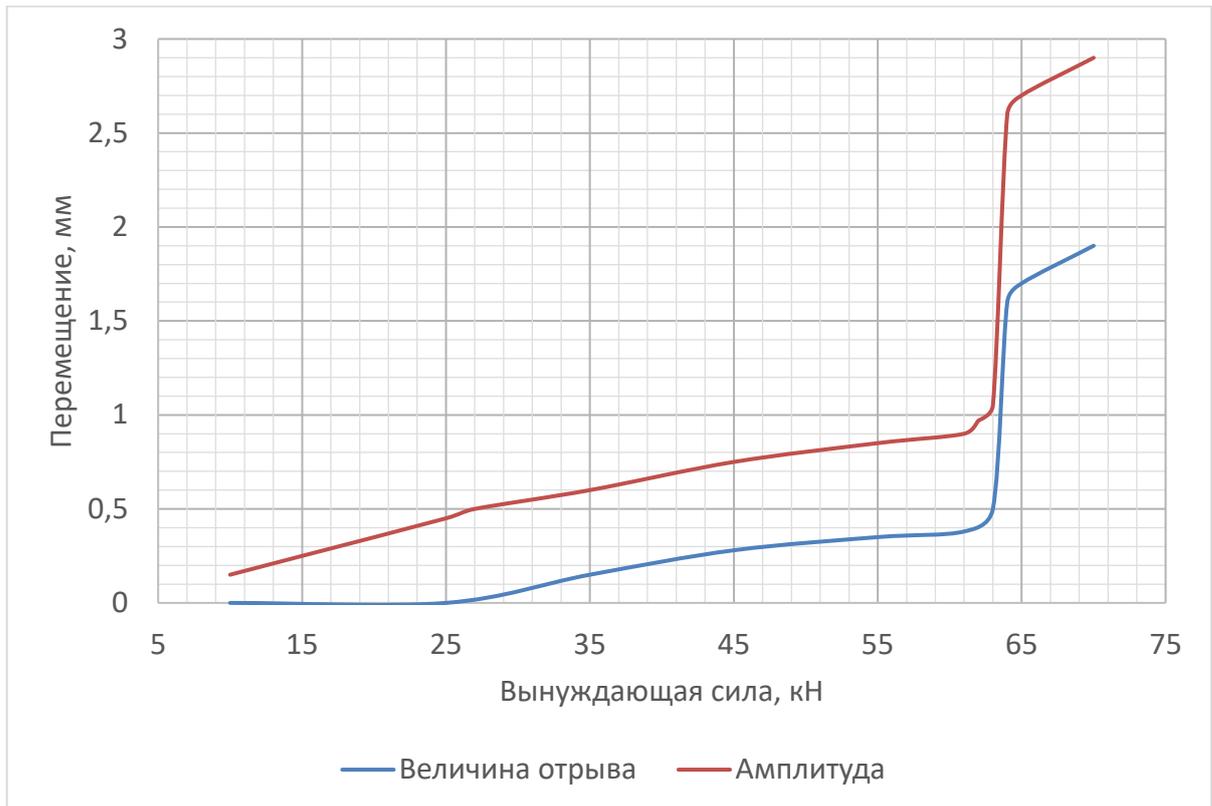


Рисунок 2.19 – Зависимости амплитуды и величины отрыва от вынуждающей силы

Из графика видно, что амплитуда колебаний и величина отрыва линейно зависят от вынуждающего усилия, но при достижении определенного значения происходит довольно резкая смена режима на «двойной прыжок»,

сопровождаясь значительным увеличением приведенных характеристик вибрационного вальца.

Также можем определить зависимости амплитуды и величины отрыва от частоты вращения. При постоянной вынуждающей силе $Q = 57 \text{ кН}$ будем менять частоту вращения вибровозбудителя в диапазоне $f = 20 \dots 60 \text{ Гц}$, считывая значения с графиков перемещений. Результаты расчетов представлены на рисунке 2.20.

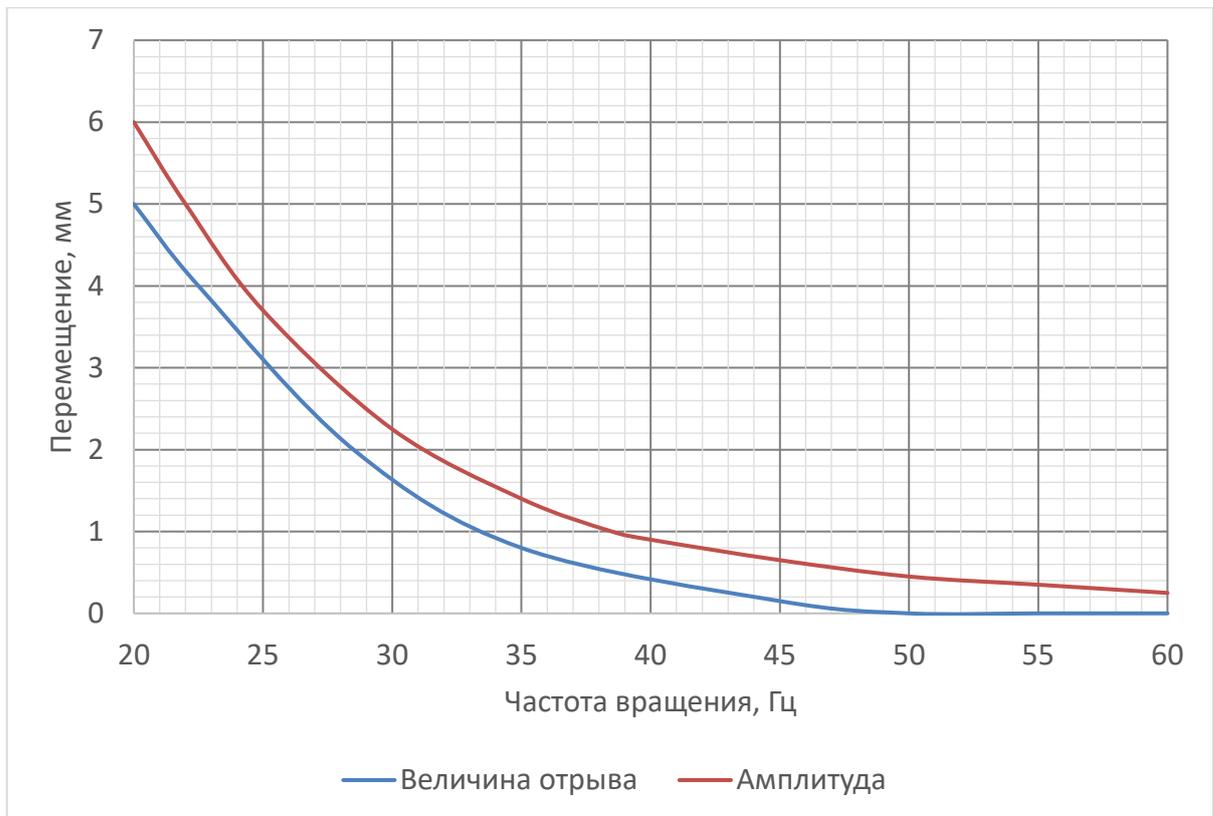


Рисунок 2.20 – Зависимости амплитуды и величины отрыва от частоты вращения вибровозбудителя

Известно, что разные типы асфальтобетонных смесей лучше уплотняются при тех или иных амплитудах колебаний вибровальца. Вычислим амплитуду колебаний вальца на отечественных катках в зависимости от относительной вынуждающей силы Q/P_K (Таблица 2.5). По полученным значениям был построен график, представленный на рисунке 2.21.

Таблица 2.5 – Результаты вычислений амплитуды колебаний вальцов исследуемых катков от относительной вынуждающей силы

Каток	Вес вальца, H	Вынуждающее усилие, H	Q/P_K	Амплитуда, $мм$
ДУ-82	8829	38000	4,3	1,1
ДУ-96	16187	57000	3,52	0,69
ДУ-98	27959	75000	2,68	0,58
		42000	1,5	0,33

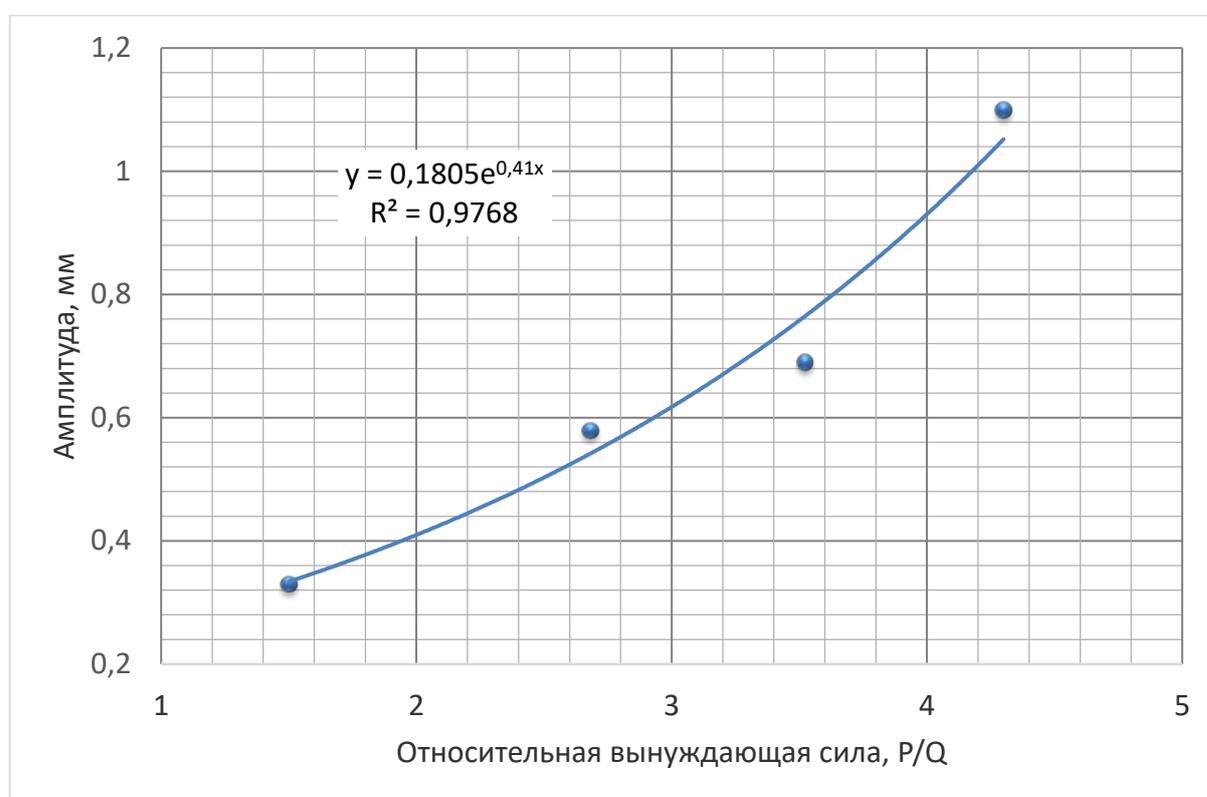


Рисунок 2.21 – График зависимости амплитуды колебаний вальца от относительной вынуждающей силы

Выводы по второй главе

По итогам теоретических изысканий процесса взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном сделаны следующие выводы:

1. Разработана имитационная модель взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном в среде Matlab&Simulink. Реализованные в процессе моделирования зависимости изменяющихся параметров рабочего органа и уплотняемого материала удовлетворительно совпадают с данными сформированными СоюзДорНИИ и ВНИИСтройдормаш, а также результатами научных трудов по теме исследования, подтверждая адекватность разработанной модели и ее соответствие реальному процессу укатки асфальтобетона. Кроме того, в процессе моделирования подтверждена взаимосвязь между жесткостью асфальтобетона и спектрами ускорений вибровальца. При уплотнении слабосвязанных (несущих) материалов валец работает в постоянном контакте с уплотняемым слоем и на спектре виброускорений отображается только гармоника на рабочей (заданной) частоте вибрационного катка. Однако с повышением жесткости материала в процессе уплотнения валец переходит в режим частичного отскока, в результате чего на спектре виброускорений помимо гармоник соответствующих рабочей частоте катка проявляются гармоники и субгармоники на других частотах.

Таким образом, полученную имитационную модель с возможностью регистрации и преобразования последовательностей данных процесса уплотнения методом Фурье допустимо использовать для исследования и отработки алгоритмов работы систем автоматизированного контроля с учетом изменяющихся параметров уплотняемого материала, а также для выявления стационарных состояний системы вибровозбуждения вальца и характера ее динамики.

2. Реализованы математические модели, позволяющие определять зависимости ускорения вальца при переходном процессе от частоты вибрации и модуля деформации уплотняемого материала, а также зависимости амплитуды и величины отрыва вальца от вынуждающей силы и частоты вращения вибровозбудителя. Использование данных математических моделей может быть востребовано при разработке новых отечественных вибрационных катков и систем автоматизированного контроля уплотнения асфальтобетона.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

3.1 Методика эксперимента

Автоматизированный контроль уплотнения асфальтобетонных покрытий подразумевает непрерывный мониторинг и анализ состояния уплотняемого материала (толщина слоя, ровность, температура) и характеристик рабочего органа дорожного катка (частота и амплитуда). С целью отработки механизма регистрации натуральных параметров процесса формирования дорожного покрытия в процессе уплотнения вибрационным катком для последующей разработки системы автоматизированного контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий реализовано экспериментальное исследование.

При этом были определены следующие задачи:

- предложить усовершенствованный метод автоматизированного контроля параметров уплотнения асфальтобетонных покрытий вибрационными катками, с применением оперативного отслеживания колебаний вибровальца, температуры уплотняемого материала, а также ровности и толщины формируемого покрытия;
- разработать аппаратно-программную систему автоматизированного сбора сигналов уплотнения асфальтобетонных покрытий, реализуемую средствами неразрушающего действия;
- провести лабораторные и полевые испытания разработанной системы;
- выполнить анализ измеренных сигналов.

При этом следует учесть оценку достоверности экспериментальных данных, которая будет определяться точностью измерений, методами обработки результатов испытаний, обоснованием числа необходимых опытов и возможных допущений [56].

В таблице 3.1 приведены параметры уплотнения асфальтобетонных покрытий, определяемые в процессе эксперимента.

Таблица 3.1 – Параметры уплотнения асфальтобетонных покрытий, определяемые в процессе эксперимента

Параметры	Средства неразрушающего действия	Объект определяемых параметров
Частота и амплитуда колебаний вальца, Гц	Цифровой акселерометр ADXL345	Вибрационный валец
Температура уплотняемой асфальтобетонной смеси, °С	Инфракрасный датчик температуры GY-906-ВАА	Дорожное покрытие
Толщина слоя уплотняемой асфальтобетонной смеси, мм	Ультразвуковой датчик расстояния HC-SR04	Дорожное покрытие

Минимальное число проходов катка для испытаний аппаратно-программной системы определялось по формуле:

$$N_R = t^2 \cdot \frac{M^2}{U_2^2},$$

(3.1)

где t – коэффициент обеспеченности;

M – коэффициент изменчивости;

U – допустимая ошибка.

Для каждого параметра «х» определялась оценка математического ожидания:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad (3.2)$$

где x_i – результат текущего испытания;

n – количество испытаний.

Абсолютное отклонение каждого испытания:

$$\Delta_i = x_i - \bar{x} \quad (3.3)$$

Оценка среднеквадратичного отклонения математического ожидания:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\Delta_i)^2} \quad (3.3)$$

Коэффициент вариации:

$$R_x = 100 \frac{S_x}{\bar{x}} \quad (3.4)$$

Показатель точности опыта:

$$C_x = \frac{R_x}{n} \quad (3.5)$$

3.2 Моделирование аппаратно-программной системы контроля параметров уплотнения асфальтобетонных покрытий

С целью подбора технических средств автоматизированного сбора сигналов уплотнения и проработки алгоритмов оперативного контроля параметров асфальтобетонных покрытий была изготовлена экспериментальная модель дорожного катка с аппаратно-программной системой контроля на платформе Arduino (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Модель дорожного катка с аппаратно-программной системой контроля на платформе Arduino

Размещение модулей аппаратно-программной системы на модели дорожного катка приведено на рисунке 3.2.

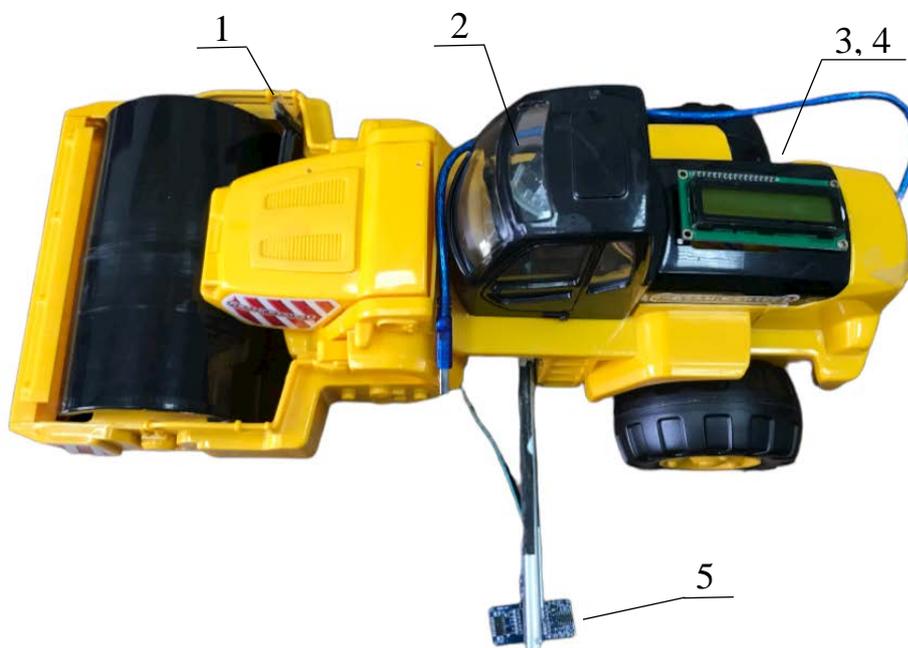


Рисунок 3.2 – Размещение модулей аппаратно-программной систем на модели дорожного катка: 1 – акселерометр; 2 – модуль связи; 3 – информационное табло; 4 – платформа Arduino Uno; 5 – ультразвуковой датчик

На рисунке 3.3 приведено расположение основных элементов платформы Arduino Uno.

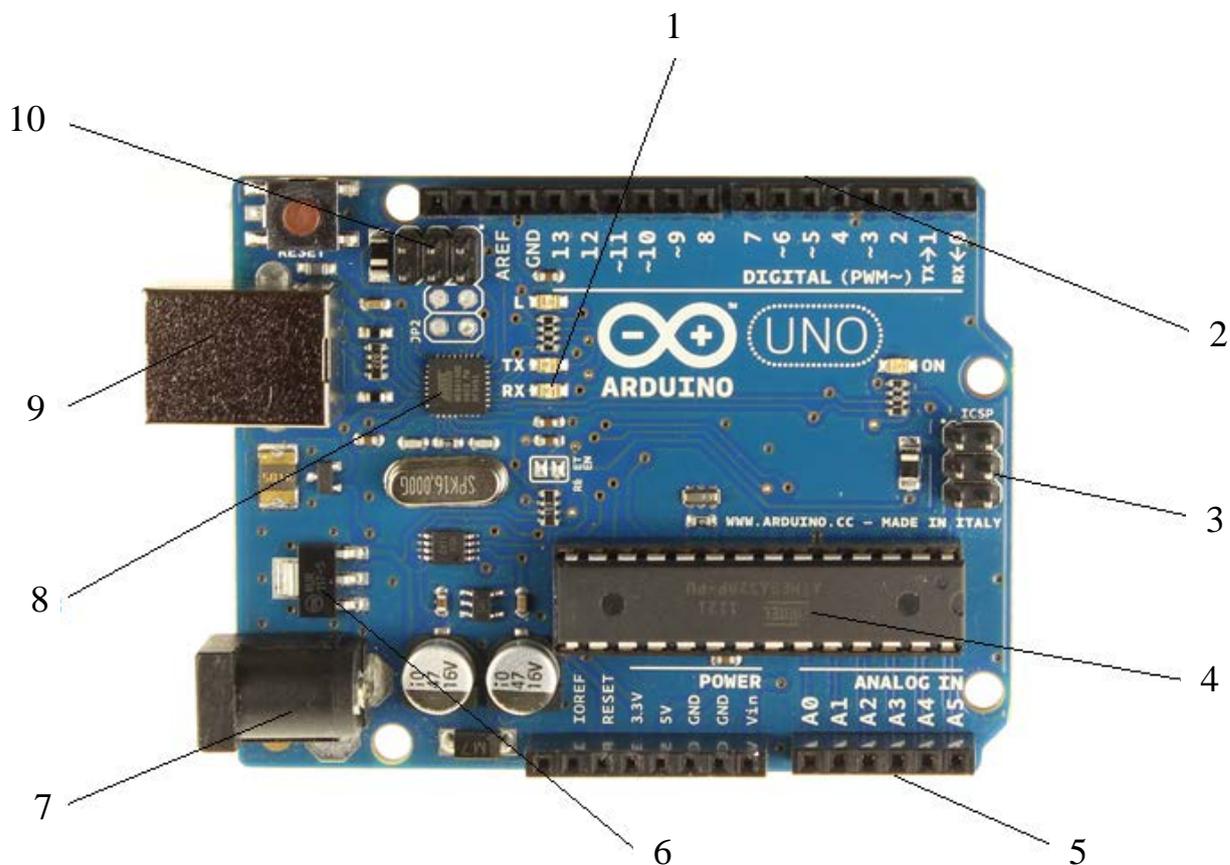


Рисунок 3.3 – Основные элементы платформы Arduino Uno [100]:

- 1 – светодиодная индикация; 2 – четырнадцать цифровых вход/выходов;
- 3 – ICSP-разъем для ATmega328P; 4 – микроконтроллер ATmega328P;
- 5 – шесть аналоговых входов; 6 – регулятор напряжения 5 В;
- 7 – разъем для подключения питания; 8 – микроконтроллер ATmega16Uz;
- 9 – разъем для подключения кабеля USB; 10 – ICSP-разъем для ATmega16Uz

В микроконтроллерах может использоваться одновременно несколько устройств, выполняющих определенные задачи и функции под управлением микропроцессорного ядра. Элементарная база аппаратно-программной системы контроля параметров уплотнения на платформе *Arduino Uno* приведена на рисунке 3.4.

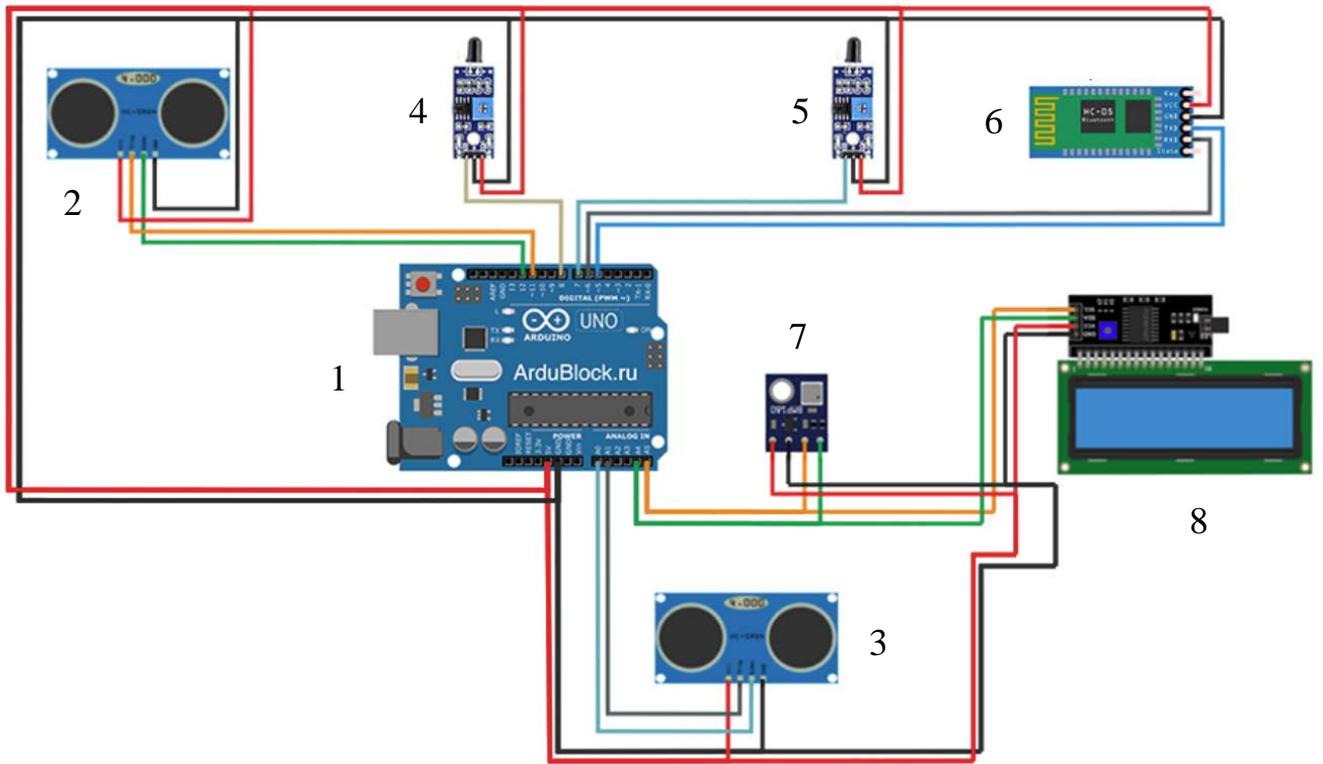


Рисунок 3.4 – Элементарная база аппаратно-программной системы контроля: 1 – Arduino Uno; 2, 3 – ультразвуковой датчик HC-SR04; 4, 5 – инфракрасный датчик температуры GY-906-BAA; 6 – модуль связи; 7 – акселерометр ADXL345; 8 – информационное табло

На рисунке 3.5 приведена схема ультразвукового контроля датчиком HC-SR04.

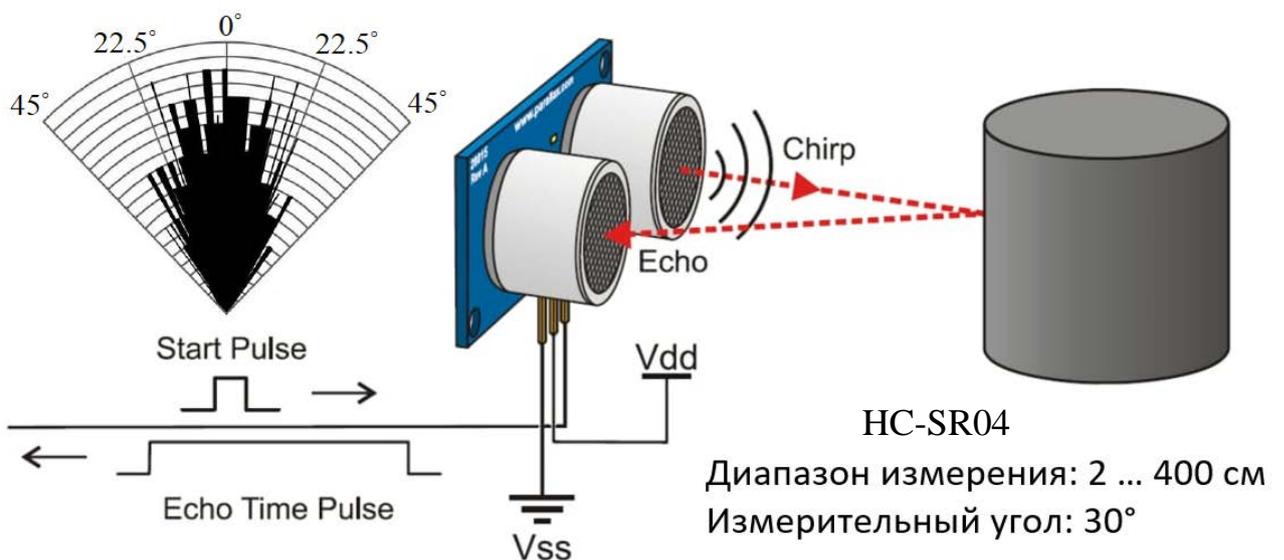


Рисунок 3.5 – Схема ультразвукового контроля [15, 128]

В измерительной системе использован трехосевой акселерометр ADXL345, он необходим для измерения частоты колебаний вибровальца катка. Схема датчика приведена на рисунке 3.6.

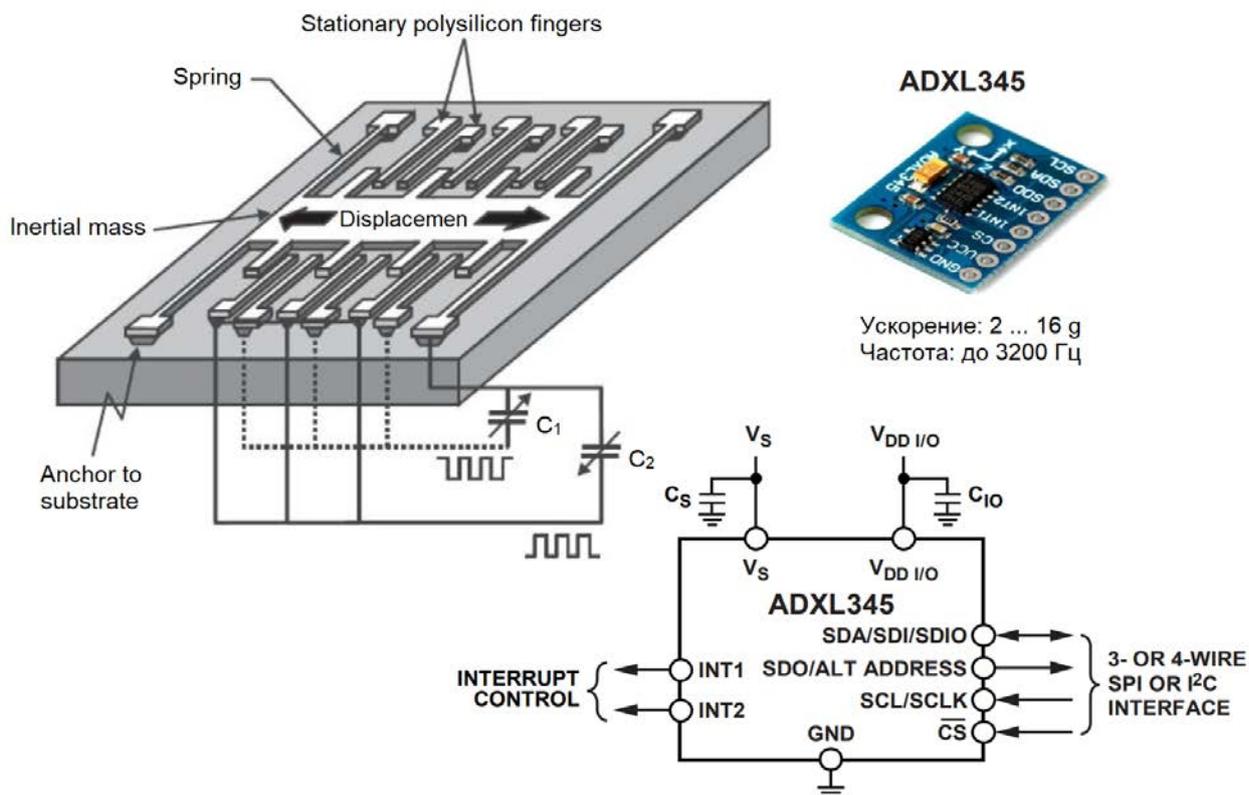


Рисунок 3.6 – Схема акселерометра [49, 106]

Схема контроля температуры инфракрасным датчиком GY-906-BAА приведена на рисунке 3.7.

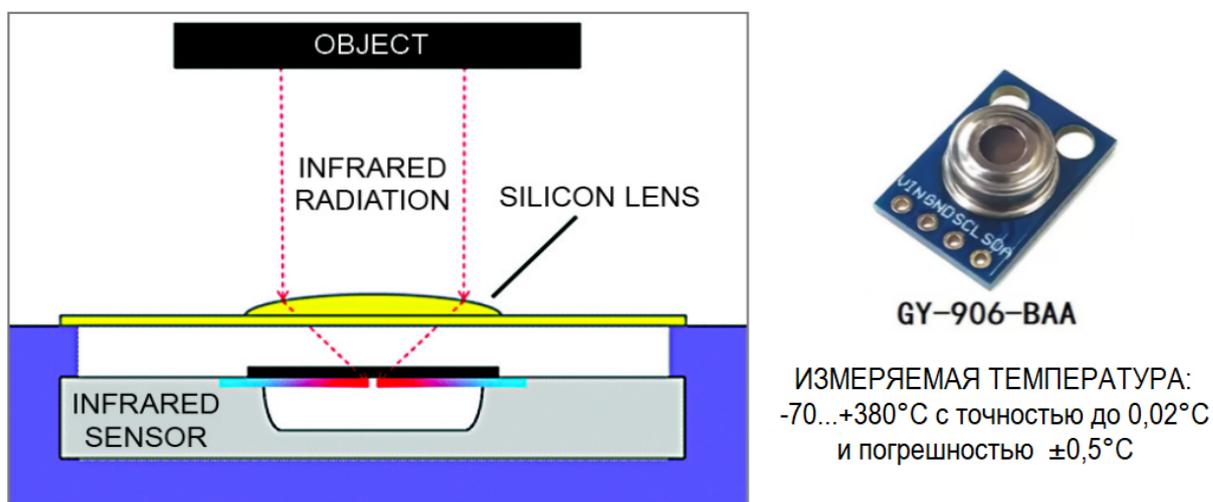


Рисунок 3.7 – Схема контроля температуры инфракрасным датчиком [75]

Помимо аппаратной части, приведенной выше, система контроля также имеет программную составляющую. Программная часть «Sketch» функционирования разработанной системы выполнена в среде программирования Arduino IDE и загружена на плату Arduino Uno.

Результаты, полученные в ходе испытания разработанной аппаратно-программной системы контроля параметров уплотнения, показаны на рисунках 3.8 – 3.11.

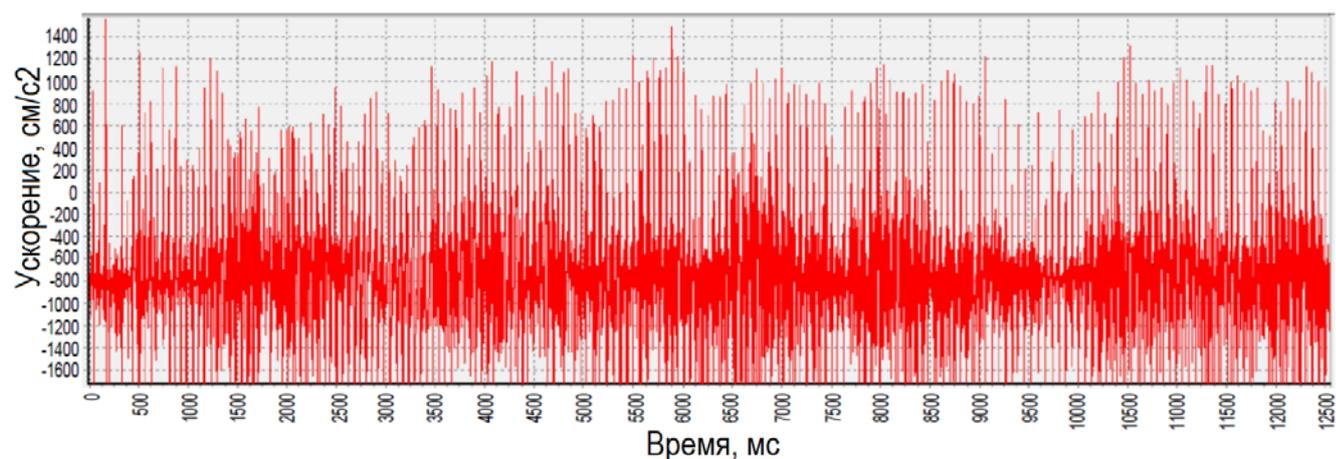


Рисунок 3.8 – Измерение малых ускорений по оси X

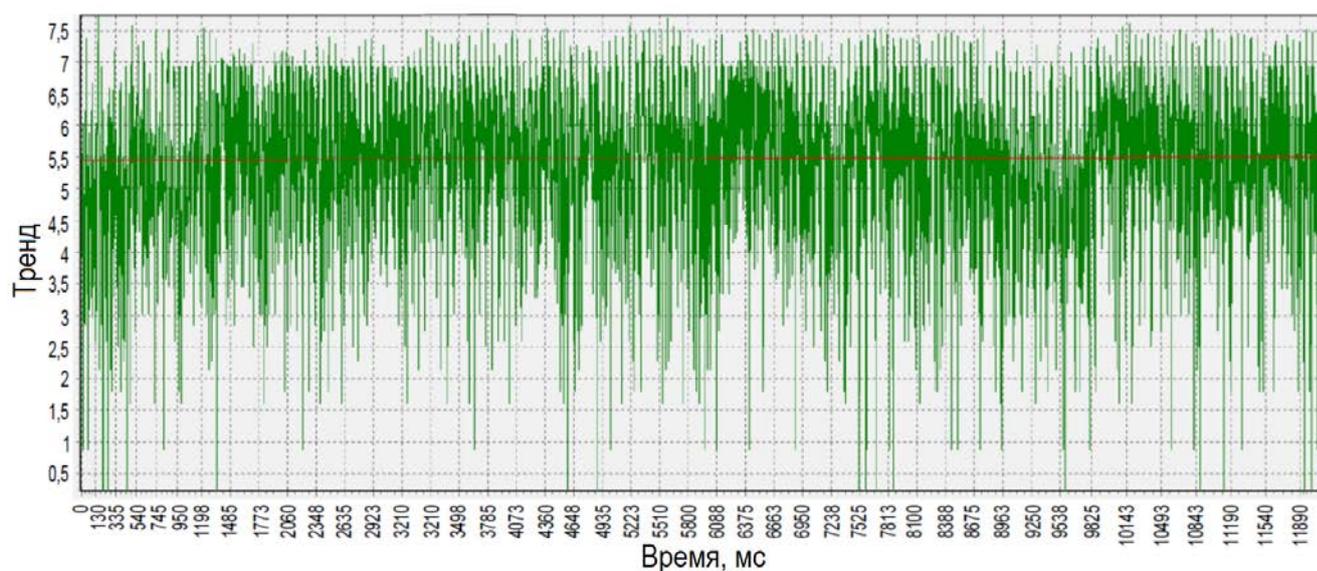


Рисунок 3.9 – Тренд малых ускорений

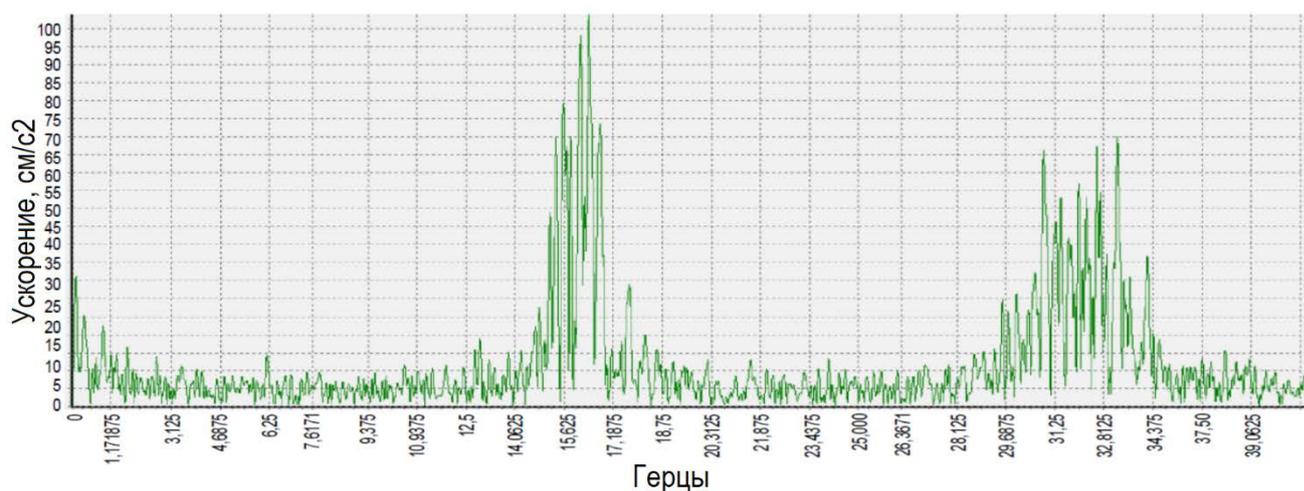


Рисунок 3.10 – Спектр малых ускорений



Рисунок 3.11 – Изменение толщины измеряемого материала

На графике малых ускорений (рисунок 3.8) записаны колебания по оси X с малыми ускорениями. Применяя функцию интегрирования по N точкам для снижения шума, заранее скрыв при этом графики для осей Y и Z, мы можем увидеть, как выглядит малый сигнал на фоне шума и как снизить уровень шума за счет интегрирования.

На графике 3.11 приведена динамика изменения толщины материала, измеренная путем регистрации отраженной ультразвуковой волны от его поверхности. В результате эксперимента было произведено 5 проходов разработанной модели катка с аппаратно-программной системой контроля по экспериментальному полигону. Полученные в ходе испытания толщины материала удовлетворительно соответствуют его натурным показателям.

3.3 Полевые испытания разработанной системы

Полевые испытания аппаратно-программной системы контроля параметров уплотнения асфальтобетонных покрытий были реализованы в рамках национального проекта «Безопасные качественные дороги». В ходе производства работ осуществлялся ремонт автомобильной дороги в пригороде г. Красноярска, на выезде из пос. Элита, направлении Элита - Арейское - ст. Кача (на участках с 16,5 по 17,5 км).

Натурные исследования проводились на дорожном катке Hamm HD+ 90, массой 9,19 т. Общий вид экспериментального комплекса показан на рисунке 3.12.

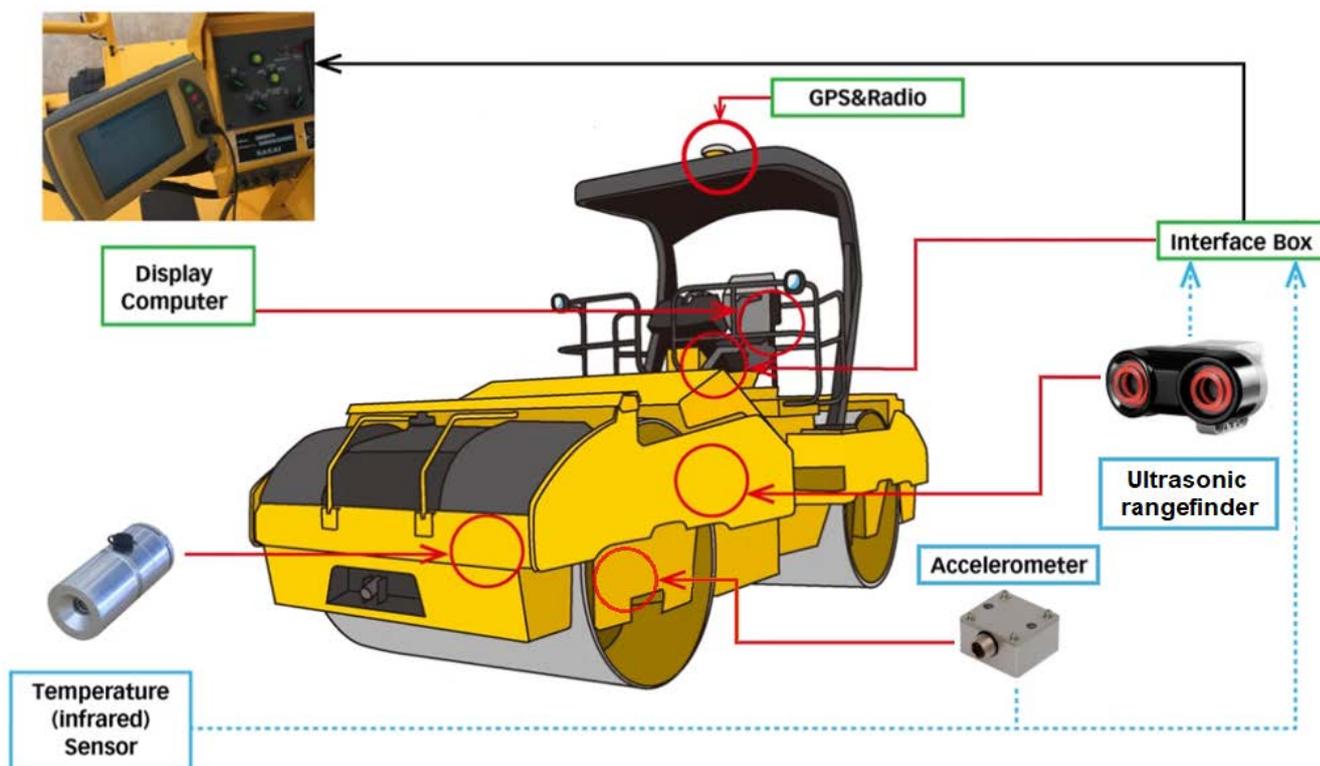


Рисунок 3.12 – Общий вид экспериментального комплекса на базе дорожного катка Hamm HD+ 90

На рисунках 3.13 – 3.14 приведены общие виды ремонта асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги.



Рисунок 3.13 – Общий вид работ по ремонту асфальтобетонного покрытия



Рисунок 3.14 – Укатка асфальтобетона вибрационным катком

На рисунке 3.15 показана установка акселерометра на вибрационный валец дорожного катка.



Рисунок 3.15 – Установка акселерометра на валец катка

Испытания проводились 19 сентября 2021 г. Во время ремонта на объекте выполнялись работы по устройству нового слоя асфальтобетонного покрытия, толщиной 5 см. В целях исследования параметры уплотнения асфальтобетонной смеси определялись на двух вариантах режимных параметров вибровальцов (f – частота вибровозбудителя, Гц/ A – амплитуда вибрации, мм: 42 Гц/0,65 мм; 50 Гц/0,36 мм).

Условия проведения полевых испытаний:

1. Начало эксперимента 14¹⁰ ч. Завершение работ 16³⁰ ч.
2. Местоположение автомобильной дороги (по данным автомобильного навигатора): от 04Н-313 56.091956° 92.50404° до 04Н-313 56.088076° 92.522763°.
3. При производстве работ использовалась смесь типа А марки I плотного асфальтобетона по ГОСТ 9128-2013. В качестве вяжущих в смеси были применены современные полимерно-битумные компоненты.

Характеристики смеси:

- мелкозернистая асфальтобетонная смесь с фракцией минеральных зёрен до 20 мм;
 - содержание щебня св. 50 % до 60 %;
 - остаточная пористость св. 2,5 % – 5,0 %;
 - температура при отгрузке от 145 °С до 155 °С.
4. Толщина укладываемого слоя асфальтобетонной смеси 5 см. Толщина слоя измерялась ручным шаблоном – металлическим щупом.
 5. Температура окружающего воздуха от 18 °С до 20 °С.
 6. Температура полотна асфальтобетонного покрытия в начале испытаний 130 °С-135 °С.
 7. Скорость движения асфальтового катка 50-100 м/мин. Скорость принята согласно приборной панели катка.

Для измерения информационных сигналов укатки асфальтобетона применялись цифровые датчики (ультразвуковой дальномер HC-SR04, инфракрасный датчик температуры GY-906-ВАА, акселерометр ADXL345), с помощью Bluetooth модуля осуществлялась беспроводная передача сигналов на смартфон.

Результаты измерения ускорения и перемещения вибрационного вальца при уплотнении асфальтобетонной смеси на двух вариантах режимных параметров приведены на рисунках 3.16 – 3.19.

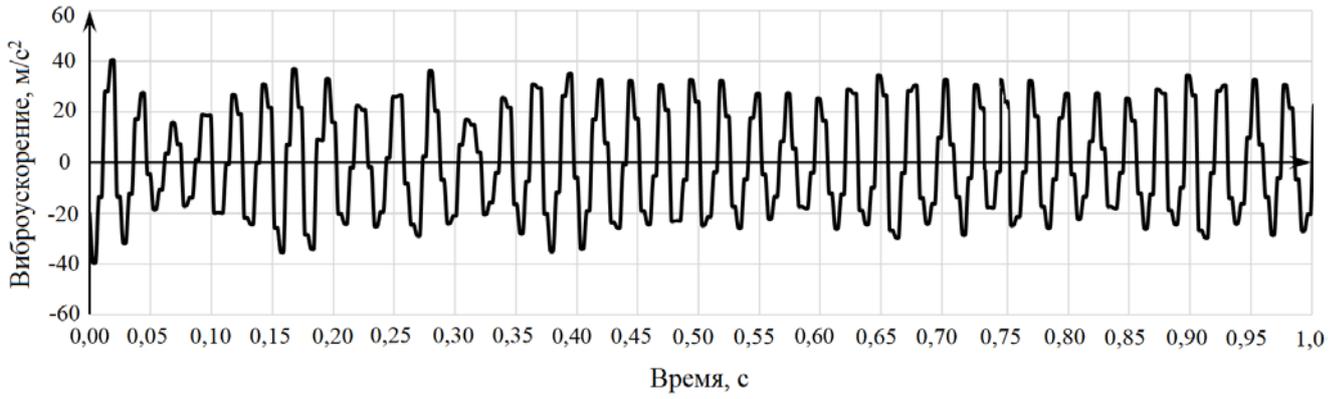


Рисунок 3.16 – Осциллограмма временной зависимости ускорения вибровальца при частоте вибрации 42 Гц и амплитуде 0,65 мм

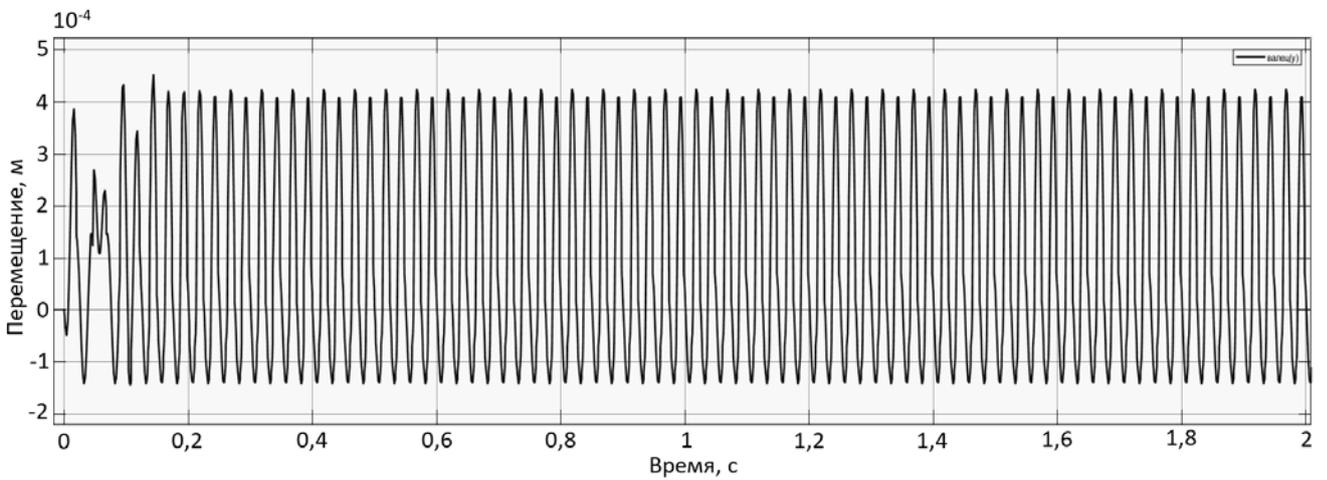


Рисунок 3.17 – Осциллограмма временной зависимости перемещения вибровальца при частоте вибрации 42 Гц и амплитуде 0,65 мм

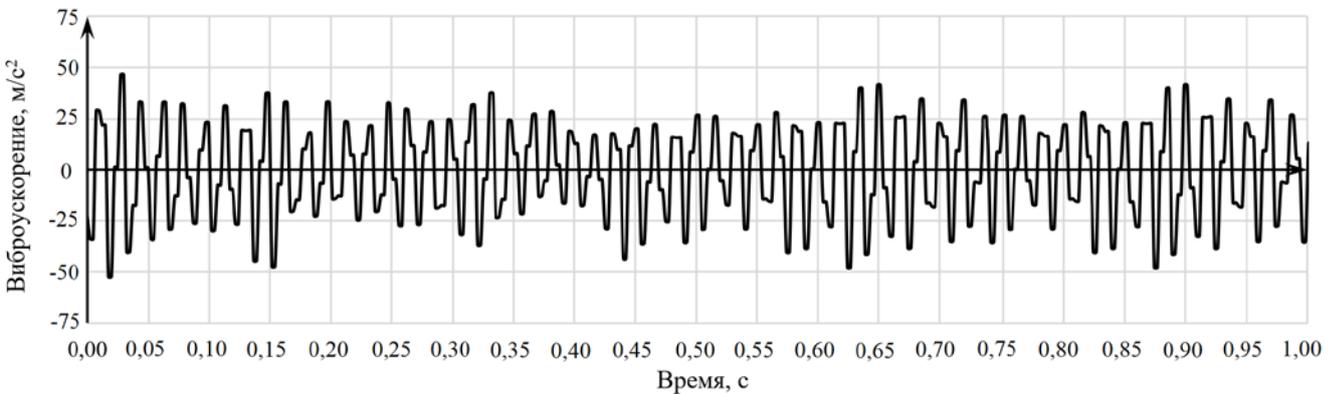


Рисунок 3.18 – Осциллограмма временной зависимости ускорения вибровальца при частоте вибрации 50 Гц и амплитуде 0,36 мм

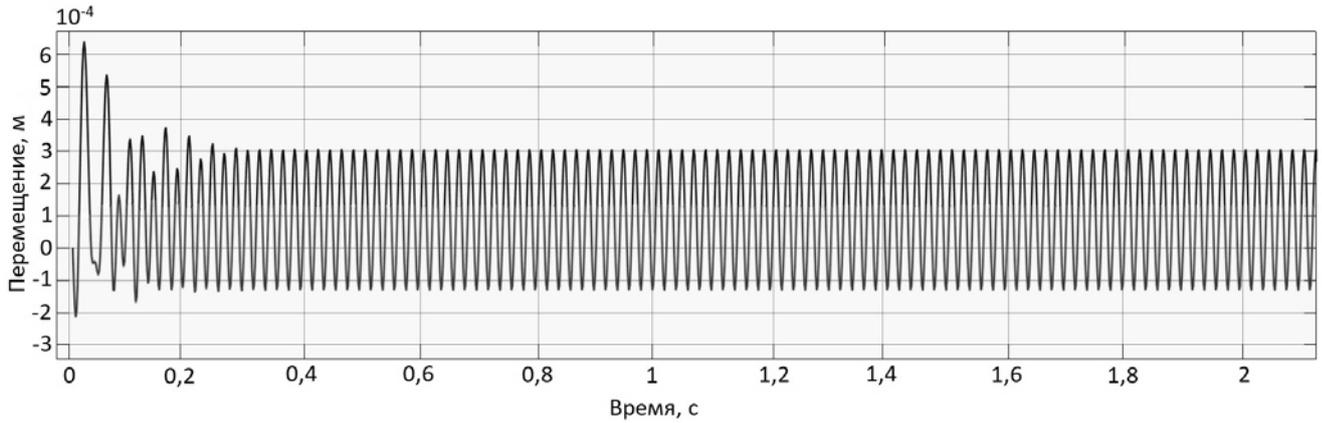


Рисунок 3.19 – Осциллограмма временной зависимости перемещения вибротальца при частоте вибрации 50 Гц и амплитуде 0,36 мм

В процессе уплотнения наблюдался большой перепад температуры асфальтобетона от 125 °С в начале укатки до 83 °С в конце. Для подтверждения адекватности исследований на протяжении всего эксперимента производились измерения параметров уплотнения с помощью плотномера ПА-МГ4, внесенного в Госреестр средств измерений РФ (№ 45571-10).

На рисунке 3.20 приведена полученная зависимость коэффициента уплотнения от температуры.

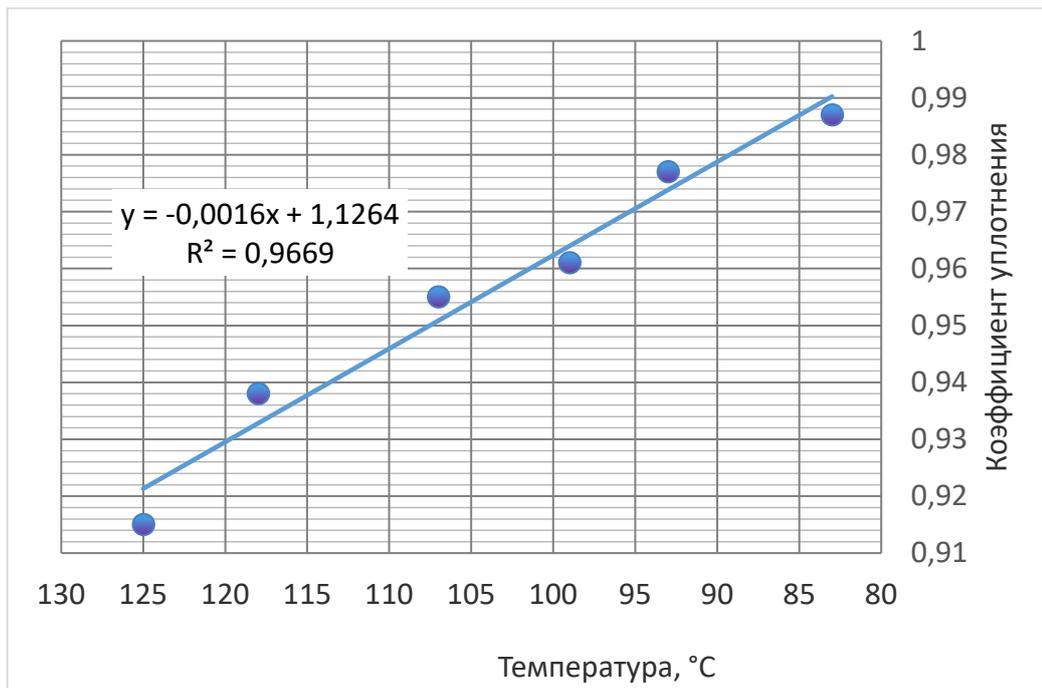


Рисунок 3.20 – Зависимость коэффициента уплотнения от температуры

При этом в значительной степени менялись свойства асфальтобетона, в том числе его жесткость и вязкость. На рисунке 3.21 приведена зависимость вязкости битума от температуры. Так как битум является основным элементом асфальтобетонной смеси, характер зависимости вязкости асфальтобетона от температуры будет схожим с представленным на рисунке.

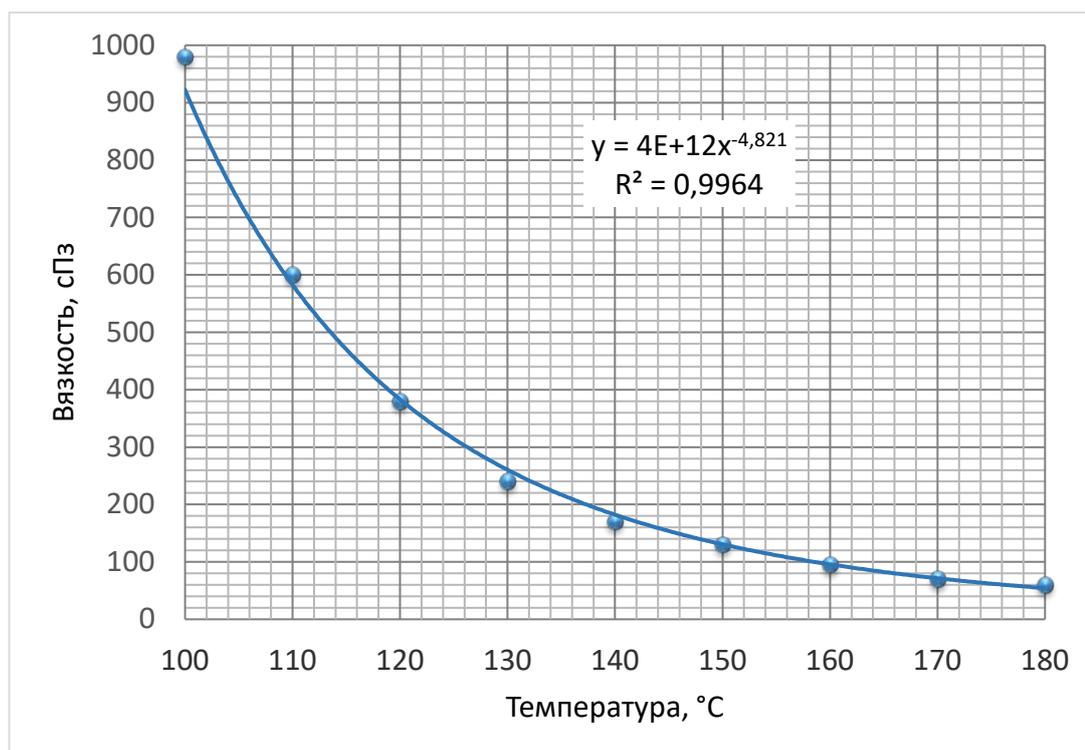


Рисунок 3.21 – Зависимость вязкости битума от температуры [4]

От температуры сильно зависит и модуль деформации (E) асфальтобетона. По данным В.П. Ложечко [46] в процессе уплотнения модуль деформации на момент окончания уплотнения может измениться в 10 раз от его первоначальной величины.

Полученные в результате экспериментальных испытаний данные также показывают высокую степень сходимости с результатами моделирования при сопоставимых материально-технических показателях процесса уплотнения, дополнительно подтверждая адекватность разработанной ранее имитационной модели (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Соотношение результатов экспериментальных и теоретических исследований

№ прохода катка	Плотность АБ, измеренная плотномером, кг/м ³	Коэффициент уплотнения (K _y)			
		Измерения плотномера	Результаты расчета натуральных показателей по формуле (2)	Результаты моделирования	Отн. погреш., %
1	2415,8	0,94	0,94	0,94	0
2	2454,4	0,955	0,99	0,96	1,95
3	2469,8	0,961	1,027	0,975	3,52
4	2510,9	0,977	1,058	0,988	4,36
5	2536,6	0,987	1,076	0,995	4,83

Погрешность приведенных результатов уплотнения для каждого прохода катка была оценена с помощью пакета «Microsoft Excel».

По формуле (3.6) определено среднеарифметическое значение K_y для каждого прохода:

$$\bar{K}_y = \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{n}, \quad (3.6)$$

Среднеквадратичное отклонение среднеарифметического значения определено по формуле:

$$S_K = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (K_i - \bar{K}_y)^2} \quad (3.7)$$

Относительная погрешность определена как отношение среднеквадратичного отклонения к среднеарифметическому значению K_y по формуле:

$$\Delta_{отн} = \frac{S_K}{\bar{K}_y} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

Выводы по третьей главе

На основании проведенных экспериментальных исследований процесса уплотнения асфальтобетонного покрытия сделаны следующие выводы:

1. Разработан усовершенствованный метод автоматизированного контроля параметров уплотнения асфальтобетонных покрытий вибрационными катками в диапазоне значений колебаний вибрационного вальца, температуры асфальтобетонной смеси, а также ровности и толщины формируемого покрытия, обеспечивающий их хранение и передачу в онлайн-режиме.

2. Полученные по результатам полевых испытаний состояния системы вибровозбуждения вальца и уплотняемого материала отображают реальные характеристики рабочего процесса укатки асфальтобетона вибрационным катком, сопоставимы с техническими возможностями катка Hamm HD+ 90, а также были подтверждены с помощью использования ручных приборов и инструментов измерения (дорожной рейки, механической рулетки, металлических щупов, нивелира и плотномера).

3. Подтверждена адекватность теоретических результатов моделирования экспериментальными исследованиями, погрешность при сравнении полученных значений коэффициента уплотнения составляет не более 4,83 %.

4. Изменение прочностных свойств асфальтобетона вследствие понижения температуры описывается линейной зависимостью. При этом наибольшее влияние на характер данной зависимости оказывают свойства битума.

4 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Система автоматизированной оценки качества уплотнения асфальтобетонных покрытий

Автоматизированная система контроля уплотнения асфальтобетонных покрытий, с возможностью функционирования в онлайн режиме позволяет осуществлять оперативную оценку состояния технологического процесса в заданный момент времени с учетом изменяющихся параметров окружающей среды и характеристик уплотняемого материала. Кроме того, подобная система обеспечивает повышение эффективности информационного потока связи между дорожно-строительными машинами (асфальтоукладчиками и дорожными катками), что также повышает качество выполняемых работ.

В рамках исследования основным критерием оценки качества уплотнения принята качественная и количественная связь между участками профилограммы уплотняемой поверхности асфальтобетона и виброграммы информационного сигнала вальца. Для обеспечения надежного высокопроизводительного процесса уплотнения асфальтобетонного покрытия система контроля должна обеспечивать не только заданное движение вальца катка, но и заданную диагностику технологической системы машины по параметру вибрации катка и параметрам асфальтобетонного покрытия, таким как: температура, ровность и толщина уплотняемого материала.

На рисунке 4.1 приведена структурно-логическая схема системы оценки качества уплотнения асфальтобетона вибрационными катками. Схема предусматривает взаимосвязь измеренных сигналов вальца и параметров уплотняемого асфальтобетона.

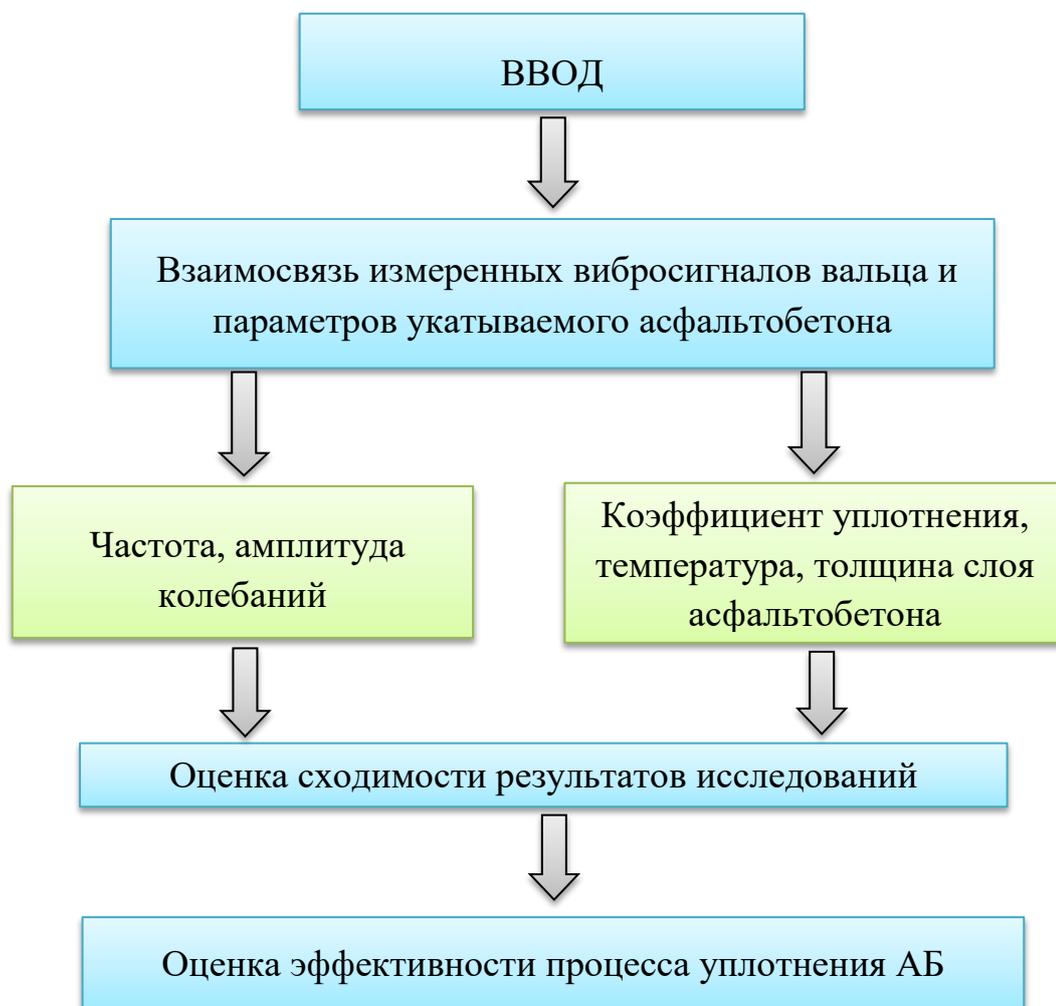


Рисунок 4.1 – Структурно-логическая схема системы оценки качества уплотнения асфальтобетона вибрационными катками

Определяющей характеристикой качества устройства дорожного покрытия является степень уплотнения асфальтобетона вибрационным катком. При уплотнении выполняется требуемое количество проходов катка по всему укладываемому участку дороги в заданный от типа смеси и скорости ее охлаждения промежуток времени. Следовательно, в зависимости от уплотняемого материала должны быть выдержаны оптимальные для него параметры уплотнения (количество проходов, скорость катка, частота и амплитуда вибровальцов, предел допустимых температур асфальтобетона и окружающего воздуха) [47].

Для оценки степени уплотнения разработан двухфакторный алгоритм, реализуемый за счет применения средств неразрушающего действия (рисунок 4.2).

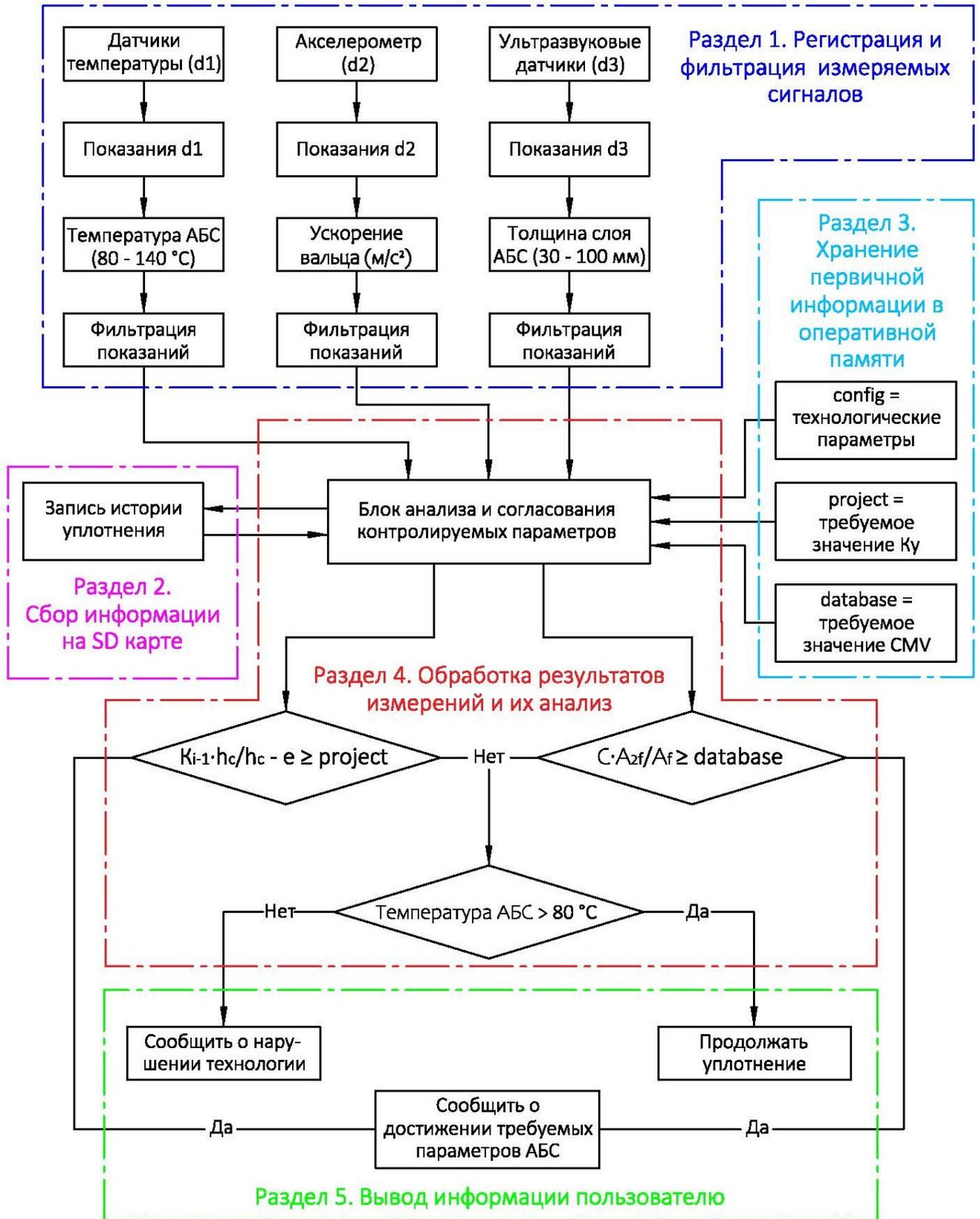


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритма двухфакторной оценки степени уплотнения асфальтобетона

Блок-схема алгоритма двухфакторной оценки степени уплотнения асфальтобетона содержит следующие разделы:

Раздел 1. Регистрация и фильтрация измеряемых сигналов.

Раздел 2. Сбор информации на SD карте.

Раздел 3. Хранение первичной информации в оперативной памяти.

Раздел 4. Обработка результатов измерений и их анализ.

Раздел 5. Вывод информации пользователю.

К первичной информации относятся следующие данные, задающиеся перед началом уплотнения на панели управления вибрационным катком:

- требуемый коэффициент уплотнения;
- требуемое значение показателя CMV ;
- толщина уплотняемого слоя АБС;
- расстояние между ультразвуковыми датчиками;
- тип материала дорожного основания;
- тип и марка смеси [76].

При движении дорожного катка происходит уплотнение асфальтобетонной смеси под воздействием вибрационного усилия вальца. Сигналы с датчиков температуры АБС, датчиков ровности и толщины формируемого покрытия и акселерометра поступают на бортовой микроконтроллер. После обработки сигналов информация о состоянии материала и ходе уплотнения отображается на экране дисплея в цифровом и графическом виде.

Структурно-функциональная схема взаимодействия вибрационного катка с асфальтобетонной смесью состоит из слоев: физическая система катка и внешняя среда (рисунок 4.3).

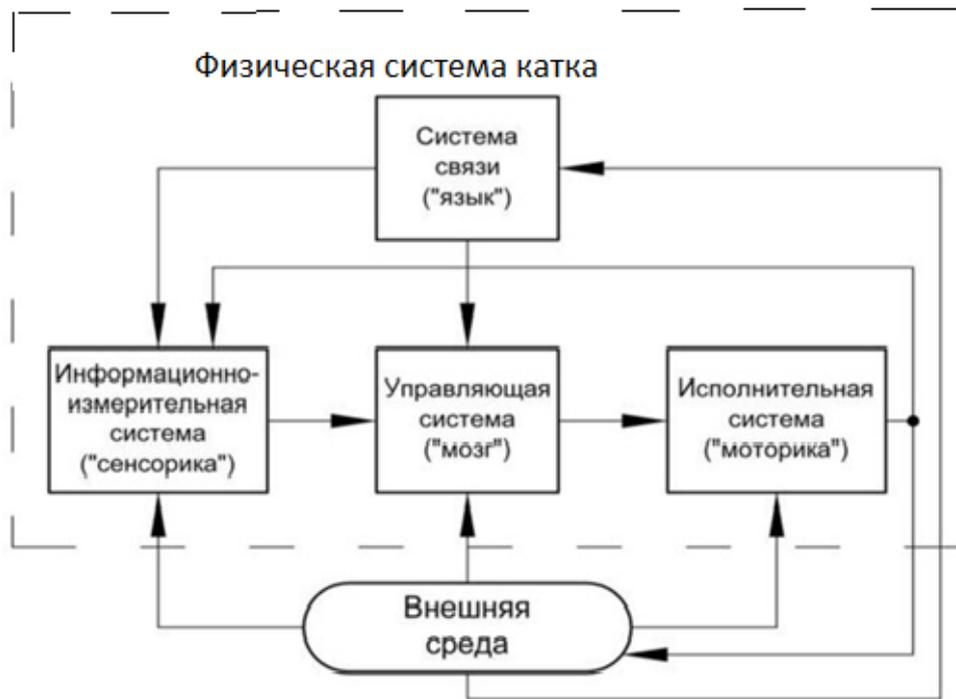


Рисунок 4.3 – Структурно-функциональная схема взаимодействия вибрационного катка с асфальтобетонной смесью

Для регистрации и визуализации технологических параметров процесса уплотнения асфальтобетона в физической системе катка предусмотрена информационно-измерительная система.

4.2 Система автоматизированного контроля для дооснащения вибрационных катков

Потребность оснащения отечественных моделей катков системами автоматизированного контроля параметров формирования асфальтобетонных покрытий с возможностью определения, анализа, хранения, и передачи сигналов уплотнения обусловлена запросом на повышение производительности и улучшение качества дорожно-строительных работ, а также тенденцией на развитие цифровизации и импортозамещения в хозяйственной деятельности.

На рисунке 4.4 приведена блок-схема разработанной системы автоматизированного контроля для дооснащения вибрационных катков.

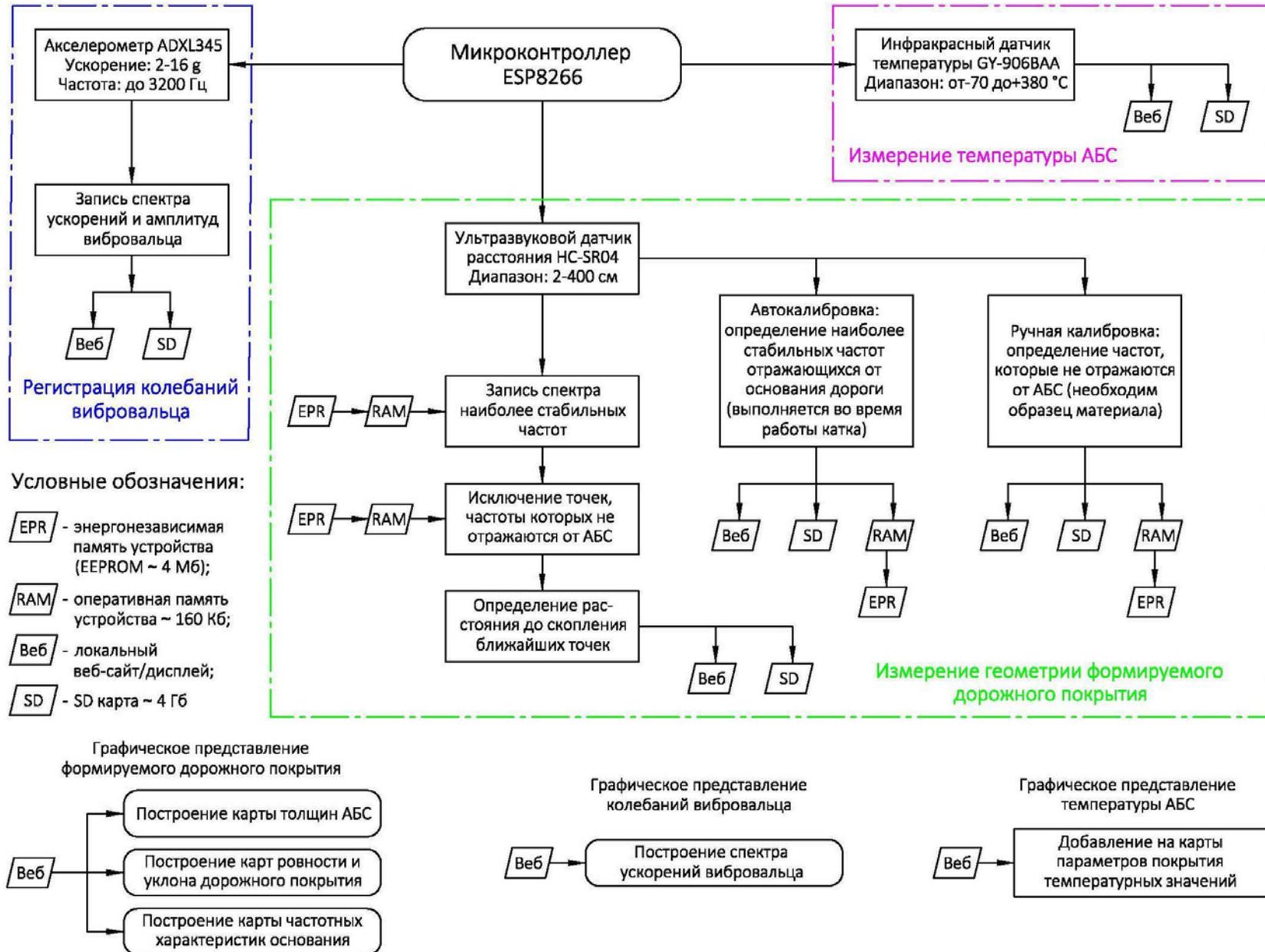


Рисунок 4.4 – Блок-схема системы автоматизированного контроля

Данная система построена на базе разработанной ранее аппаратно-программной системы контроля на платформе Arduino. Однако в качестве аппаратной платформы применена плата NodeMcu v3 LoLin, обладающая Wi-Fi интерфейсом и более мощным микроконтроллером (рисунок 4.5).

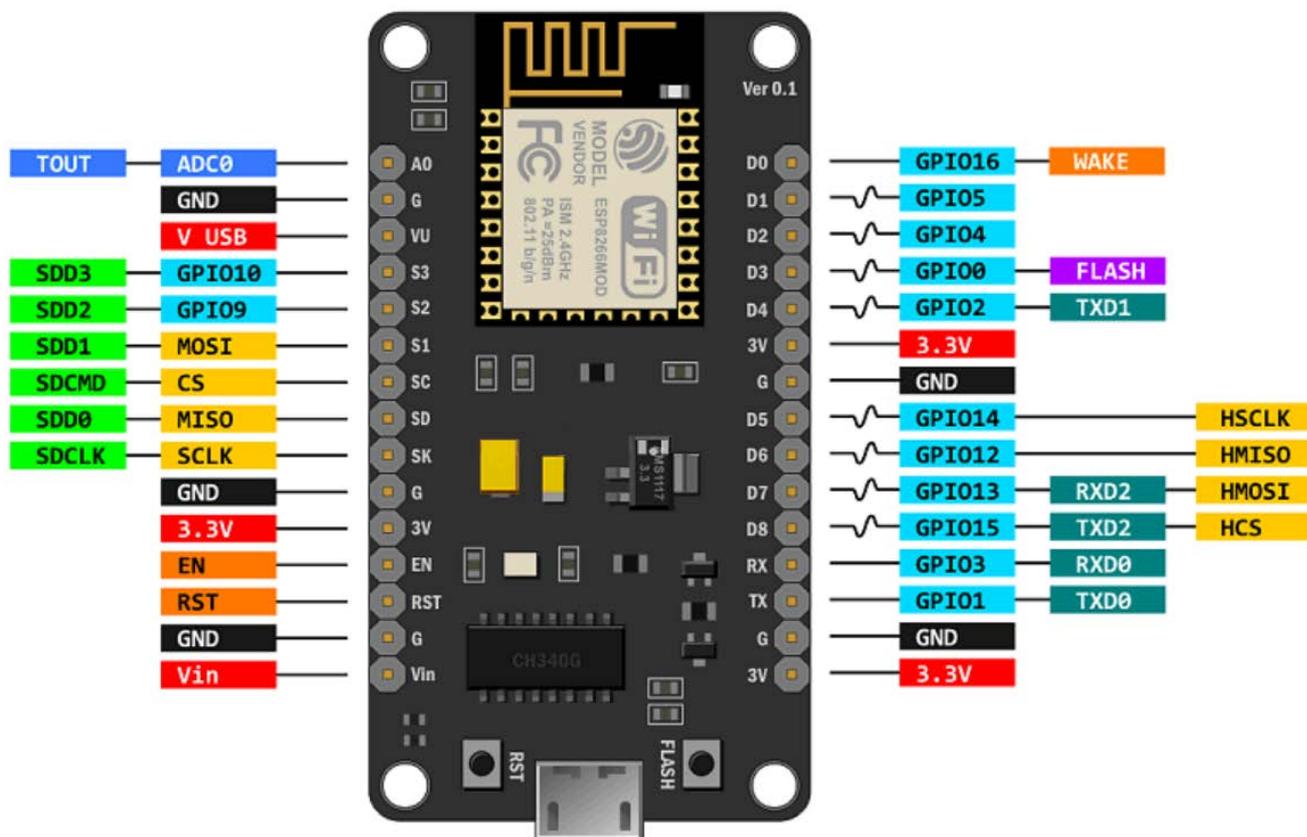


Рисунок 4.5 – Распиновка платы NodeMcu v3 LoLin [108]

Плата NodeMcu v3 LoLin построена на микроконтроллере ESP8266 с интерфейсом Wi-Fi и конвертере USB-UART на базе микросхемы CH340G. Плата содержит всё необходимое для поддержки установленного микроконтроллера: 11 портов ввода-вывода общего назначения, которые дополнительно могут использоваться в качестве ШИМ, АЦП, UART, SPI, I²C/TWI, SDIO и разъем micro-USB, кнопка сброса и кнопка отладки. Устройство может получать питание непосредственно от USB, либо от вывода Vin, контроллер автоматически определяет и выбирает наиболее подходящий источник тока.

Спецификация микроконтроллера:

микроконтроллер: ESP8266; тактовая частота: 80 МГц (до 160 МГц); конвертер USB-UART: CH340G; беспроводной интерфейс: Wi-Fi 802.11 b/g/n 2,4 ГГц; загрузчик: NodeMCU; ОЗУ (RAM): 160 КБ, доступно до 50 КБ; ПЗУ (ROM): 4 МБ; портов ввода-вывода: 11; рабочее напряжение: 3,3 В; входное напряжение: 5-12 В; потребляемый ток: до 220 мА; размер (ДхШхВ): 58 x 31 x 13 мм; вес: 10 грамм.

С целью контроля скорости передвижения вибрационного катка в систему был введен инкрементальный энкодер KY-040. Модуль содержит 5 штыревых контактов, два контакта отвечают за кнопку, три – за выход импульсов энкодера. Внешний вид энкодера представлен на рисунке 4.6.

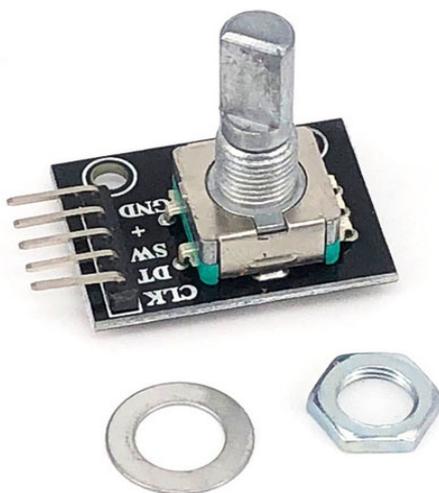


Рисунок 4.6 – Энкодер KY-040 [73]

Измерение скорости происходит при вращении вала датчика, закрепленного к валцу катка. В отличие от переменных резисторов, у которых угол поворота ограничен, данным модулем можно делать непрерывный полный оборот.

Схема подключения энкодера показана на рисунке 4.7. Контакт «+» на энкодере подключаем к контакту «Vin», затем контакт энкодера «GND» подключаем к контакту контроллера «GND», аналогичным образом подключаем контакт «SW» к контакту «D3», а контакт «DT» к контакту «D4».

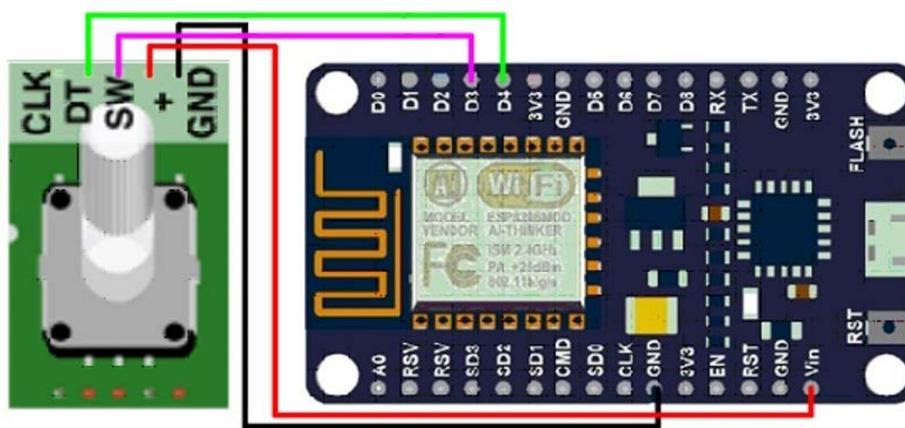


Рисунок 4.7 – Схема подключения энкодера к платформе NodeMcu v3 LoLin

После подключения всех необходимых датчиков готовая автоматизированная система монтируется на исследуемую установку с помощью крепежных элементов, далее следует перейти к написанию кода программирования, посредством которого система будет управляться и считывать нужные показания процесса уплотнения асфальтобетонных покрытий.

Работа с загрузчиком NodeMcu начинается с подключения платформы к компьютеру и установки драйвера CP2102. Программирование возможно в среде разработки ESPlorer IDE на языках LUA и Python или в среде Arduino IDE на языке C/C++.

Программный код функционирования разработанной системы, согласно блок-схеме, выполнен в среде Arduino IDE (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669601). Для работы с энкодером дополнительно потребовалось установить библиотеку "GyverEncoder.h". Скачав и поместив архив в папку с библиотеками IDE Arduino (C:\Users\NameUser\Documents\Arduino\libraries).

В зависимости от алгоритма функционирования датчиков и обработки полученных сигналов разработанная система в процессе производства дорожных работ способна контролировать следующие параметры формирования асфальтобетонных покрытий:

- температуру АБС;
- толщину уплотняемого слоя АБС;

- неровности и уклон дорожного покрытия;
- виброускорения и перемещения вальца;
- состав основания;
- скорость движения дорожного катка.

Полевые испытания разработанной системы автоматизированного контроля были реализованы в рамках объекта «Выполнение работ по ремонту автомобильных дорог общего пользования местного значения городского округа город Дивногорск», акт экспериментального исследования представлен в Приложении Б.

4.3 Информационная модель контроля параметров формирования асфальтобетонных покрытий

В данный момент большинство измерений неровности дорожного покрытия производится ручным методом: с помощью нивелиров, дорожных реек и уровней. Данные измерения выполняются на протяжении всего контрольного участка дороги, согласно п. 4.3 ГОСТ Р 56925-2016, что является весьма трудоемким мероприятием. Помимо этого, существует автомобильная установка ПКРС, состоящая из автомобиля и прицепного одноколесного прибора, оборудованного датчиком ровности [12]. Для измерения неровности с помощью установки ПКРС требуется привлечение дополнительной техники, оборудования и специалистов. В случае же применения инновационного устройства, монтируемого именно на раму катка, потребность в вышеперечисленных способах пропадает. Автоматизация процесса измерений ровности покрытия дороги позволяет повысить скорость регистрации измеряемых отметок неровностей поверхности покрытия и производительность выполнения дорожных работ. Также, помимо повышения эффективности измерения, повышается экономичность выполняемой работы. Нет необходимости нанимать человека, который будет ходить с рейкой, либо же привлекать дополнительную технику и ресурсы для измерений с помощью ПКРС, если это может фиксировать автоматическая система, показывая

встречаемые неровности и передавая информацию о них дальше, к примеру, на сервер, если нет необходимости или возможности оперативного устранения.

В соответствии с п. 4.2 ГОСТ Р 56925-2016 длину контрольного участка следует принимать 300-400 метров, и по всей принятой длине требуется проходить специалистам самостоятельно, прикладывая рейку последовательно. Предлагаемая модель содержит систему автоматизированного контроля параметров формирования покрытия дороги на платформе Arduino, в том числе контроля неровности поверхности дорожного покрытия. Эта платформа представляет собой программируемую микросхему. С этой микросхемой напрямую соединяются ультразвуковые датчики, определяющие расстояние до объекта, а также датчики температуры и акселерометры. Платформа программируется с помощью ряда доступных языков программирования и служит для считывания информации с датчиков (об изменении расстояний между ними и поверхностью покрытия, об изменении температуры асфальтобетонной смеси, об ускорении и перемещении вибровальца, об изменении скорости передвижения катка) и преобразования этой информации в числовой вид с последующим выводом полученных данных на дисплей оператора (водителя) дорожного катка. Также система оснащена модемом для передачи цифровых данных в базу хранения для устранения их позже или сбора общего количества неровностей на конкретном участке дороги.

Система контроля неровностей оснований и покрытий содержит подвижную направляющую (оснащенную ультразвуковыми датчиками, сканирующими поверхность дорожного покрытия и передающими сигнал на регулятор контроллера), установленную на раме дорожного катка. Направляющая имеет возможность совершать возвратно-поступательное движение в направлении перпендикулярном автомобильной дороге. То есть расстояние от направляющей, на которой закреплены датчики, и до поверхности дороги – фиксированное. Но за счёт дорожных неровностей оно меняется, становится больше или меньше. В таком случае датчик фиксирует изменение расстояния между ним и дорожным покрытием.

С целью визуализации макрорельефа покрытия дороги и параметров процесса уплотнения предлагается информационная модель в виде мобильного приложения для платформы Android, с возможностью графического отображения измеряемых параметров в виде двумерных карт состояний, состоящих из сетки точек измерений и изолиний с настраиваемым шагом (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Двумерная карта состояния покрытия

На карте состояния покрытия у каждого узла будут отображаться значения температуры и толщины слоя АБС, а также внизу блока будет мигать уведомление о недостаточной температуре при достижении критических показателей.

Всего в приложении будут отображаться четыре основных параметра:

- температура АБС;
- толщина слоя АБС;
- скорость передвижения катка;
- колебания вибрационного вальца.

Для каждого параметра простраивается своя карта. Возле узлов (точек измерения) отмечается значение выбранного параметра. В приложении есть блоки, отрисованные как прямоугольники, – нажимая на их заголовки можно сворачивать или разворачивать содержимое. Значение вибрации в реальном времени будет приведено в шапке приложения. А также будут отмечены средние значения частоты вибрации вдоль графика, соответствующего длине заасфальтированной дороги с некоторым периодом для оценки влияния различных частот вибрации на плотность асфальтобетона. Кроме того, в приложении будет возможен подбор оптимальной частоты вибрации на основе параметров уплотняемого материала и соответствующей ему частоты вибрации на конкретном участке дороги.

Для получения корректных данных в рекомендации необходима установка второго измерительного блока, который будет измерять толщину слоя АБС до уплотнения. На основе измеренных параметров будет рассчитываться коэффициент уплотнения. С целью обеспечения достоверности коэффициента уплотнения при новых проходах предполагается построение дискретной зависимости степени уплотнения при каждом новом проходе катка от толщины «до уплотнения в текущем проходе». Измерение «до уплотнения» и «после уплотнения» в одинаковых точках, осуществляется при помощи энкодера, установленного на спокойную (не вибрирующую) ось катка.

В блоке «Облако точек» можно посмотреть все измерения глубины в каждой точке (рисунок 4.9). Тип материала основания будет определяться автоматически на основании частотных характеристик (однако функция станет доступна после формирования обучающей выборки характеристик различных материалов оснований и зависимостей, возникающих при измерении спектров

наиболее стабильных частот от их форм-факторов). Кроме того, приложение позволяет сохранять измерения в удобном формате. В настройках можно задать частоту измерений, выполнить ручную калибровку и настроить внешний вид приложения.



Рисунок 4.9 – Отображение облака точек поверхности дорожного полотна

В результате использования разработанного приложения обеспечивается:

- снятие температуры в точках измерения;
- снятие пройденного расстояния дорожным катком и определение его скорости;
- выделение частот, стабильно отражающихся от основания и проходящих сквозь асфальт;
- фильтрация данных в каждой точке измерения через многократное снятие значения;

- формирование трёхмерного массива точек измерения (X – поперёк дороги, Y – вдоль дороги, Z – толщины слоя АБС);
- формирование значений частоты вибрации;
- создание буфера данных в энергонезависимой памяти платы и методов сверки с отправленным буфером при потере соединения;
- наладка отправки массивов данных через блютуз;
- наладка отправки данных через блютуз в режиме реального времени;
- наладка переподключения к новому телефону через блютуз с переносом всех данных на него с прежнего телефона (для возможности смены рабочих на катке и использования их личных телефонов).

Выводы по четвертой главе

Применение разработанного метода, алгоритма и системы автоматизированного контроля для дооснащения вибрационных катков позволяет:

1. Подробно исследовать поведение асфальтобетонной смеси под нагрузкой, создаваемой рабочими органами дорожного катка на протяжении всего процесса уплотнения.
2. Выявлять дефектные элементы слоев асфальтобетона, которые затруднительно определить в процессе уплотнения.
3. Определять частотные диапазоны, снижающие качество уплотнения асфальтобетонных покрытий, для последующего исключения этих частот из режимов виброуплотнения.
4. Обеспечивать взаимосвязи между информационными сигналами виброколебаний вальца катка и параметрами уплотняемого асфальтобетона;
5. Формировать базу информационных сигналов, возникающих в процессе уплотнения асфальтобетонных покрытий в диапазоне характеристик различных марок и типов асфальтобетонных смесей, режимов работы и моделей вибрационных катков, а также географических и погодноклиматических условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, выводы и рекомендации

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, содержатся технические и технологические решения по разработке метода контроля качества уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий, применение которого повысит эффективность использования вибрационных катков, обеспечит улучшение качества строительства автомобильных дорог и увеличит их эксплуатационный ресурс, что имеет существенное значение для развития страны.

Основные результаты исследования заключаются в следующем:

1. Впервые разработана имитационная модель взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном в среде Matlab&Simulink, отличающаяся возможностью преобразования полученных последовательностей данных методом Фурье, позволяющая исследовать алгоритмы работы систем автоматизированного контроля с учетом изменяющихся параметров уплотняемого материала, а также выявлять стационарные состояния системы вибровозбуждения вальца и характер ее динамики.

В процессе моделирования подтверждена взаимосвязь между жесткостью асфальтобетона и спектрами ускорений вибровальца. При уплотнении слабосвязанных (несущих) материалов валец работает в постоянном контакте с уплотняемым слоем, и на спектре виброускорений отображается только гармоника на рабочей (заданной) частоте вибрационного катка. Однако с повышением жесткости материала в процессе уплотнения валец переходит в режим частичного отскока, в результате чего на спектре виброускорений помимо гармоник, соответствующих рабочей частоте катка, начинают проявляться гармоники и субгармоники на других частотах.

2. Разработанная имитационная модель может быть использована при проектировании новых и модернизации существующих моделей вальцовых

катков в части моделирования процесса уплотнения с учетом внесенных изменений для отработки рациональных конструктивных решений.

3. Разработан метод контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий на основе оценки параметров уплотняемого материала, отличающийся введением дополнительного ультразвукового контроля ровности и толщины формируемого покрытия дороги и позволяющий вести комплексный мониторинг процесса уплотнения дорожных покрытий вибрационными катками.

4. Полученные в исследовании путем моделирования и экспериментальных испытаний зависимости изменяющихся параметров рабочего органа вибрационного катка и уплотняемого материала отображают реальные характеристики рабочего процесса уплотнения асфальтобетона, и удовлетворительно совпадают с данными сформированными СоюзДорНИИ и ВНИИСтройдормаш, подтверждая адекватность полученных результатов. При этом относительная погрешность сравнения значений коэффициента уплотнения, полученных путем теоретических и экспериментальных исследований составляет не более 4,83 %.

5. Впервые разработан алгоритм системы автоматизированного контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий, обеспечивающий двухфакторную оценку степени уплотнения асфальтобетона.

6. Впервые разработана отечественная система автоматизированного контроля для дооснащения вибрационных катков, позволяющая вести оперативный контроль параметров формирования асфальтобетонного покрытия дороги в режиме онлайн-наблюдения, выполнять запись информации в базу данных с последующей ее обработкой и анализом, отличающаяся применением авторского программного обеспечения и позволяющая осуществлять выбор обоснованного технологического решения при разработке специального программно-математического обеспечения системы в производственных условиях.

7. Результаты исследования внедрены в производственную деятельность ООО «Центр инженерно-экономического сопровождения» (г. Красноярск), МКУ

«Управление капитального строительства и городского хозяйства» (г. Дивногорск), а также используются в учебном процессе на кафедре «Строительные материалы и технологии строительства» ИСИ СФУ, что подтверждается соответствующими актами (Приложение А).

Перспективой дальнейшего исследования является создание автоматической системы прогнозирования фактической плотности асфальтобетонных покрытий на базе искусственных нейронных сетей.

Список условных обозначений

- A_f – амплитуда вертикальных ускорений вибрационного вальца с частотой изменения вынуждающего усилия f ;
- A_{2f}, A_{3f} – амплитуды гармоник спектра ускорения вибрационного вальца с частотой изменения вынуждающего усилия $2f, 3f$, соответственно;
- $A_{0.5f}, A_{1.5f}, A_{2.5f}$ – амплитуды субгармоник спектра ускорения вибрационного вальца вибрационного катка с частотами изменения вынуждающего усилия $0.5f, 1.5f, 2.5f$, соответственно;
- B – ширина вальца;
- C – коэффициент калибровки;
- D – диаметр вальца;
- E – динамический модуль деформации;
- F_c – контактная сила, вертикальных ускорений рамы катка;
- K – общий тарировочный коэффициент;
- K_y – коэффициент уплотнения;
- $K_{0.5f}, K_{1.0f}, K_{1.5f}, K_{2.0f}, K_{2.5f}, K_{3.0f}$ – коэффициенты значимости амплитуд гармоник спектра ускорения вибрационного вальца с частотами изменения вынуждающего усилия $0.5f, 1.0f, 1.5f, 2.0f, 2.5f, 3.0f$, соответственно;
- L – длина дуги контакта вальца;
- P – реакция уплотняемого материала на валец;
- P_k – масса катка;
- Q – вынуждающая сила вибровозбудителя;
- S – площадь контакта вальца с уплотняемым материалом;
- V – скорость движения катка;
- b_f – коэффициент вязкого трения амортизаторов;
- b_s – коэффициент вязкого сопротивления деформируемого материала;
- c – жесткость амортизаторов;
- e – абсолютная деформация уплотняемого материала;
- f – частота вибрационного вальца;

- g – ускорение свободного падения;
 h_c – толщина деформируемого слоя;
 k_f – коэффициент жёсткости амортизаторов;
 k_s – коэффициент жёсткости уплотняемого материала;
 m_f, m_l – масса рамы вальца;
 m_d, m_2 – масса вальца;
 m_s – масса присоединённого материала;
 n, m – коэффициенты, характеризующие распределение напряжений;
 η – вязкость деформируемого материала;
 η_2, η_3 – вязкость материала во время быстрой и медленной релаксации напряжений, соответственно;
 q – линейное давление вальца;
 t – текущее время вибрационного воздействия;
 x_f, x_l – вертикальное перемещение рамы вальца;
 x_d, x_2 – вертикальное перемещение вальца;
 x_s – вертикальное перемещение поверхности материала;
 $\dot{x}_f, \dot{x}_d, \dot{x}_s$ – вертикальные скорости рамы, вальца и поверхности материала соответственно;
 $\ddot{x}_f, \ddot{x}_d, \ddot{x}_s$ – ускорения рамы, вальца и поверхности материала, соответственно;
 σ_k – контактное давление вальца на уплотняемый материал;
 σ_m – предел текучести АБС;
 ε – относительная деформация уплотняемого материала;
 θ_2, θ_3 – время быстрой и медленной релаксации напряжений, соответственно;
 ω – угловая скорость вращения вибровозбудителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бадалов, В. В.** Изменение температуры асфальтобетона в процессе уплотнения [Текст] / В.В. Бадалов, А.Ф. Зубков // Автомобильные дороги. – 1973. – № 9. – с. 7.
2. **Бадалов, В. В.** Рациональный режим уплотнения асфальтобетонной смеси [Текст] / В. В. Бадалов, А. А. Шестопапов // Автомобильные дороги. – 1972. – № 6. – с. 18.
3. **Бадалов, В.В.** Исследование катков при уплотнении асфальтобетонных дорожных покрытий [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук / В. В. Бадалов. – Л.: 1974. – 17 с.
4. **Бадалов, В. В.** Уплотнение асфальтобетонного покрытия катками различного типа [Текст] / В. В. Бадалов, Д. С. Гуральник // Автомобильные дороги. – 1978. – № 7. – С. 17-21.
4. **Беляев, К. В.** Укладка и уплотнение асфальтобетонных смесей. Теория и расчёт : Учебное пособие / К. В. Беляев, В. С. Серебренников. – Омск : ФГБОУ ВПО "СибАДИ". – 2015. – 208 с.
5. **Богуславский, А. М.** Теоретические основы деформирования асфальтового бетона [Текст] : дис. д-ра техн. наук / А. М. Богуславский. – М., 1970. – 343 с.
6. **Богуславский, А. М.** Основы реологии асфальтобетона [Текст] / А.М. Богуславский, А. А. Богуславский. – М.: Высшая школа, 1972. – 200 с.
7. **Варганов, С. А.** Исследование вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей и обоснование выбора их рабочих параметров [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. А. Варганов. – М., 1960. – 15 с.
8. **Варганов, С. А.** Теоретические и экспериментальные исследования динамики вибрационных катков [Текст] / С. А. Варганов // Тр. ВНИИСтройдормаш. – М., 1962. – № 28. – с. 55-97.

9. **Горельшев, Н. В.** Исследование асфальтобетона каркасной структуры и его эксплуатационных свойств в дорожных одеждах [Текст] : дис. д-ра техн. наук / Н. В. Горельшев. – М., 1978. – 444 с.

10. **Горельшев, Н. В.** Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы [Текст] / Н. В. Горельшев. – М.: Можайск–Терра, 1995. – 176 с.

11. ГОСТ Р 52398-2005 Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования.

12. ГОСТ Р 56925-2016 ДОРОГИ АВТОМОБИЛЬНЫЕ И АЭРОДРОМЫ. Методы измерения неровностей оснований и покрытий.

13. ГОСТ Р 58442-2019 ДОРОГИ АВТОМОБИЛЬНЫЕ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИИ. Требования к проведению строительного контроля заказчика и подрядчика.

14. ГОСТ 9128-2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов.

15. **Жмудь, В. А** Ультразвуковой датчик измерения расстояния HC-SR04 / В. А. Жмудь, К. А. Кузнецов, Н. О. Кондратьев [и др.] // Автоматика и программная инженерия. – 2017. – № 4(22). – с. 18-26.

16. **Захаренко, А. В.** Взаимосвязь параметров катка и толщины слоя уплотняемого материала / А. В. Захаренко, В. Б. Пермяков, В. В. Соломонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004, № 12. – с. 72-77.

17. **Захаренко, А. В.** Обоснование рабочей скорости и амплитуды колебаний вальцов дорожного катка / А. В. Захаренко, В. Б. Пермяков, И. В. Карпухин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004, № 7. – с. 80-82.

18. **Захаренко, А. В.** Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: дис. д-ра техн. наук / А. В. Захаренко. – Омск, 2005. – 320 с.

19. **Иванченко, С. Н.** Исследование влияния вакуумирования на структуру дорожно-строительных материалов при их уплотнении [Текст] / С.Н. Иванченко,

С. В. Носов // Исследование рабочих процессов и динамики рабочих машин с регулируемыми параметрами. – Ярославль, 1984. – с. 21-23.

20. **Иванченко, С. Н.** Рабочий процесс и выбор параметров катка с вакуумным устройством [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук / С. Н. Иванченко. – Л., 1985. – 16 с.

21. **Иванченко, С. Н.** Рациональные температурные диапазоны укатки асфальтобетонных дорожных покрытий самоходными катками [Текст] / С. Н. Иванченко // Исследование строительных и дорожных машин. – Ярославль, 1990. – с. 41-46.

22. **Иванченко, С. Н.** Релаксация напряжений в асфальтобетонных смесях при их уплотнении [Текст] / С. Н. Иванченко // Исследование и испытание строительных машин и оборудования. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. ун-та, 1993. – с. 101-110.

23. **Иванчура, В. И.** Идентификация динамической системы процесса уплотнения асфальтобетонной смеси дорожными катками / В. И. Иванчура, А. П. Прокопьев, О. Г. Клевцова // журн. СФУ. Сер. Техника и технологии. – 2011. – Том 4. – № 5. – с. 557–566.

24. Измеритель плотности асфальтобетона ПАБ / Руководство по эксплуатации // ООО НПП «ИНТЕРПРИБОР» – Челябинск.

25. **Калужский, Я. А.** Теоретические основы укатки дорожных покрытий [Текст] / Я. А. Калужский // Сборник трудов ХАДИ. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1949. – Вып. 8. – с. 55-73.

26. **Калужский, Я. А.** Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд [Текст] / Я. А. Калужский, О. Т. Батраков. – М.: Транспорт, 1971. – 160 с.

27. **Климов, А. С.** Пат. 106627 РФ, МПК Е 01 С 23/07. Система автоматического управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси катком / А.С. Климов, Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев, С.С. Климов, И.Б. Оленев, Е.С. Турышева ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «СФУ». № 2011109346/03; заявл. 11.03.2011 ; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20.

28. **Климов, А. С.** Пат. 116507 РФ, МПК Е 01 С 19/48. Система автоматического управления винтового шнека асфальтоукладчика / А.С. Климов, С.С. Климов, С.В. Шилкин ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «СФУ». № 2011154625/03; заявл. 30.12.2011 ; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15.

29. **Климов, А. С.** Пат. 127385 РФ, МПК Е 01 С 23/07. Система автоматического управления дорожного катка / А.С. Климов, С.В. Шилкин, Р.Т. Емельянов, О.Л. Климова ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «СФУ». № 2012153532/03; заявл. 11.12.2012 ; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12.

30. **Климов А. С.** Пат. 128627 РФ, МПК Е 01 С 23/07. Система автоматического управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком / А.С. Климов, А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура, А.Д. Петров ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «СФУ». № 2013100852/03; заявл. 09.01.2013 ; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.

31. **Коваленко, Ю. Я.** Исследование самоходных вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] : дис. канд. техн. наук / Ю. Я. Коваленко. – Л., 1979. – 153 с.

32. **Коваленко, Ю. Я.** Влияние параметров вибрационных катков на уплотняемость асфальтобетонных смесей [Текст] / Ю. Я. Коваленко, В. М. Михненко, С. В. Старков // Исследование и испытание строительных машин и оборудования. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. ун-та, 1993. – с. 75-80.

33. **Колотвин, С. И.** Комплексная механизация и автоматизация строительства асфальтобетонных покрытий [Электронный ресурс] : магистерская диссертация : 08.04.01 / С. И. Колотвин. — Красноярск : СФУ, 2017. – 92 с. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/68622>

34. **Кондрашов, А. А.** Использование модуля деформации в реологической модели уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий / Н. А. Кондрашов, А. А. Шестопапов // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 7(51). – с. 55-66. – DOI 10.5862/MCE.51.7.

35. **Костельов, М. П.** Рациональные режимы уплотнения асфальтобетонной смеси [Текст] / М. П. Костельов, Т. Н. Сергеева, Л. М. Посадский // Автомобильные дороги. – 1980. – № 6. – с. 20-22.

36. **Костельов, М. П.** Устройство асфальтобетонных покрытий в неблагоприятных погодных условиях [Текст] / М. П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2002. – с. 46-52.

37. **Костельов, М. П.** Уплотнению асфальтобетона требуется обновленное поколение дорожных катков [Текст] / М. П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2003. – с. 12-22.

38. **Костельов, М. П.** Новая усовершенствованная технология устойчиво обеспечивает высокое качество уплотнения асфальтобетона [Текст] / М.П. Костельов, В. П. Перевалов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2005. – с. 120-132.

39. **Костельов, М. П.** «Умные виброкатки» для дорожников?! [Текст] / М. П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2006. – с. 30-44.

40. **Костельов, М. П.** Инновации для высокого качества дорожных работ и объектов ЗАО «ВАД» [Текст] / М. П. Костельов, В. П. Перевалов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2009. – с. 20-36.

41. **Костельов, М. П.** Функциональные достоинства и недостатки виброкатков для уплотнения асфальтобетона [Текст] / М. П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2009. – с. 42-52.

42. **Костельов М. П.** Уплотняющая способность дорожных катков для устройства оснований и покрытий [Текст] / М. П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2010. – с. 14-25.

43. **Кустарев, Г. В.** Методы и приборы контроля качества строительства дорожных покрытий / Г. В. Кустарев, С. А. Павлов, Х. А. Джабраилов // Проблемы совершенствования конструкции строительных, дорожных, коммунальных и аэродромных машин: материалы семинара. – Москва, 2-3 февраля 2011 г. – с. 69.

44. **Ложечко, В. П.** Исследование рабочего процесса гладковальцового катка с вакуумным балластным устройством [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук / В. П. Ложечко. – Л., 1981. – 15 с.

45. **Ложечко, В.П.** К вопросу о рациональном режиме уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] / В. П. Ложечко, А. Ф. Чебунин // Рукоп. деп. в ЦНИИТЭстроймаш. – Л., 1983. – 12 с.

46. **Ложечко, В. П.** Научные основы создания дорожных катков с автоматизированным оборудованием : специальность 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины" : автореферат дисс. на соиск. уч. степ. д. техн. наук / Ложечко Виктор Петрович. – Санкт-Петербург, 1997. – 32 с.

47. **Мелик-Багдасаров, М. С.** Строительство и ремонт дорожных асфальтобетонных покрытий : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Автомобильные дороги и аэродромы" направления подготовки "Транспортное строительство" / М. С. Мелик-Багдасаров, К. А. Гиоев, Н. А. Мелик-Багдасарова ; М. С. Мелик-Багдасаров, К. А. Гиоев, Н. А. Мелик-Багдасарова ; ЗАО "Асфальттехмаш", Московский автомобильно-дорожный ин-т (Гос. технический ун-т). – Белгород : КОНСТАНТА, 2007. – 158 с. – ISBN 978-5-902711-84-1.

48. **Морев, А. С.** Обоснование показателя уплотнения для системы непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками : специальность 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины" : дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Морев Артем Сергеевич. – Ярославль, 2017. – 180 с.

49. МЭМС и НЭМС датчики - презентация онлайн [Электронный ресурс]. URL: <https://ppt-online.org/319657>

50. **Носов, С. В.** Методология совершенствования технологий уплотнения грунтов земляного полотна и дорожных асфальтобетонных смесей в процессе строительства автомобильных дорог / С. В. Носов // Совершенствование процесса

профессиональной подготовки специалиста на ФТИП: Сборник научных трудов. – Липецк, 2011. – с. 109-111.

51. **Носов, С. В.** Концепция совершенствования технологий уплотнения дорожных грунтов и асфальтобетонных смесей на основе развития их реологии / С. В. Носов // Вестник Липецкого государственного технического университета. – Липецк, 2012. – № 1(20) – с. 86-94.

52. **Носов, С. В.** Математическое моделирование процесса уплотнения дорожно-строительных материалов жестким вальцом дорожного катка / С. В. Носов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2013. - № 4. – с. 31-35.

53. **Носов, С. В.** Разработка технологий уплотнения дорожных асфальтобетонных смесей и грунтов на основе развития их реологии [Текст]: дис. д-ра техн. наук / С. В. Носов. – Воронеж, 2014. – 366 с.

54. **Носов, С. В.** Обобщенная динамическая модель взаимодействия уплотнителей с дорожно-строительными материалами / С. В. Носов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – Воронеж, 2016. - № 4(44). – с. 90-98.

55. **Носов, С. В.** Развитие технологий уплотнения дорожно-строительных материалов на основе реологического подхода / С. В. Носов // Проблемы современной науки: сборник научных трудов конференции Липецкого государственного технического университета. – Липецк, 2016. – с. 166-168.

56. **Оленев, И. Б.** Совершенствование процесса стабилизации температурного режима гидропривода строительных машин : специальность 05.02.02 "Машиноведение, системы приводов и детали машин" : дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Оленев Игорь Борисович. – Красноярск, 2006. – 141 с.

57. **Перебейнос, Д. И.** Повышение эффективности автоматического управления процессом уплотнения асфальтовым катком [Электронный ресурс] : магистерская диссертация : 08.04.01 / Д. И. Перебейнос. – Красноярск : СФУ, 2017. – 103 с. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/68623>

58. **Пермяков, В. Б.** Исследование релаксации напряжений в асфальтобетонных смесях в процессе их уплотнения [Текст] / В. Б. Пермяков // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1985. – № 5. – с. 99-102.

59. **Пермяков, В. Б.** Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей / Пермяков В. Б., Захаренко А. В. // Строительные и дорожные машины. – 1989. – № 5. – с. 12-13.

60. **Пермяков, В. Б.** Совершенствование теории, методов расчёта и конструкций машин для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] : дис. д-ра техн. наук / В. Б. Пермяков. – Омск, 1992. – 412 с.

61. **Пермяков, В. Б.** К вопросу о кинетике остывания слоя асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения [Текст] / В. Б. Пермяков, В. В. Дубков // Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 6. – с. 102-105.

62. **Пермяков, В. Б.** Математическая модель уплотнения асфальтобетонных смесей. Пермяков В.Б., Беляев К.В. Изв. вузов. Стр-во. 2005, № 1, с. 109-115, 4 ил. Библ. 4. Рус // РЖ 20Т. Экономика строительства. – 2006. – № 8. – 93 с.

63. **Пермяков, В. Б.** Аналитическое описание процесса уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком / В. Б. Пермяков, В. В. Дубков, В. С. Серебренников // Омский научный вестник. – 2008. – № 1(64). – с. 67-71.

64. **Пермяков, В. Б.** Модель уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком [Текст] / В.Б. Пермяков, В. В. Дубков, В. С. Серебренников // Известия высших учебных заведений. – 2008. – № 10. – с. 84-90.

65. **Прокопьев, А. П.** Автоматизация технологических процессов дорожного строительства / А. П. Прокопьев, В. И. Иванчура ; Сибирский федеральный университет, Инженерно-строительный институт. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2013. – 244 с.

66. **Прокопьев, А. П.** Моделирование процесса уплотнения смеси асфальтовым вибрационным катком в среде Simulink / А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов, Д. И. Перебейнос // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 14–19 ноября 2016 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2016. – с. 311-313.

67. **Прокопьев, А. П.** Имитационная модель процесса уплотнения смеси асфальтовым катком с учетом числа проходов / А. П. Прокопьев, В. И. Иванчура, Р. Т. Емельянов, Д. И. Перебейнос // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2017. – № 3(46). – с. 77-84.

68. **Прокопьев, А. П.** Интеллектуальное управление уплотнением дорожных материалов вибрационными катками / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов, Р. Т. Емельянов, В. В. Никитин // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 6. – с. 33-36.

69. **Прокопьев, А. П.** К вопросу создания системы непрерывного контроля уплотнения дорожных материалов для асфальтоукладчиков / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов, В. И. Иванчура, Р. Т. Емельянов // Программная инженерия. – 2021. – Т. 12. – № 8. – с. 413-419.

70. **Прокопьев, А. П.** Моделирование объекта кибер-физической системы для укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов, Р. Т. Емельянов, В. В. Никитин // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 7. – с. 31-36.

71. **Прокопьев, А. П.** Применение методов статистического анализа и искусственного интеллекта в системах неразрушающего контроля уплотнения для / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов, В. И. Иванчура, Р. Т. Емельянов // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 9. – с. 48-51.

72. **Прокопьев, А. П.** Полевое исследование процесса укладки асфальтобетонной смеси с компонентами автоматизации технологии неразрушающего контроля уплотнения / А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов, А. С. Янаев [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 2(86). – с. 292-299.

73. Подключение энкодера KY-040 к Arduino [Электронный ресурс] / RobotChip. URL: <https://robotchip.ru/podklyuchenie-enskodera-ky-040-k-arduino/>

74. **Решетов, Д. Н.** Детали машин : учебник для машиностроительных и механических специальностей вузов / Д. Н. Решетов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1989. – 496 с.

75. Раскрываем тайны бесконтактных датчиков температуры [Электронный ресурс] / ООО "Терраэлектроника". URL: <https://krs.terraelectronica.ru/news/5502>

76. **Сабинин, В. Л.** Автоматизация процессов уплотнения асфальтобетонной смеси : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / В. Л. Сабинин. – Красноярск, 2007. – 128 с.

77. **Серебренников, В.С.** Обоснование режимных параметров вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук; науч. рук. канд. техн. наук Дубков В.В / Серебренников В. С. СибАДИ. – Омск. 2008. – 170 с.

78. **Солонина, А. И.** Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 210700 - Инфокоммуникационные технологии и системы связи" квалификации (степени) "бакалавр" и квалификации (степени) "магистр" / А. И. Солонина. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. - 425 с. : ил.; 25 см. - (Учебное пособие).

79. **Солдатов, А. И.** Определение временного положения акустического импульса методом аппроксимации огибающей сигнала / А. И. Солдатов, П. В. Сорокин, В. С. Макаров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 10(99). – с. 178-184.

80. **Суржиков, А. П.** Математическая модель электрического отклика на акустическое возбуждение композиционных материалов / А. П. Суржиков, Т. В. Фурса, Н. Н. Хорсов // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – с. 6-9.

81. Сдвоенные вибрационные катки [Электронный ресурс] / CAT // Caterpillar [Официальный сайт].

82. Системы для катков CCSFLEX [Электронный ресурс] / TRIMBLE. URL: <https://sitech-cr.ru/products/ccsflex-of-rollers>

83. СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85.

84. **Телушкин, А. В.** Обоснование структуры и режимов функционирования системы «вибрационный каток – земляное сооружение – приборы контроля параметров»: дис. канд. техн. наук / А. В. Телушкин. – Москва, 2000. – 259 с.

85. **Тюремнов, И. С.** Разработка математической модели функционирования системы непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационным катком / И. С. Тюремнов, А. С. Морев, Е. Ф. Скурыгин, И. С. Филатов // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. – 2013. – Т. 2. – с. 427-436.

86. **Тюремнов, И. С.** Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 1 / И. С. Тюремнов, А. С. Морев // Вестник ТОГУ. – 2015. – № 4(39). – с. 99-108.

87. **Тюремнов, И. С.** Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 2 / И. С. Тюремнов, А. С. Морев // Вестник ТОГУ. – 2015. № 1(40). – с. 69-76.

88. **Тюремнов, И. С.** Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и «интеллектуального уплотнения» / И. С. Тюремнов // Вестник ТОГУ. – 2016. № 2 (41). – с. 115-122.

89. ТР 103-07 Технические рекомендации по устройству дорожных конструкций с применением асфальтобетона. – М.: ГУП НИИМосстрой, 2007. – 109 с.

90. **Хархута, Н. Я.** Оптимизация параметров силового воздействия на слой асфальтобетонной смеси при уплотнении его катками [Текст] / Н. Я. Хархута, Е. Л. Стефанюк // Строительные машины. – Ярославль, 1978. – с. 34-36.

91. **Хархута, Н. Я.** Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий [Текст] / Н. Я. Хархута // Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд : Тр. СоюздорНИИ. – М., 1980. – с. 55-61.

92. **Хархута, Н. Я.** Выбор типа и режима работы катков при уплотнении асфальтобетонных смесей [Текст] / Н. Я. Хархута, А. А. Шестопапов // Автомобильные дороги. – 1986. – № 3. – с. 24-25.

93. **Шестопапов, А. А.** Пути улучшения ровности асфальтобетонных покрытий в процессе строительства [Текст] / А. А. Шестопапов, С. В. Старков // Автомобильные дороги. – 1979. – № 11. – с. 12-13.

94. **Шестопапов, А. А.** Интенсификация процесса уплотнения асфальтобетонных смесей укаткой с вакуумированием [Текст] : дис. д-ра техн. наук / А. А. Шестопапов. – М., 1988. – 440 с.

95. **Шестопапов, А. А.** Основные направления повышения эффективности уплотнения дорожно-строительных материалов [Текст] / А. А. Шестопапов // Тез. докл. Респ. конф. – СПб., 1992. – с. 49.

96. **Adam D.** Operational devices for compaction optimization and quality control (continuous compaction control & light falling weight device) / D. Adam, F. Kopf // Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction. - Athens, Greece. – 2004. – p. 97-106.

97. **Adam D.** Standardization, Design, Quality Assurance and Monitoring of Earth Works in Road Engineering in Austria // Vienna University of Technology Institute for Ground Engineering and Soil Mechanics Budapest. – 2007. – p. 33.

98. **Akesson, F.** Dynapac compaction analyzer and optimizer [Text] / F. Akesson // Transportation pooled fund. Intelligent compaction systems initial task working group meeting. – 2008. – 20 p.

99. ACE – Ammann Compaction Expert [Электронный ресурс] / Ammann Group. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/21839486/ace-ammann-compaction-expert-ammann-group>

100. Arduino – ArduinoBoardUno [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>

101. **Briaud, J. L.** Intelligent compaction: overview and research needs / J. L. Briaud, J. Seo // Texas A&M University. – December 2003. – p. 84.

102. **Cao, W.** Real-Time Evaluation of Compaction Quality by Using Artificial Neural Networks / Weidong Cao, Shutang Liu, Xuechi Gao, Fei Ren, Peng Liu, Qilun Wu // Advances in Materials Science and Engineering. 2020.

103. **Chang, G.** Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology For Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials / G. K. Chang, Q. Xu, R. Rasmussen, D. Merritt, L. Michael, D. White, B. Horan // IC Data Management, Federal Highway Administration Office of Pavement Technology, HIPT-10. – 2010. – p. 118.

104. **Chang, G.** Leveraging Intelligent Compaction and Thermal Profiling Technologies to Improve Asphalt Pavement Construction Quality: A Case Study. Transportation Research Record / G. K. Chang, K. Mohanraj, W. A. Stone, D. J. Oesch, & V. Gallivan // Journal of the Transportation Research Board, 2672(26). – 2018. – p. 48-56.

105. Compactometer, compaction meter for vibratory rollers / Geodynamik // – 25 с.

106. Digital Accelerometer ADXL345 [Электронный ресурс] / Analog Devices [Офиц. сайт].

107. **Erdmann, P.** Numerical simulation of dynamic soil compaction with vibratory compaction equipment / P. Erdmann, D. Adam // XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering. - Vienna, Austria, 9-11 September 2014. - p. 243-248.

108. ESP8266 NodeMCU V3 распиновка [Электронный ресурс] / myROBOT. URL: <https://myrobot.ru/wiki/index.php?n=Experiences.NodemcuV3Pinout>

109. **Guo, N.** Dynamic modulus prediction of asphalt mixtures based on micromechanics [Text] / N. Guo, Y. Zhao // Engineering Mechanics. – 2012. – Vol. 10. – p. 13-19.

110. **Hirsch, V.** Lernen von den Strassen: Offenporige Asphalt [Text] / V. Hirsch, O. Ripke // Strasse und Autobahn. – 2008. – Vol. 59. – №. 1. – p. 12-19.

111. **Horan, B.** Improving Quality Control with Intelligent Compaction / B. Horan // Ohio Paving & NCAUPG Conference. – 2011. – p. 46.

112. **Mooney, M. A.** Intelligent Soil Compaction Systems / M. A. Mooney, R. V. Rinehart, N. W. Facas, O. M. Musimbi // National cooperative Highway Research Program 676.

113. **Mooney, M. A.** Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork Compaction: An Overview / M. Mooney, D. Adam // Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 2004. – p. 1-12.

114. **Nabizhanov, Zh. I.** Real-time neural network system for non-destructive control of asphalt mixtures compaction / Zh. I. Nabizhanov, A. P. Prokopev, V. I. Ivanchura, R. T. Emelyanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 29–31 июля 2021 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. – Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. – p. 12021.

115. **Nijboer, L. W.** Mechanical properties of asphalt materials and structural design of asphalt roads [Text] / L.W. Nijboer, R.C. Herner // Highway research board proceedings. – 1954. – Vol. 33. – p. 185-200.

116. **Nijboer, L. W.** Study of vibration phenomena in asphaltic road construction [Text] / L.W. Nijboer, C. Van der Poel // Assoc. asphalt paving technol. proc. – 1953. – Vol. 22. – p. 197-231.

117. **Pellinen, T. K.** Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus (with discussion) [Text] / T.K. Pellinen, M.W. Witczak // Journal of the association of asphalt paving technologists. – 2002. – Vol. 71. – p. 281-309.

118. **Pellinen, T. K.** Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization [Text] / T.K. Pellinen, M.W. Witczak, R.F. Bonaquist // Geotechnical Special Publication. – 2003. – p. 83-101.

119. **Prokopev, A. P.** Model of object non-destructive technology of road surfaces compaction control / A. P. Prokopev, Zh. I. Nabizhanov, R. T. Emelyanov, V. I. Ivanchura // Journal of Physics: Conference Series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021),

St.Petersburg, 03–06 марта 2021 года. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – p. 22041.

120. **Ryan, S.** Intelligent compaction overview [Text] / S. Ryan // Proceedings of Idaho asphalt conference. – 2014. – 17 p.

121. **Sandstrom, A. J.** Intelligent Systems for QA/QC in soil compaction / A. J. Sandstrom, C. B. Pettersson // GEODYNAMIK HT AB Box 7454 SE-103 92. - Stockholm, Sweden. - p. 1-17.

122. **Scherocman, J.A.** Intelligent compaction, does it exist? [Text] / J.A. Scherocman, S. Rakowski, K. Uchiyama // Proceedings of the annual conference of the Canadian technical asphalt association. – 2007. – Vol. 52. – p. 373-393.

123. **Schwartz, C.W.** Evaluation of the Witczak dynamic modulus prediction model [Text] / C.W. Schwartz // Proceedings of the 84th annual meeting of the transportation research board. – 2005. – № 05-2112. – 37 p.

124. **Scullion, T.** Field evaluation of new technologies for measuring pavement quality / T. Scullion, S. Sebesta, D. Rich, W. Liu // Texas Department of Transportation USA. – 2006. – p. 57.

125. **Shu, X.** Micromechanics-based dynamic modulus prediction of polymeric asphalt concrete mixtures [Text] / X. Shu, B. Huang // Composites part B: Engineering. – 2008. – Vol. 39. – № 4. – p. 704-713.

126. **Thanh, D.V.** Analysis of high temperature stability and water stability of SMA mixture using orthogonal experiments [Text] / D.V. Thanh, C.P. Feng, L.H. Long // International Journal of Civil & Structural Engineering. – 2011. – Vol. 2. – № 2. – p. 635-647.

127. **Thanh, D.V.** Study on Marshall and rutting test of SMA at abnormally high temperature [Text] / D.V. Thanh, C.P. Feng // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 47. – p. 1337-1341.

128. Ultrasonic Distance Sensor (#28015) [Электронный ресурс] / Manualzz. URL: <https://manualzz.com/doc/7673095/28015-ping-sensor-product-guide-v2.0>

129. **Van Susante, P. G.** Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // P. G. Van Susante, M. A. Mooney // Journal of engineering mechanics © ASCE, August 2008. - p. 684-693.

130. **Vennapusa, P. KR.** «Field Validation of Intelligent Compaction Monitoring Technology for Unbound Materials» / P. KR. Vennapusa, D. J. White, M. J. Thompson // Minnesota Department of Transportation Federal Highway Administration. – 2007. – p.12.

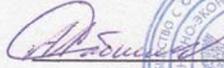
131. **White, D. J.** A review of roller-integrated compaction monitoring technologies for earthworks / D. J. White, P. KR. Vennapusa // Earthworks Engineering Research Center (EERC). Final Report ER10-04. – April 2010. – p. 31.

132. **White, D. J.** Iowa DOT Intelligent Compaction Research and Implementation – Phase I / D. J. White, P. KR. Vennapusa, H. Gieselman // Final Report, EERC Publication ER10-06. – November 2010. – p. 129.

133. **Witczak, M. W.** Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures [Text] / M.W. Witczak, J. Bari // Arizona state university research report. – 2004. – 29 p.

Акты внедрения результатов диссертационной работы

Утверждаю:
Директор ООО «ЦИЭС»

 Сабинин А.Л.
«20» июля 2022г

А К Т

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Перебейнос Дмитрия Игоревича по теме «Метод контроля качества
уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий на основе оценки
параметров уплотняемого материала»

Комиссия в составе: председатель, канд. тех. наук, технический директор ООО «Центр инженерно-экономического сопровождения» (ООО «ЦИЭС») Сабинин В.Л., члены комиссии: Инженер-технолог дорожно-строительных работ Назаренко А.А. (ООО «ЦИЭС»), д-р техн. наук, профессор Емельянов Р.Т. (ФГАОУ ВО «СФУ»), канд. техн. наук, доцент Прокопьев А.П. (ФГАОУ ВО «СФУ»), составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Перебейнос Д.И. использованы в производственной и инновационной деятельности ООО «ЦИЭС» в следующих направлениях:

1. подготовка программно-технических средств для измерений динамических характеристик рабочих органов вибрационных катков и асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения;
2. применение технологии автоматизированного контроля качества параметров асфальтобетонного покрытия при уплотнении вибрационными катками;
3. формирование информационных моделей процесса уплотнения в режиме реального времени.

Использование указанных результатов направлено на повышение производительности и улучшение качества уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий за счет автоматизированного мониторинга состояния уплотняемого материала и рабочих органов дорожно-строительных машин в режиме реального времени. Предполагается снижение стоимости строительства автомобильных дорог, за счет сокращения типов и количества дорожных катков, а также обеспечения оптимальных условий уплотнения асфальтобетонных смесей.

Председатель комиссии



Сабинин В.Л.

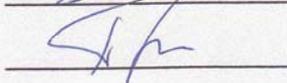
Члены комиссии:



Назаренко А.А.



Емельянов Р.Т.



Прокопьев А.П.

УТВЕРЖДАЮ

Директор МКУ «Управление
капитального строительства и
городского хозяйства»

Н.В. Спиридонова

2022 г.

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы Перебейнос Дмитрия Игоревича «Метод контроля качества уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий на основе оценки параметров уплотняемого материала»

Комиссия в составе: председатель, и.о. начальника отдела строительства МКУ «Управление капитального строительства и городского хозяйства» (МКУ «УСГХ») Левкова О.А., члены комиссии: инженер по надзору за строительством Попов С.В. (МКУ «УСГХ»), д-р техн. наук, профессор Емельянов Р.Т. (ФГАОУ ВО «СФУ»), канд. техн. наук, доцент Прокопьев А.П. (ФГАОУ ВО «СФУ»), составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Перебейнос Д.И. использованы в производственной деятельности МКУ «УСГХ» в следующих направлениях:

1. подготовка программно-технических средств для измерений динамических параметров рабочих органов асфальтоукладчиков и вибрационных катков;

2. подготовка программно-технических средств автоматизации контроля качества уплотнения асфальтобетона;

3. применение технологии непрерывного контроля качества уплотнения для асфальтоукладчиков и вибрационных катков в режиме реального времени.

Использование указанных результатов направлено на повышение производительности и улучшение качества уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий за счет автоматизированного мониторинга состояния уплотняемого материала и рабочих органов дорожно-строительных машин в режиме реального времени. Предполагается снижение стоимости строительства автомобильных дорог, за счет сокращения типов и количества дорожных катков, а также обеспечения оптимальных условий уплотнения асфальтобетонных смесей.

Председатель комиссии:

Левкова О.А.

Члены комиссии:

Попов С.В.

Емельянов Р.Т.

Прокопьев А.П.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГАОУ ВО Сибирский
федеральный университет

 _____ Гуца Д.С.

_____ 15 » июня 2022 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы «Метод контроля качества уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий на основе оценки параметров уплотняемого материала» Перебейнос Дмитрия Игоревича в учебный процесс Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Перебейнос Д.И. на тему: «Метод контроля качества уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий на основе оценки параметров уплотняемого материала» актуальны и обладают теоретической, и практической ценностью. Математическая и компьютерная модель динамической системы «вибрационный валец катка – асфальтобетонная смесь», результаты синтеза системы автоматического контроля уплотнения асфальтобетонной смеси дорожного покрытия катком, используются в учебном процессе на кафедре «Строительные материалы и технологии строительства» ИСИ СФУ по дисциплинам «Автоматизация и роботизация технологических процессов и машин в строительстве», «Технические средства автоматизации» по направлению магистерской подготовки 08.04.01.07 «Комплексная механизация и автоматизация строительства».

Алгоритмическое и программно-техническое обеспечение, предложенное в диссертационной работе Д.И. Перебейнос, используется при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ магистрантов.

И.о. заведующего кафедрой
«Строительные материалы и технологии строительства»,
канд. техн. наук, доцент.



А.А. Коянкин

Директор Инженерно-строительного института,
канд. техн. наук, доцент.



И.В. Тарасов

АКТ экспериментального исследования


 УТВЕРЖДАЮ
 Директор МКУ «Управление
 капитального строительства и
 городского хозяйства»
 Н.В. Спиридонова
 «05» 09 2022 г.

АКТ

экспериментального исследования компонентов системы автоматического контроля уплотнения асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиком Vogele Super 1600-2 и вибрационным катком НАММ HD 75

Состав комиссии:

Левкова О.А. – и.о. начальника отдела строительства МКУ «УСГХ»;
 Попов С.В. – инженер по надзору за строительством МКУ «УСГХ»;
 Емельянов Р.Т. – д-р техн. наук, проф. ФГАОУ ВО «СФУ»;
 Прокопьев А.П. – канд. техн. наук, доц. ФГАОУ ВО «СФУ»;
 Поребейнос Д.И. – аспирант ФГАОУ ВО «СФУ».

Актуальность экспериментального исследования

Уплотнение асфальтобетонной смеси традиционно выполняют асфальтоукладчик (АУ) и звено дорожных катков легкого, среднего, тяжелого типов. При этом оптимальная настройка режимных параметров уплотняющих органов вышеуказанных машин способна повысить качество асфальтобетонных покрытий и уменьшить стоимость дорожного строительства за счет сокращения типов и количества дорожных катков, а также создания оптимальных условий уплотнения на всех стадиях технологического процесса.

Исследования многих зарубежных ученых [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] посвященные разработке технологии интеллектуального уплотнения IC (*intelligent compaction*) для контроля и управления рабочим процессом уплотнения дорожных материалов вибрационными катками, и внедрению показателей измерений значения интеллектуального уплотнения CMVs (*intelligent compaction measurement values*) в качестве инструмента контроля качества сопряжены со значительными неопределенностями.

¹Zhong DengHua, Cui Bo, Liu DongHaiand Tong DaWei. Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rockfill dam. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52(11), 2009, 3406-3412. <https://doi.org/10.1007/s11431-009-0343-6>

²Zhong Deng Hua, Liu DongHaiand Cui Bo. Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam. *Science China Technological Sciences*, 54(7), 2011, 1906-1913. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4429-6>

³Liu Donghai, Jing Sun, Zhong Denghua, Song Lingguang. Compaction Quality Control of Earth-Rock Dam Construction Using Real-Time Field Operation Data. *J. Constr. Eng. Manag.*, 138(9), 2012, 1085-1094. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000510](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000510).

⁴Liu Donghai, Li Zilongand and Lian Zhenhong. Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller-integrated compaction monitoring technology. *Autom. in Constr.*, 44(0), 2014, pp. 234-246. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.016>.

⁵Xu Q. and Chang G. K. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction. *Autom. Constr.*, 62, 2016, pp 78-88. <https://doi.org/>

⁶Zhu X., Bai S., Xue G., Yang J., Cai Y., Hu W., Jia X. and Huang B. Assessment of compaction quality of multi-layer pavement structure based on intelligent compaction technology. *Constr. Build. Mater.*, 161, 2018, pp 316-329. <https://doi.org/>

⁷Foroutan, Maziar, Bijay, K. C.; Ghazanfari, Ehsan. Evaluation of Correlations between Intelligent Compaction Measurement Values and In Situ Spot Measurements, American Society of Civil Engineers Geo-Congress 2020 - Minneapolis, Minnesota (February 25&28, 2020), pp. 602-611. <https://doi.org/10.1061/9780784482810.062>.

Кроме того, на сегодняшний день в недостаточной мере рассмотрены актуальные вопросы автоматизированного управления технологическими процессами отряда дорожно-строительных машин асфальтоукладчик - дорожные катки, как объекта киберфизической системы. Известные отдельные математические модели не позволяют получить необходимую достоверность результатов моделирования. В недостаточной мере присутствуют научные работы, посвященные задачам создания методов автоматизированного контроля качества и управления уплотнения дорожных материалов в режиме реального времени. Для создания систем непрерывного контроля качества уплотнения, необходимы экспериментальные исследования в полевых условиях, с использованием компонентов этих систем.

Объекты исследования

Асфальтоукладчик Vögele Super 1600-2, Вибрационный каток НАММ HD 75, асфальтобетонная смесь тип Б1 (верхний слой – 50 мм, ширина покрытия 3,6 м)

Технические характеристики НАММ HD 75

(Тандемный каток с двумя вибрирующими вальцами Серии HD / Модельный ряд H187).

Габаритные размеры машины:

- общая длина – 4340 мм;
- ширина – 1790;
- общая высота – 2940 мм;
- высота погрузки (min) – 2260 мм.

Эксплуатационная масса катка – 7670 кг.

Характеристики вальцов:

- ширина – 1680 мм;
- диаметр – 1140;
- толщина – 17 мм;
- тип вальцов – гладкий/нераздельный.

Рабочие характеристики:

- радиус поворота по внутр. колею – 4084 мм;
- угол осцилляции – +/- 10 °
- рабочая скорость – 0-6,3 км/час;
- частота вибрации вальцов – 48/58 Гц
- амплитуда вальцов – 0,61/0,33 мм;
- центробежная сила вибровозбудителя – 77/63 кН
- предельный угол подъема с/без вибрации – 30/40 %

Максимальная транспортная скорость составляет 12,6 км/час.

Технические характеристики Vögele 1600-2

(Серия 2. Производство было начато в 2006 году, являлся улучшенной версией 1 серии. Производство прекращено в 2014 году. Серия 3. Модернизированный вариант 1 и 2 серии. Производится по настоящее время).

Габаритные размеры:

- длина базовой машины без плиты – 4405 мм;
- длина с учетом габаритов плиты – 5680-6100 мм;
- ширина без плиты – 2550 мм;
- высота по крыше кабины (рабочее состояние) – 3710 мм;
- дорожный просвет – 180 мм.

Эксплуатационная масса асфальтоукладчика с рабочим оборудованием – 18400 кг.

Рабочие характеристики:

- теоретическая производительность – до 700 т/ч;
- скорость в процессе укладки – до 24 м/мин;
- ширина укладки – 2500-5000 мм;
- ширина укладки с использованием уширителей (стандарт/опция) – 6500/8000 мм;

– максимальная толщина укладываемого слоя – 300 мм.

Максимальная транспортная скорость составляет 4,5 км/ч.

Рабочий орган – модель АВ 500 для версии TV (трамбуемый брус – вибрационная плита), раздвижной. Трамбующий брус, длина – 35 мм. Вибрационная плита, глубина – 330 мм (раздвижной рабочий орган, нераздвижной – 500 мм).

Спецификация плиты АВ 500 для версии TV	
<i>Ширина укладки</i>	
Зависит от типа укладчика	2.55м - 8 м
Расширение	Плита расширяется гидравлически до 5 м
Шаг увеличения ширины для уширителей	22.5 см, 75 см, 125 см
<i>Профиль укладки</i>	
Изменяется в диапазоне	от - 1% до +3% (в зависимости от типа укладчика дополнительно предлагается от -2.5 до +5%)
<i>Регулирование по высоте</i>	
Изменяется в диапазоне	от +35 мм до -20 мм
<i>Системы уплотнения</i>	
Трамбующий брус	имеется в базовой комплектации с возможностью уширения (версия TV)
Количество ударов	изменяется в диапазоне 500-1800 мин ⁻¹ (8-30 Гц)
Ход трамбуемого бруса (TV)	4 мм
Виброплита	имеются в базовой комплектации (версия TV)
Частота вибрации	до 50 Гц
Вибратор (V)	дисбалансный вибратор
<i>Габариты и вес</i>	
Транспортная ширина	АВ 500 TV: 2.55 м
Транспортная длина	АВ 500 TV: 1.32 м
Вес	АВ 500 TV: 3.15 т
<i>Нагрев плиты</i>	
Плита, вибробрус	электрический, нагревательными элементами
Электропитание	трехфазный генератор А.С.

Характеристики асфальтобетонной смеси

Смесь типа Б марки I плотного асфальтобетона по ГОСТ 9128-2013.

Температура смеси в бункере укладчика 140 °С.

Температура смеси в момент начала укатки 125 °С.

Асфальтобетонная смесь тип Б марки I плотного асфальтобетона по ГОСТ 9128-2013, применяется для устройства верхних слоев покрытий при новом строительстве и капитальном ремонте дорог III и IV категорий.

Характеристики асфальтобетонной смеси:

- мелкозернистая асфальтобетонная смесь, с размером минеральных зёрен до 20 мм;
- содержание щебня св. 35 % 45 %;
- асфальтобетон плотный, с остаточной пористостью св. 2,5 % – 5,0 %;
- температура асфальтобетонной смеси при отгрузке от 145 °С до 155 °С.

Цель исследования

Получить массив переменных – вертикальное ускорение вибрационной плиты рабочего органа асфальтоукладчика Voegele Super 1600-2 и вибрационного вальца катка НАММ HD 75 при уплотнении асфальтобетонной смеси типа Б1.

Условия проведения экспериментального исследования

Исследования проводились 28 июля 2022 г., в ходе работ по ремонту ул. Школьной в п. Манский, в рамках объекта «Выполнение работ по ремонту автомобильных дорог общего пользования местного значения городского округа город Дивногорск».

Длина участка исследования дороги 100 м.

Температура окружающего воздуха от 16 °С до 23 °С.

Начало эксперимента 09³⁰ ч. Завершение работ 13⁰⁰ ч.

Кадастровый номер земельного участка дороги: 24:46:0000000:11129.

Асфальтоукладчик Voegele Super 1600-2. Скорость движения асфальтоукладчика $V_{asph}=5$ м/мин, толщина слоя дорожного покрытия $h=5$ см. Варьируемые режимные параметры: частота трамбующего бруса f_{tamper} (максимальная частота 30 Гц – 100 %) / частота вибрационной плиты f_{screed} (максимальная частота 50 Гц – 100 %): 12Гц/30Гц (40%/60%); 15Гц/35Гц (50%/70%); 18Гц/40Гц (60%/80%). Определение коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси по зависимостям, полученным СоюздорНИИ, ВНИИСтройдормаш.

Каток вибрационный НАММ HD 75. Скорость движения катка $V_{roller}=5$ км/ч, толщина слоя дорожного покрытия $h=5$ см. Частота вибрационного вальца $f_{vibr}=48/58$ Гц. Определение коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси после каждого прохода, по зависимостям, полученным в исследовании [8].

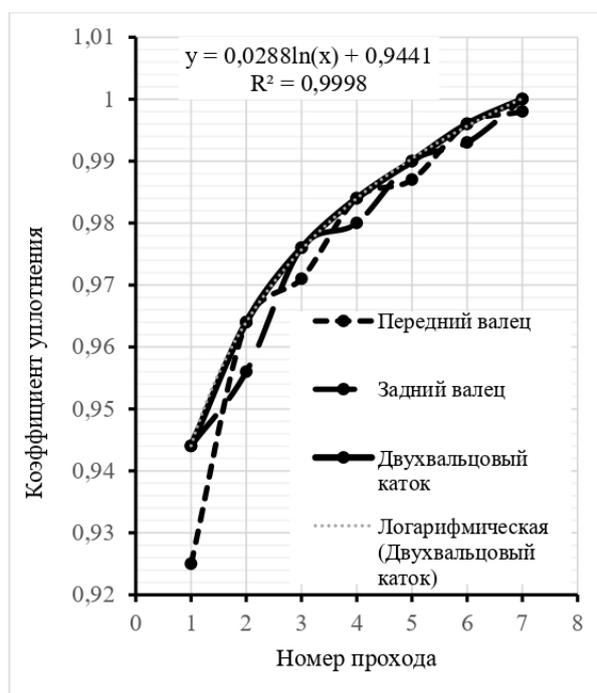


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента уплотнения вибрационного двухвальцового катка от номера прохода (толщина слоя 5 см)⁸

⁸ Rampini R., Fiori F., Bacchi M. Evaluation of compaction behavior of hot mix asphalt by means of finite element model // 4th International siiv congress – Palermo (Italy), 12-14 September, 2007.

Технические средства, приборы измерительные

Для измерения информационных сигналов вертикального ускорения вибрационных вальцов катка и вибрационной плиты асфальтоукладчика применялся цифровой акселерометр ADXL345 подключенный к микроконтроллеру NodeMcu v3 LoLin, передача сигналов на планшет осуществлялась через Bluetooth 2,0.

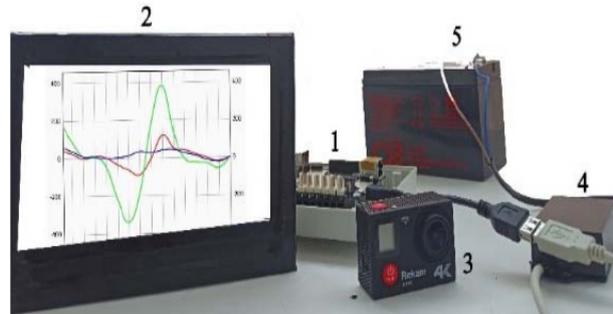


Рисунок 2 – Технические средства, использованные при исследовании: 1 – платформа NodeMcu v3 LoLin с микроконтроллером ESP8266; 2 – планшет; 3 – экшн-камера для фото/видео съемки; 4 – преобразователь напряжения и тока; 5 – аккумулятор.



Рисунок 3 – Датчик акселерометр ADXL345 с корпусом и магнитом

Скорость движения машин определялась по приборам.

Толщина слоя определялась ручным шаблоном – проволочный щуп.

Температура асфальтобетонной смеси определялась бесконтактным термометром.

Коэффициент уплотнения определен косвенно (экспертная оценка) по графикам ВНИИСтройдормаш и Союздорнии.

Результаты исследования

На рисунках 4 – 7 приведены результаты измерений вертикального ускорения вибрационной плиты асфальтоукладчика VogeLe Super 1600-2 во время уплотнения асфальтобетонной смеси Б1, при этом были реализованы три варианта соотношений режимных параметров рабочего органа f_i/f_{scr} : 12Гц/30Гц (40%/60%); 15Гц/35Гц (50%/70%); 18Гц/40Гц (60%/80%).

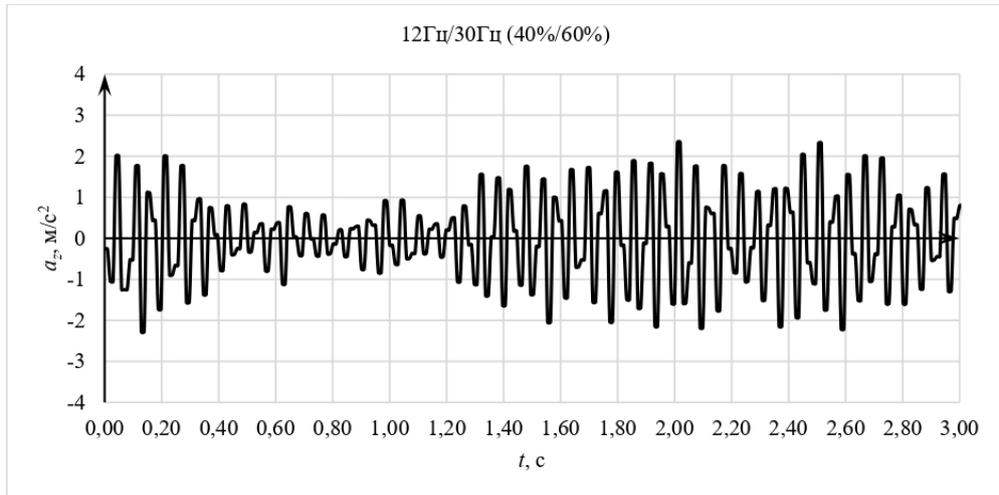


Рисунок 4 – Осциллограмма временной зависимости ускорения вибрационной плиты асфальтоукладчика при режимных параметрах f_i/f_{scr} (12 Гц/30 Гц) в течение 3 с

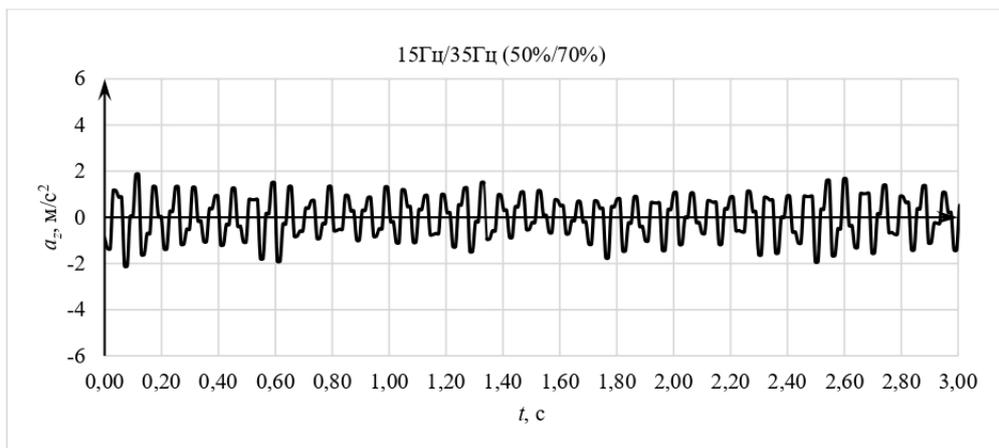


Рисунок 5 – Осциллограмма временной зависимости ускорения вибрационной плиты асфальтоукладчика при режимных параметрах f_i/f_{scr} (15 Гц/35 Гц) в течение 3 с

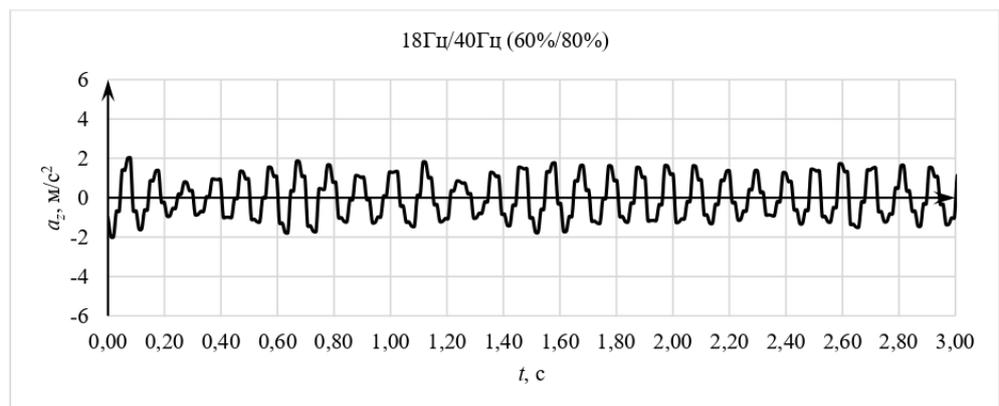


Рисунок 7 – Осциллограмма временной зависимости ускорения вибрационной плиты асфальтоукладчика при режимных параметрах f_i/f_{scr} (18 Гц/40 Гц) в течение 3 с

На основании приведенных зависимостей выполнены расчеты параметров динамического процесса взаимодействия рабочего органа асфальтоукладчика и асфальтобетонной смеси.

Расчет безразмерных комплексов (для рабочего органа трамбующий брус-виброплита): число ударов плиты и трамбующего бруса, приходящиеся на элементарный участок поверхности укладываемого покрытия [9]:

$$n_{scr} = \frac{f_{scr} \cdot l_{scr}}{V_{asph}}; n_t = \frac{f_t \cdot l_t}{V_{asph}}; n_{t,scr} = \frac{f_t \cdot l_{scr}}{V_{asph}},$$

где f_{scr} – частота колебаний вибративной плиты, Гц; l_{scr} – длина вибративной плиты, м; V_{asph} – скорость передвижения асфальтоукладчика, м/с; f_t – частота колебаний трамбующего бруса, Гц; l_t – длина трамбующего бруса, м.

Пик-фактор (Крест-фактор, Crest factor).

Пик-фактор – параметр, определяющий количество ударных импульсов во временном сигнале. Пик-фактор равен отношению пикового значения амплитуды временного сигнала к среднеквадратичному значению (СКЗ, Root Mean Square, RMS) ускорения вибративной плиты. Пик-фактор удобно использовать при качественной оценке происходящих процессов, т. к. быстрое преобразование Фурье, несмотря на утверждение, что любой сигнал может быть разложен в сумму гармонических синусоидальных сигналов, не выполняется для непериодических сигналов, ударов и «белого шума». И удары, и «белый шум» выглядят на спектрах одинаково, несмотря на существенные их отличия применительно к вибративному анализу.

Пик-фактор определяется по следующей формуле:

$$C = \frac{a_p}{a_{rms}},$$

где a_p – максимальное абсолютное значение ускорения, м/с²; a_{rms} – среднеквадратичное значение ускорения (Acceleration Root Mean Square Value) вибративной плиты.

Максимальное абсолютное значение ускорения (a_p). Этот показатель описывает изменение амплитуды сигнала ускорения виброплиты

$$a_p = \max \{ |a_{zi}| \} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

где a_{zi} – случайно измеренное вертикальное (ось Z) значение ускорения вибративной плиты асфальтоукладчика, м/с²; n – количество собранных образцов за определенный период.

Среднеквадратичное значение ускорения вибративной плиты (a_{rms}). Этот показатель отражает эффективность вибративного ускорения в процессе уплотнения

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{zi}^2} = \sqrt{\frac{a_{z1}^2 + a_{z2}^2 + \dots + a_{zn}^2}{n}}.$$

⁹Кизряков А.Н., Кабанов В.В., Фруктов П.А. Исследование уплотняющих рабочих органов асфальтоукладчиков. Труды ВНИИСтройдормаш. Вып. 102. 1985. С. 3-7.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты обработки экспериментальных данных

Режимы трамбуемого бруса, вибрационной плиты, f_i/f_{scr}	V_{asph} , м/мин	K_y	Безразмерные комплексы			a_{rms} , M/c^2	a_p , M/c^2	Пик-фактор, C	Временной период оциллограммы
			n_{scr}	n_t	$n_{t,scr}$				
12Гц/30Гц (40%/60%)	5	0,92	118,8	5,04	47,52	1,12	0,265	0,24	5 с
						1,02	0,265	0,26	60 с
15Гц/35Гц (50%/70%)	5	0,93	138,6	6,3	59,4	1,165	0,89	0,77	5 с
						1,624	0,89	0,55	60 с
18Гц/40Гц (60%/80%)	5	0,94	158,4	7,56	71,28	1,070	1,01	0,94	5 с
						1,352	1,021	0,75	60 с

По результатам расчета, с увеличением вибрационного воздействия за счет увеличения частоты колебаний трамбуемого бруса и вибрационной плиты от 12Гц/30Гц до 18Гц/40Гц, пик-фактор увеличивается от 0,26 до 0,75, что соответствует увеличению коэффициента уплотнения. Полученные результаты позволяют предложить идею использования параметра ускорения вибрационной плиты рабочего органа асфальтоукладчика для создания системы непрерывного контроля уплотнения асфальтобетонной смеси.

Графики зависимостей a_{rms} , a_p и пик-фактора C от коэффициента уплотнения K_y (экспертная оценка) представлены на рисунках 8 – 10.

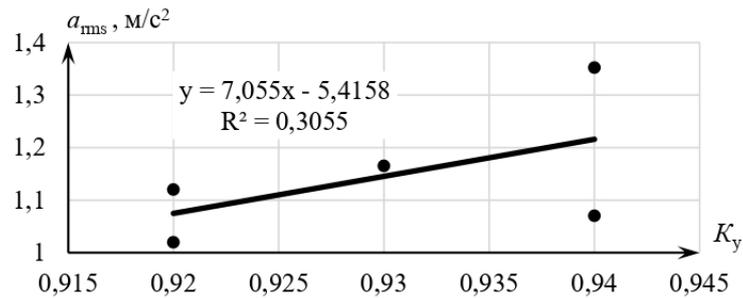


Рисунок 8 – Зависимость среднеквадратичного вертикального ускорения a_{rms} от коэффициента уплотнения смеси K_y

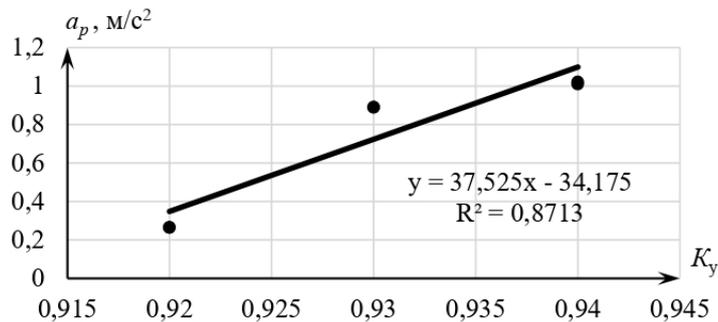


Рисунок 9 – Зависимость максимального абсолютного значения вертикального ускорения a_p от коэффициента уплотнения смеси

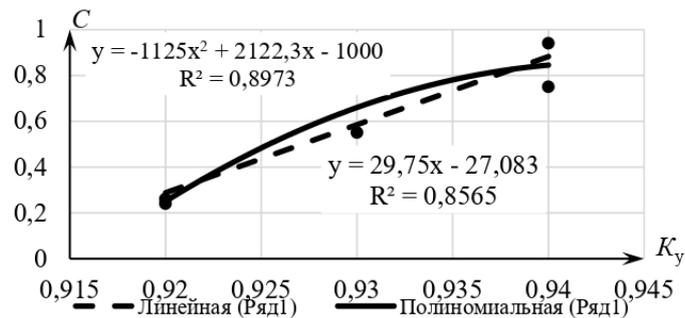


Рисунок 10 – Зависимость пик-фактора C от коэффициента уплотнения смеси K_y

Приведенные результаты экспериментального исследования, подтверждают наличие зависимости ускорения вибрационной плиты укладчика от степени уплотнения асфальтобетонной смеси. Однородность структуры асфальтобетона, формируется под действием факторов – уплотняющей нагрузки и температуры. В процессе укладки, когда температура 130 – 140 °С, можно получить требуемое качество уплотнения при меньших затратах энергии.

На рисунке 11 представлены временные зависимости гармонических колебаний вибрационного вальца катка НАММ HD 75 полученные в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси Б1.

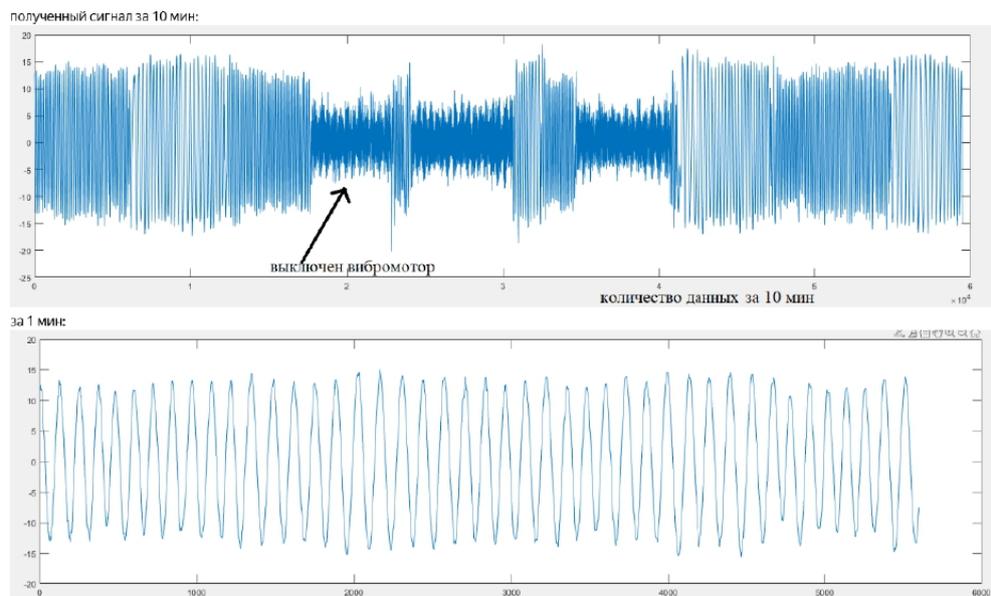


Рисунок 11 – Осциллограмма временной зависимости ускорения вибрационного вальца катка во время экспериментального исследования

Максимальные значения вертикального ускорения вибрационного вальца составляют до 15 м/с^2 , что имеет хорошую корреляцию с результатами исследования [10]. При этом коэффициент уплотнения смеси увеличился с 0,94 в начале укатки до 1,0 в конце.

¹⁰ Dan, Han-Cheng; Yang, Dong; Liu, Xiang; Peng, An-Ping; Zhang, Zhi (2020). *Experimental investigation on dynamic response of asphalt pavement using SmartRock sensor under vibrating compaction loading*. *Construction and Building Materials*, 247(), 118592–. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118592

Материалы фотографирования

Рисунок 12 – Общий вид работ по ремонту асфальтобетонного покрытия



Рисунок 13 – Общий вид вибрационного катка НАММ HD 75

Выводы. Полевые исследования процесса уплотнения асфальтобетонной смеси подтвердили возможности автоматизации технологии непрерывного контроля качества уплотнения, средствами неразрушающего действия. С помощью цифрового акселерометра, дистанционно, получены данные об изменении переменных вертикального ускорения вибрационной плиты асфальтоукладчика и вальца катка при различных режимах работы. Полученные данные будут использованы для создания интеллектуальной системы непрерывного автоматического контроля уплотнения асфальтобетонной смеси асфальтоукладчиками и вибрационными катками. Использование автоматических систем контроля уплотнения повышает эффективность управления дорожными машинами и влияет на улучшение качества дорожных покрытий.

Заключение комиссии

Исследования в области технологий непрерывного контроля качества уплотнения относятся к инновационным, имеют теоретическую и практическую значимость.

В дальнейшем по теме исследования рекомендуется выполнить следующие задачи.

1. Разработать теоретические основы построения интеллектуальных систем контроля качества уплотнения асфальтобетонных смесей отрядом дорожно-строительных машин (асфальтоукладчик - дорожные катки).

2. Подготовить методику экспериментальных исследований динамики рабочего процесса асфальтоукладчика и вибрационных катков, с применением оперативного контроля коэффициента уплотнения, температуры покрытия и толщины слоя; целью экспериментальных исследований является получение данных для создания приборов непрерывного контроля уплотнения асфальтоукладчиками и дорожными катками.

3. Выполнить подбор технических средств автоматизации для системы непрерывного контроля уплотнения с учетом особенностей рабочих процессов асфальтоукладчиков и дорожных катков, и минимальных затрат на них.

4. Провести экспериментальные исследования в условиях строительства асфальтобетонных покрытий с варьированием режимных параметров в допустимых пределах, с применением оперативного контроля коэффициента уплотнения, температуры покрытия и толщины слоя.

И.о. начальника отдела строительства МКУ «УСГХ»



О.А. Левкова

Инженер по надзору за строительством МКУ «УСГХ»



С.В. Попов

Д-р техн. наук, проф. ФГАОУ ВО «СФУ»



Р.Т. Емельянов

Канд. техн. наук, доц. ФГАОУ ВО «СФУ»



А.П. Прокопьев

Аспирант ФГАОУ ВО «СФУ»



Д.И. Перебейнос