

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Емельянов Рюрик Тимофеевич**

Официальные оппоненты: **Кузнецов Сергей Михайлович**  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова», кафедра «Строительное производство», профессор

**Данилевич Сергей Борисович**  
доктор технических наук, доцент, Новосибирский филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Академия стандартизации, метрологии и сертификации (учебная)», кафедра «Стандартизация, сертификация и менеджмент качества», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет»

Защита диссертации состоится 19 мая 2023 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.404.05, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 112.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета [www.sfu-kras.ru](http://www.sfu-kras.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филиппович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 2030 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. Пермьякова, 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. Witczak 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» (г. Красноярск), МКУ «УСГХ» (г. Дивногорск) 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 (соответствует п. 4 паспорта специальности).

2. Метод контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий на основе оценки параметров уплотняемого материала позволяет вести комплексный мониторинг процесса уплотнения дорожных покрытий вибрационными катками (п. 3).

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 (п. 7).

**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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована её актуальность, поставлены цели и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, излагается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрена технология устройства асфальтобетонных дорожных покрытий и приведены основные аспекты контроля качества выполняемых работ в соответствии с требованиями нормативной документации. Представлен анализ предшествующих исследований по теме диссертации и обзор существующих методов контроля уплотнения асфальтобетона, которые не в полной мере способны учитывать изменяющиеся параметры уплотняемого материала при укатке вибрационными катками и гарантировать заданную степень уплотнения.

С целью устранения выявленного недостатка рассмотрены теоретические предпосылки для разработки метода контроля качества уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий вибрационными катками на основе оценки параметров уплотняемого материала. Для реализации данного метода были предложены модели контроля ровности и толщины формируемого покрытия дороги, контроля вибрационного воздействия вальца катка на асфальтобетонную смесь и контроля ее температурного состояния во время укатки, которые позволят определять качество уплотнения при различных рабочих режимах катка, условиях окружающей среды и состояниях уплотняемого материала. Обоснованность предложенного метода в работе подтверждена необходимым объемом экспериментальных исследований вальцовых катков вибрационного действия в реальных условиях эксплуатации.

При этом основой повышения качества дорожно-строительных работ в настоящем исследовании является обеспечение комплексного мониторинга реологических характеристик асфальтобетонной смеси и динамических параметров уплотняющего оборудования в режиме реального времени, сравнение измеренных значений с эталонными и обеспечение возможности перехода к адаптивной стратегии процесса уплотнения.

**Во второй главе** выполнены теоретические исследования и математическое моделирование взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном. Вибрационный каток и дорожное покрытие в процессе взаимодействия образуют связанную систему, при этом условием уплотнения является передача вибрационного усилия от вальца к асфальтобетону. Отклик системы определяется частотой возбуждения и собственными колебательными режимами. Вариации степени уплотнения влияют на отклик и приводят к различным моделям колебаний вальца. Поэтому качество уплотнения может быть оценено с помощью сопоставления виброграммы вальца со степенью уплотненности асфальтобетона.

На рисунке 1 приведена математическая модель процесса уплотнения, позволяющая учитывать динамические параметры уплотняемого материала, предложенная В.Б. Пермяковым. 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 ( $E_{1,2,3}$ ).

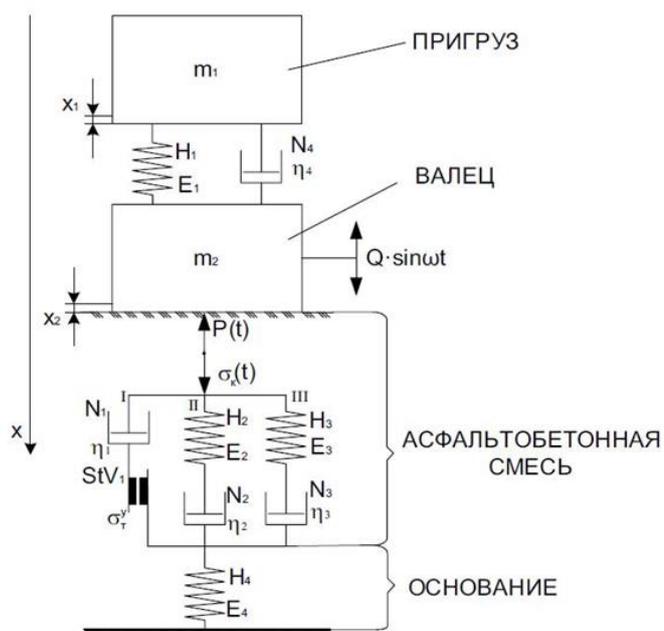


Рисунок 1 – Математическая модель процесса уплотнения

Колебательный процесс рассматриваемой модели записывается в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b_f \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c(x_1 - x_2) = m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 - b_f \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c(x_1 - x_2) = Q \cdot \sin \omega t + m_2 \cdot g - P(t), \end{cases} \quad (1)$$

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;  $\omega$  – угловая скорость вращения вибровозбудителя, Гц;  $t$  – текущее время вибрационного воздействия, с;  $P(t)$  – реакция уплотняемого материала на валец, Н.

На основе математической модели в Matlab&Simulink построена имитационная модель взаимодействия вальца вибрационного катка с асфальтобетоном (рисунок 2), имеющая в своем составе две подсистемы: SubSystem 1, описывающую колебательные движения вальца вибрационного катка, и SubSystem 2, отражающую деформационные свойства уплотняемого материала. Задающим сигналом в модели является угловая частота вращения вибровозбудителя.

С целью исследования и отработки алгоритмов систем автоматизированного контроля качества уплотнения дорожных покрытий в имитационной модели была реализована технология спектрального анализа на основе дискретного преобразования Фурье, путем ввода дополнительных блоков (массив 1).

## Массив 1

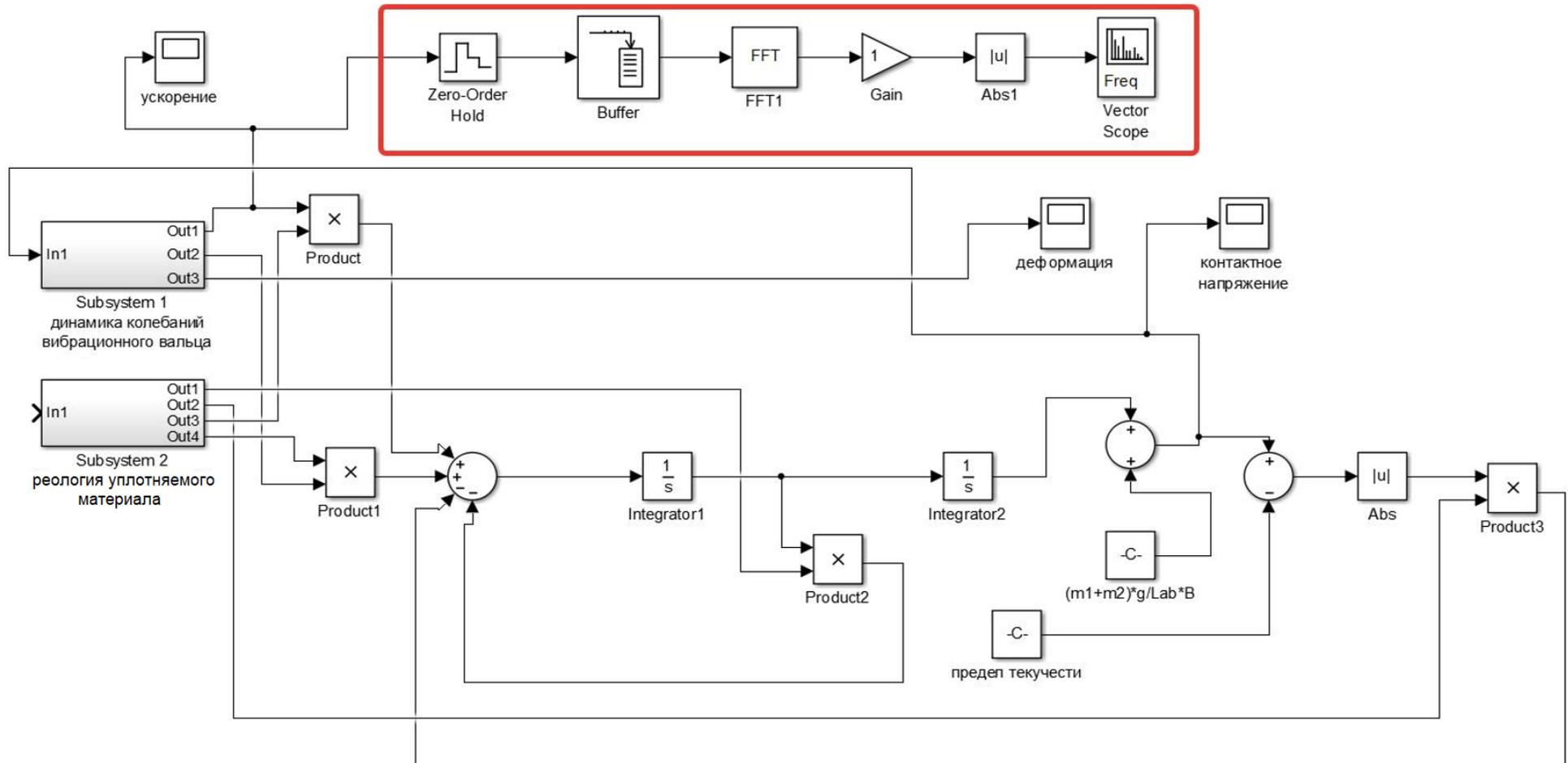


Рисунок 2 – Имитационная модель в MATLAB&amp;Simulink

На рисунке 3 показаны временные зависимости ускорения вальца и рамы катка при моделировании рабочего процесса уплотнения. Процесс укатки носит синусоидальный характер с частотой колебания 54 Гц.

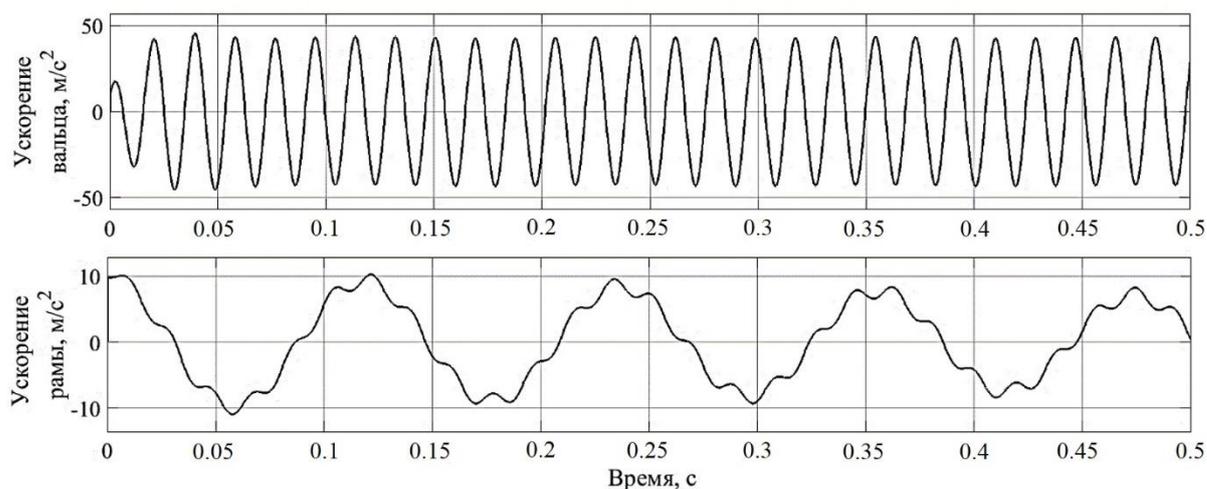


Рисунок 3 – Зависимости ускорения вальца и рамы вибрационного катка

Появление на спектре колебаний вальца дополнительных гармоник при частоте 54 Гц характеризует интенсивную стадию уплотнения асфальтобетона с высоким значением коэффициента уплотнения (рисунок 4).

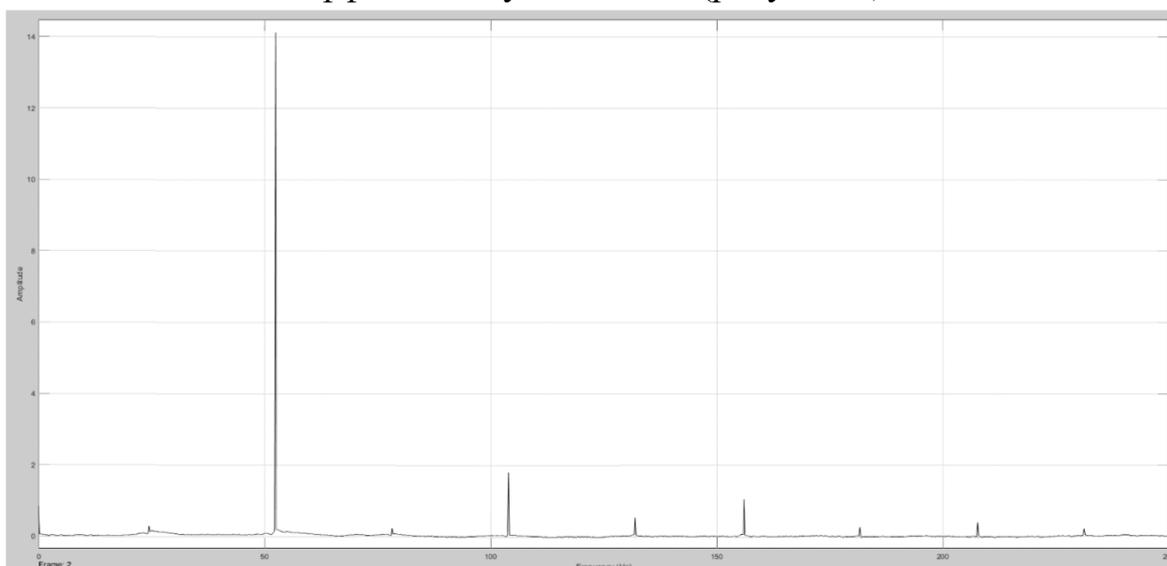


Рисунок 4 – Спектр виброускорения вальца вибрационного катка (горизонтальная ось – частоты колебаний, вертикальная – амплитуда)

Коэффициент уплотнения в исследовании определялся по формуле, предложенной С.В. Серебrenниковым:

$$K_y = \frac{K_{i-1} h_c}{h_c - e}, \quad (2)$$

где  $e$  – абсолютная деформация уплотняемого материала;

$h_c$  – толщина деформируемого слоя;

$i$  – номер прохода катка.

На рисунках 5 – 7 приведены зависимости изменяющихся с каждым проходом вибрационного катка параметров асфальтобетона, полученные в результате моделирования.

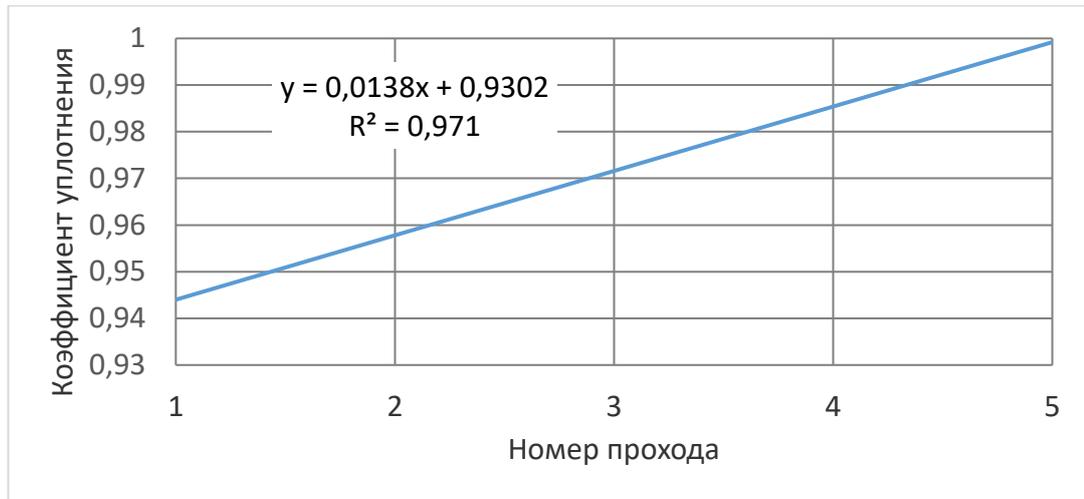


Рисунок 5 – График изменения коэффициента уплотнения

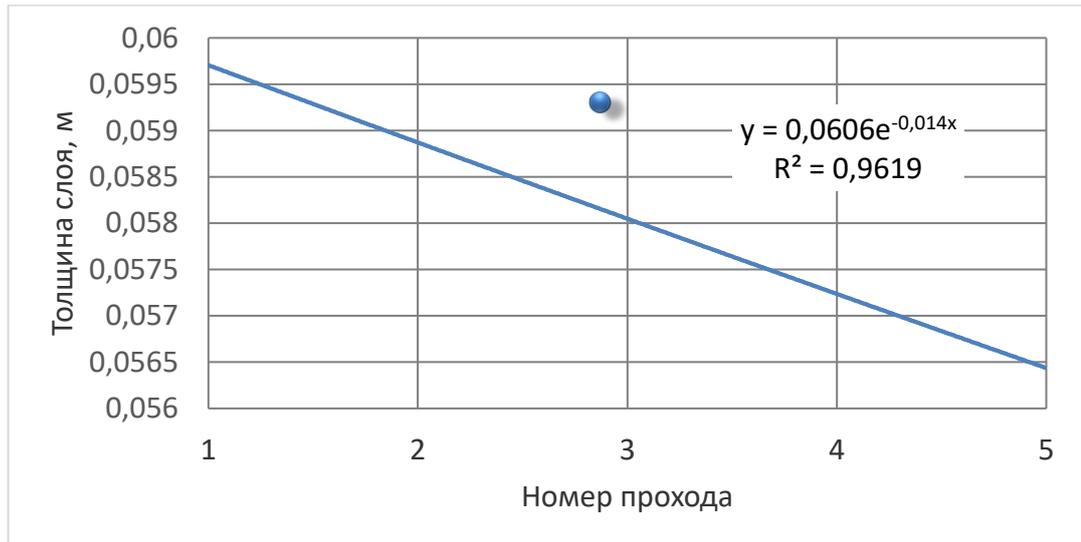


Рисунок 6 – График изменения толщины уплотняемого слоя

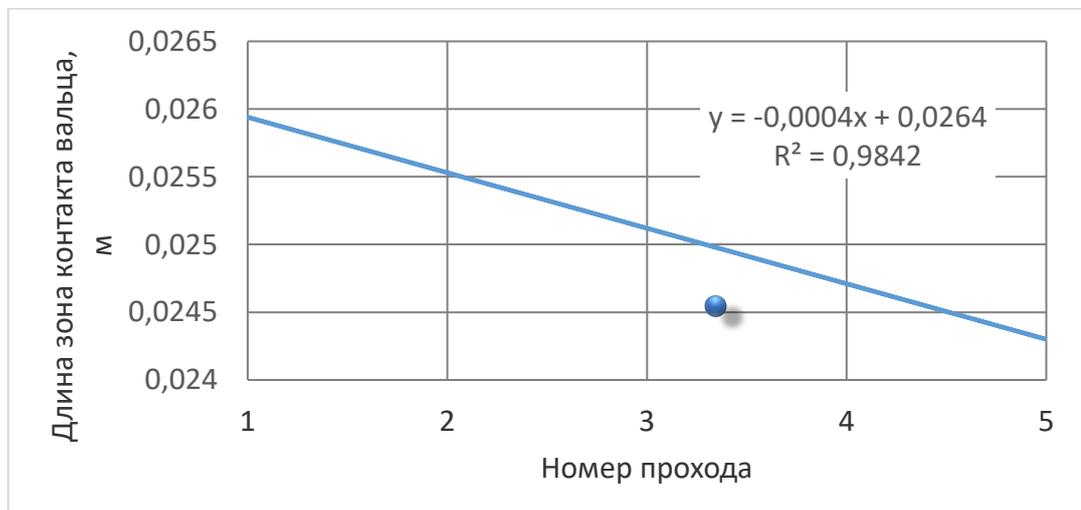


Рисунок 7 – График изменения длины дуги контакта вальца

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.

**Третья глава** посвящена разработке средств автоматизированного сбора сигналов укатки асфальтобетона вибрационным катком и натурным исследованиям процесса уплотнения. В целях исследования были реализованы полевые испытания, проведенные в рамках национального проекта «Безопасные качественные дороги». В ходе полевых испытаний осуществлялся контроль уплотнения асфальтобетонной смеси типа А марки I вибрационным катком Hamm HD+ 90. При этом вибросигналы катка и параметры уплотняемого материала определялись на двух вариантах режимных параметров вибровальцов.

Измерение производилось системой, выполненной на платформе Arduino и состоящей из контроллера, группы датчиков и Bluetooth модуля для беспроводной передачи данных на смартфон. Программная часть «Sketch» функционирования разработанной системы выполнена в среде программирования Arduino IDE.

Полученные в результате испытаний зависимости состояния системы вибровозбуждения вальца и уплотняемого материала приведены на рисунках 8 – 10.

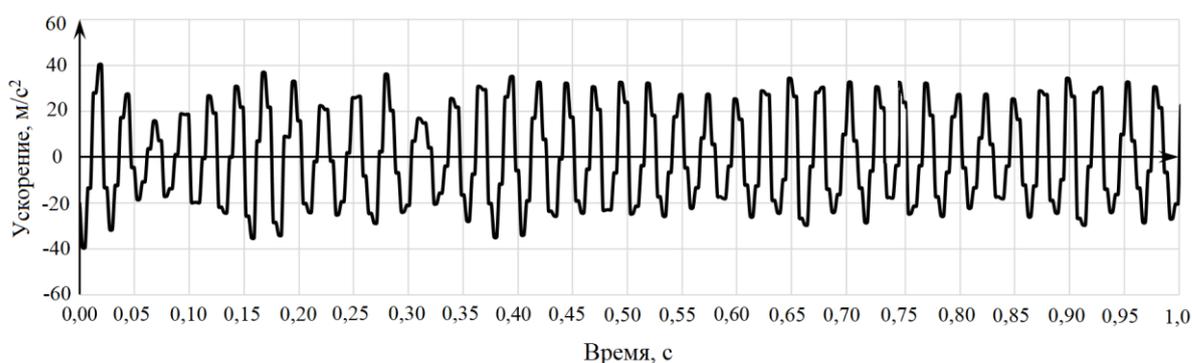


Рисунок 8 – Осциллограмма временной зависимости ускорения вибровальца при частоте вибрации 42 Гц и амплитуде 0,65 мм

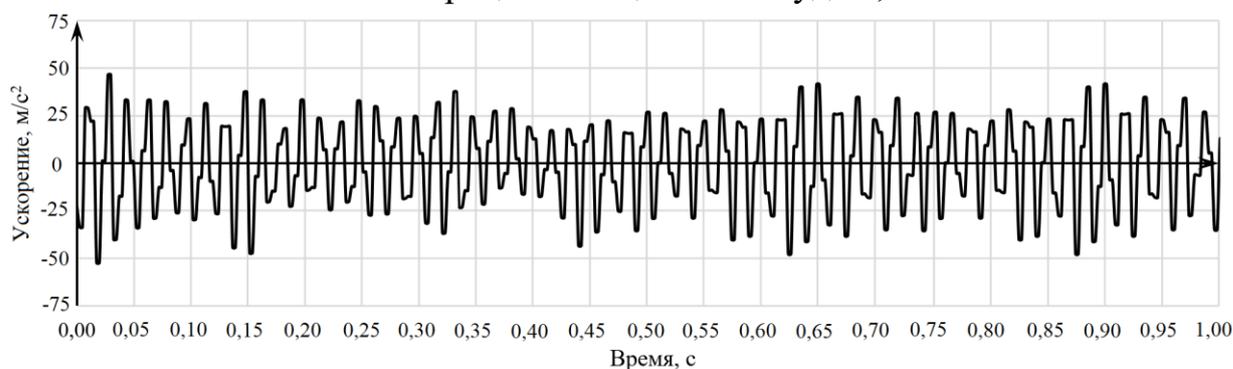


Рисунок 9 – Осциллограмма временной зависимости ускорения вибровальца при частоте вибрации 50 Гц и амплитуде 0,36 мм

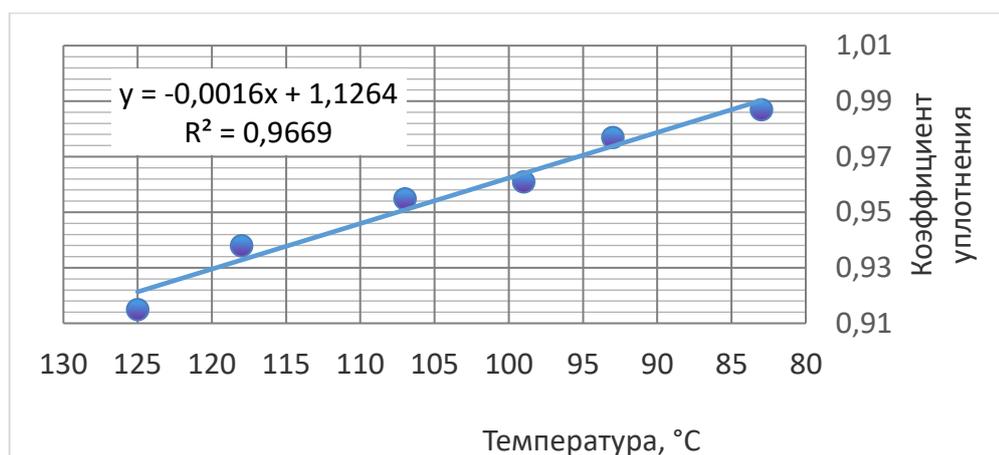


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента уплотнения от температуры

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).

Полученные данные также показывают высокую степень сходимости с результатами моделирования при сопоставимых материально-технических показателях процесса уплотнения (таблица 1).

Таблица 1 – Соотношение результатов экспериментальных и теоретических исследований

№ проход а катка	Плотность АБ, измеренная плотномером, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент уплотнения (K <sub>y</sub> )			
		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

В четвертой главе предложен метод контроля качества уплотнения асфальтобетонных покрытий на основе оценки параметров уплотняемого материала. Поскольку определяющей характеристикой качества устройства дорожного покрытия является степень уплотнения асфальтобетона вибрационным катком, для ее оценки разработан двухфакторный алгоритм, реализуемый за счет применения средств неразрушающего действия (рисунок 11).

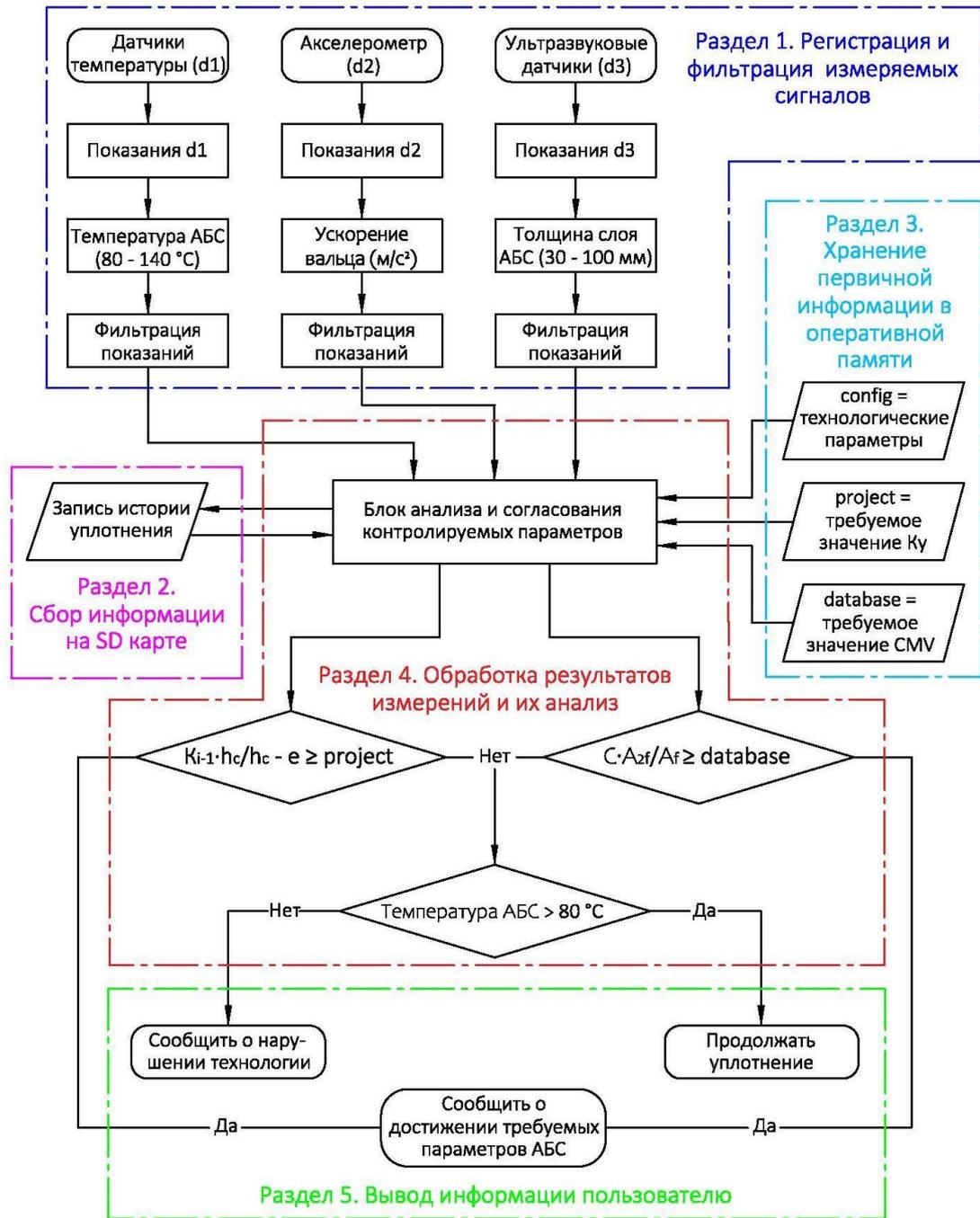


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма двухфакторной оценки степени уплотнения асфальтобетона

На базе разработанного метода построена система автоматизированного контроля для дооснащения вибрационных катков (рисунок 12), способная контролировать следующие параметры уплотнения:

- температуру АБС;
- толщину уплотняемого слоя АБС;
- неровности и уклон дорожного покрытия.
- виброускорения и перемещения вальца;
- состав основания.

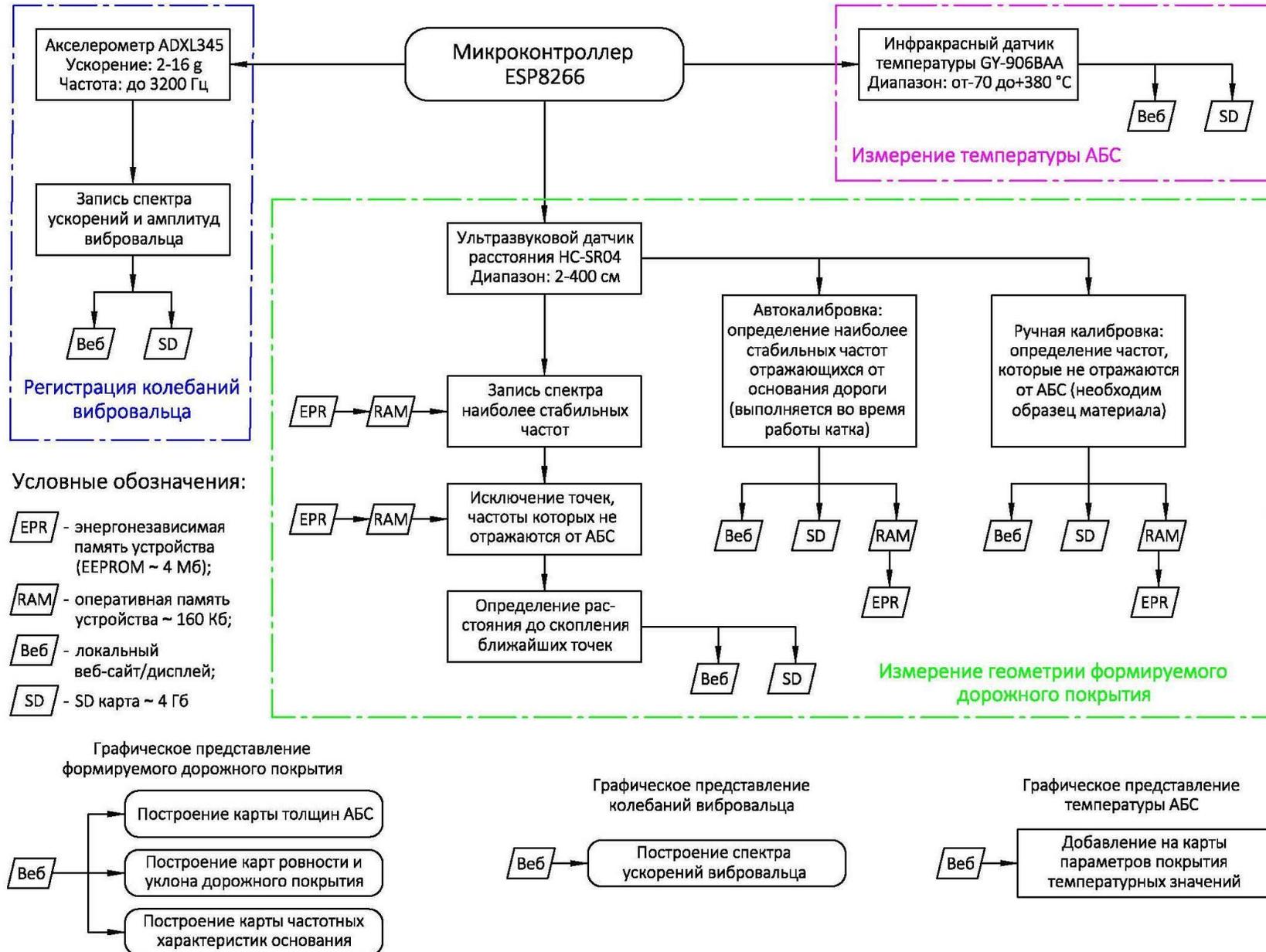


Рисунок 12 – Блок-схема системы автоматизированного контроля

В целях визуализации процесса уплотнения предлагается информационная модель в формате мобильного приложения для платформы Android с возможностью графического отображения измеряемых параметров в виде двумерных карт состояний (рисунок 13).

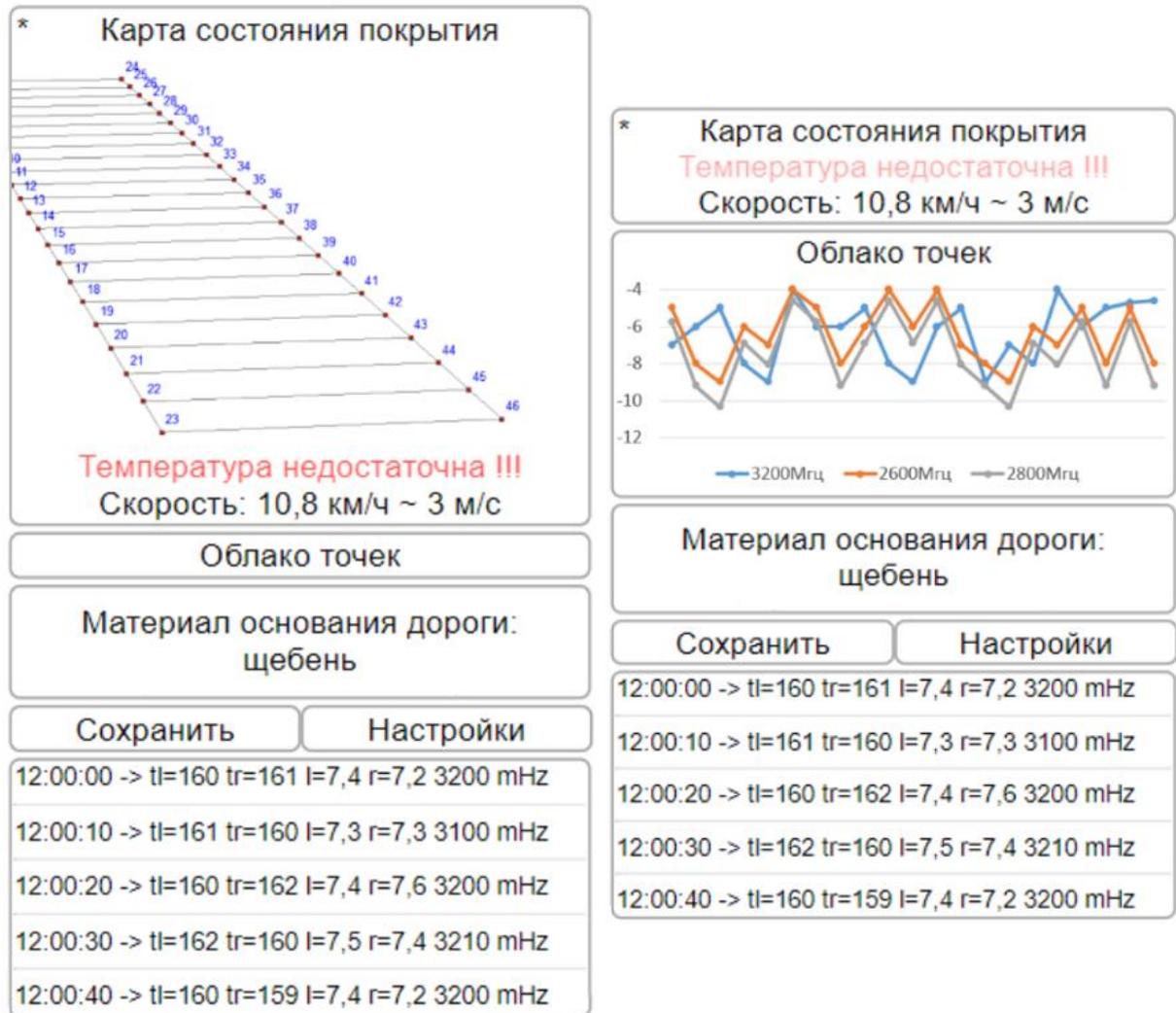


Рисунок 13 – Информационная модель уплотнения в виде двумерных карт состояний

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);

- создание буфера данных в энергонезависимой памяти платы и методов сверки с отправленным буфером при потере соединения;
- формирование значений частоты вибрации;
- 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).

## **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.

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

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в изданиях базы Scopus*

1. Perebeynos, D.I. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller (2021) / Emelyanov R. T., Prokopev A. P., Vasiliev Y. V., Perebeynos D. I., Novruzov V. S. // Journal of Physics: Conference Series. 1889. 042059. 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.

### *Статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК*

2. Перебейнос, Д.И. 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.

3. Перебейнос, Д.И. Метод теплового контроля температурной сегрегации асфальтобетона / Д. И. Перебейнос, А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов, Н. А. Ткаченко // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12. – № 1. – С. 18.

4. Перебейнос, Д.И. Моделирование системы «вибрационный валец – уплотняемый асфальтобетон» / Д. И. Перебейнос // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2022/7903](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2022/7903).

### *Программы для ЭВМ*

5. Перебейнос, Д.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017610494 Российская Федерация. Программа модели процесса уплотнения смеси асфальтовым вибрационным катком : № 2016662294 : заявл. 16.11.2016 : опубл. 12.01.2017 / А. П. Прокопьев, В. И. Иванчура, Р. Т. Емельянов, Д. И. Перебейнос ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (СФУ).

6. Перебейнос, Д.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017610547 Российская Федерация. Программа моделирования процесса уплотнения смеси асфальтовым катком с учетом числа проходов : № 2016662618 : заявл. 18.11.2016 : опубл. 12.01.2017 / А. П. Прокопьев, В. И. Иванчура, Р. Т. Емельянов, Д. И. Перебейнос ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (СФУ).

7. Перебейнос, Д.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017610749 Российская Федерация. Программа моделирования рабочего процесса асфальтового катка с осциллирующим вальцом : № 2016662524 : заявл. 18.11.2016 : опубл. 17.01.2017 / А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов, Д. И. Перебейнос ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (СФУ).

8. Перебейнос, Д.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669601 Российская Федерация. Программа функционирования информационно-измерительного комплекса неразрушающего контроля параметров процесса уплотнения асфальтобетона : № 2022668071 : заявл. 04.10.2022 : опубл. 21.10.2022 / Д. И. Перебейнос, Р. Т. Емельянов, А. П. Прокопьев, Н. А. Ткаченко, А. Е. Потапов ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (СФУ).

*Участие в конференциях и работы в других изданиях*

9. Перебейнос, Д.И. 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.

10. Перебейнос, Д.И. Имитационная модель рабочего процесса асфальтового катка / А. П. Прокопьев, В. И. Иванчура, Р. Т. Емельянов, Д. И. Перебейнос // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2016. – № 12(94). – С. 372-377.

11. Перебейнос, Д. И. Моделирование в пространстве состояний вибрационного уплотнителя / Д. И. Перебейнос, В. Л. Сабинин, А. П. Прокопьев // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – № 1-2(71). – С. 116-118.

12. Перебейнос, Д. И. Информационная система сопровождения при эксплуатации дорожных катков / Д. И. Перебейнос. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2022. — № 29 (424). — С. 22-24.