

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи

Набижанов Жасурбек Ильхомович

**НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
УПЛОТНЕНИЯ ПРИ УКЛАДКЕ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

Специальность 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Иванчура
Владимир Иванович

Красноярск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ, МОДЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ	13
1.1 Методы неразрушающих технологий контроля уплотнения	15
1.2 Методы непрерывного контроля уплотнения	17
1.3 Методы непрерывного контроля уплотнения на основе искусственного интеллекта.....	21
1.4 Модели процессов взаимодействия рабочих органов асфальтоукладчиков и дорожных материалов	24
1.5 Нейросетевые технологии	26
1.6 Цель и задачи исследования	34
2 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ И ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ РАБОЧИМ ОРГАНОМ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКА	36
2.1 Математическая модель функционирования системы «рабочий орган асфальтоукладчика – дорожный материал».....	38
2.2 Моделирование рабочего процесса асфальтоукладчика при уплотнении дорожных материалов	45
2.3 Выводы.....	51
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ НЕЙРОСЕТЕВОГО КОНТРОЛЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УПЛОТНЕНИЕМ ДОРОЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКАМИ.....	53
3.1 Разработка нового метода непрерывного нейросетевого контроля уплотнения асфальтобетонных смесей для асфальтоукладчиков.....	54
3.1.1 Система прогнозирования качества уплотнения асфальтобетонных смесей для асфальтоукладчиков	58

3.1.2 Метод непрерывного анализа уплотнения асфальтобетонных смесей для асфальтоукладчиков	70
3.2 Разработка нейросетевого управления уплотнением асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками	80
3.3 Выводы	91
4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ УПЛОТНЕНИЕМ ДЛЯ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОВ	93
4.1 Выводы	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	106
Приложение А	121
Приложение Б	122
Приложение В	123
Приложение Г	124
Приложение Д	125
Приложение Е	132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Общая протяженность автомобильных дорог в Российской Федерации (РФ) достигает более 1.7 миллиона км, из них более 1,5 миллиона км дорог с твердым покрытием (РОССТАТ, 2018г). Эти дороги являются важной частью транспортной сети и играют жизненно важную роль во всех аспектах человеческой деятельности, от экономики до национальной безопасности РФ [96]. На капитальный ремонт и содержание федеральных автомобильных дорог общего пользования в федеральном бюджете на 2018 год заложено 293,87 млрд рублей, в 2019 и 2020 годах превысило 300 млрд рублей. Более 20 млрд рублей ежегодно предусмотрено на содействие развитию автомобильных дорог регионального, межмуниципального и местного назначения (рисунок 1) [129].



Рисунок 1. Стоимость капитального ремонта, ремонта и содержания дорог I-IV категорий в РФ

В аналитической записке, подготовленной Российской академией народного хозяйства и государственной службы (РАНХиГС) для правительства РФ в 2016 году, указано что около 70% федеральных дорог требуют проведения ремонтных работ, до 40% дорожно-транспортных происшествий (ДТП) происходит на участках дорог, «не соответствующих режимам движения». В режиме значительных перегрузок находятся

4 тыс. км федеральных дорог, более 50% этих дорог нуждаются в усилении дорожной одежды, а на 40% необходимо выполнить работы по обеспечению необходимого коэффициента сцепления колеса автомобиля с дорогой. Сеть отечественных автомагистралей отстает в своем развитии от мирового уровня на 20-30 лет [140].

Стоит отметить, что, по данным экспертов, самые опасные дороги в РФ находятся в Челябинской области и Красноярском крае (рисунок 2).



Рисунок 2. Индекс безопасности дорог в РФ

Неудовлетворительное качество дорог возглавляет список транспортных проблем, на которые жалуются граждане РФ исходя из опроса «Левада-Центра» за 2017 год (рисунок 3) [145].



Рисунок 3. Результаты опроса «Левада-центра»

По данным Всемирного экономического форума (World Economic forum), за 2019 год по качеству автомобильных дорог РФ занимает 99 место из 138 стран. На первом месте находится Сингапур, далее расположились европейские страны (таблица 1) [141].

Таблица 1. Индекс качества автомобильных дорог

№	Страна	Индекс
1	Сингапур	90,9
2	Нидерланды	90,5
3	Швейцария	88
...
99	Россия	41,3

Этапы строительства дорожного покрытия, в основном это: производство материала, транспортирование смеси до объекта, распределение на участке, укладка и уплотнение смеси, значительно влияют на качественные показатели автомобильной дороги. Если оптимизировать уплотнение асфальтобетонной смеси на начальном этапе строительства дороги асфальтоукладчиком и, на завершающем этапе – катками, то можно сократить до 50% дефектов дорожных покрытий и продлить их эксплуатацию [97]. То есть, за счет обеспечения высокого качества уплотнения можно значительно улучшить эксплуатационные показатели асфальтобетонных покрытий [41, 101, 102, 104, 109, 107, 132, 146].

На завершающем этапе строительства дорожных покрытий применяется комплект машин – асфальтоукладчик, звено дорожных катков. За счет применения современных асфальтоукладчиков, при оптимальной настройке режимных параметров рабочих органов, можно получить значения коэффициента уплотнения смеси 0,96 и выше [30, 31, 33, 61, 62]. Это позволяет решить многие проблемы дорожных покрытий, повысить производительность и уменьшить стоимость строительства, за счет сокращения количества и типов дорожных катков, обеспечения оптимальных условий

уплотнения в рабочем диапазоне температуры смесей. Оптимальная настройка режимов работы укладчика возможна только с учетом текущей информации о коэффициенте уплотнения. Приборы позволяющие определять в реальном времени степень уплотнения смеси рабочим органом укладчика отсутствуют. Необходима разработка таких приборов, которые обеспечивают реализацию неразрушающих технологий контроля качества уплотнения асфальтобетонных смесей. Для повышения эффективности использования асфальтоукладчиков актуальна научная задача разработки системы автоматического управления уплотнением асфальтобетонной смеси.

Асфальтоукладчик – сложная линейная дорожно-строительная машина, которая во время работы выполняет несколько технологических операций. Режимы уплотнения асфальтоукладчика изменяются машинистом вручную, причем оптимальная настройка возможна только с учетом текущей информации о коэффициенте уплотнения [144].

Применяемые методы контроля качества, разрушающие и неразрушающие, обеспечивают оценку качества уплотнения в отдельных тестовых точках дорожного покрытия и обычно покрывают менее 1% всей площади.

Известны разработанные зарубежными учеными технологии Intelligent Compaction (IC), Continuous Compaction Control (CCC) [6, 59], которые основаны на измерении ускорения вибрации вальца, спектрального преобразования и расчете показателя измерения уплотнения [6, 25, 29, 36, 38, 59, 82, 86]. В РФ нет информации о внедрении подобных систем, но исследования в этом направлении проводятся [101, 102, 104, 146]. Системы не информируют пользователей о достигнутом коэффициенте уплотнения, но позволяют определить момент перехода катка на другую полосу дорожного покрытия. Имеются значительные недостатки технологий IC и CCC из-за погрешностей измерений [86, 98]. Системы разработаны для использования на вибрационных катках зарубежного производства. Стоимость технических средств автоматизации систем достигает 1 млн руб. – 2 млн руб., что составляет более 50% стоимости дорожных катков российского производства. Для асфальтоукладчиков такие системы контроля и управления отсутствуют [98].

Таким образом, исследование и разработка новых автоматических систем контроля и управления уплотнением асфальтобетонных смесей для асфальтоукладчиков является актуальной научной и производственной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Современные разработки в сфере автоматизации технологических процессов уплотнения дорожных материалов, функционирующие на базе сигналов акселерометров, реализованы в автоматических системах интеллектуального уплотнения (Intelligent Compaction, IC) и непрерывного контроля уплотнения (Continuous Compaction Control, CCC). Исследования в этой области представлены работами зарубежных ученых: D. Adam, R. Al-Zahrani, R. Anderegg, J.L. Briaud, G. Chang, C. Commuri, D.J. White, G. Xu и др. Авторами выполнены экспериментальные исследования систем IC/CCC в полевых условиях, разработаны математические модели, идентификация параметров и показателей измерения интеллектуального уплотнения (Intelligent Compaction Measurement Value, ICMV). В результатах исследований отмечаются значительные погрешности показателей уплотнения дорожных материалов.

Исследования систем непрерывного контроля уплотнения для вибрационных катков представлены в работах отечественных ученых: В.Б. Пермякова, В.П. Ложечко, А.А. Шестопалова, А.В. Захаренко, О.И. Максимычева, Г.В. Кустарева, И.С. Тюремнова, А. С. Морева и др. В работах А.В. Захаренко, Г.В. Кустарева и др. рассмотрены отдельные задачи создания системы контроля коэффициента уплотнения для асфальтоукладчиков.

Несмотря на определенные достигнутые в процессе проведенных научно-технических исследований успехи, существует ряд нерешенных проблем. К ним следует отнести исследования в сфере неразрушающих технологий непрерывного контроля и автоматического управления уплотнением дорожных материалов в процессе их укладки, разработку новых и модифицированных математических моделей рабочих процессов уплотнения, позволяющих использовать их для создания виртуальных стендов компьютерного моделирования процессов объектов автоматизации.

Диссертационное исследование направлено на реализацию предложенного способа непрерывного нейросетевого контроля и управления уплотнением в процессе укладки асфальтобетонных смесей (заявки на полезную модель №№2021119587, 2021119588 от 02.07.2021 г.). Предложенный способ связан с использованием искусственных нейронных сетей для прогнозирования коэффициента уплотнения и управления процессом уплотнения асфальтобетонных смесей при укладке дорожных покрытий, что позволяет в определенной степени решить вышеуказанные проблемы.

Объектом исследования является процесс управления уплотнением асфальтобетонных смесей при укладке дорожного покрытия с использованием метода нейросетевого прогнозирования коэффициента уплотнения.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы обработки сигналов в системах непрерывного контроля и управления уплотнением в процессе укладки асфальтобетонных смесей с использованием метода нейросетевого прогнозирования коэффициента уплотнения.

Целью работы является повышение производительности процесса уплотнения дорожных покрытий за счет нейросетевой системы управления коэффициентом уплотнения асфальтобетонных смесей.

Задачи исследования:

1) Анализ методов, моделей и технологий неразрушающего контроля и управления уплотнением дорожных материалов. Предложить технические решения по усовершенствованию системы управления процессом уплотнения при укладке асфальтобетонных смесей.

2) Построение математической и имитационной моделей процесса уплотнения асфальтобетонной смеси рабочим органом асфальтоукладчика.

3) Разработка методов непрерывного нейросетевого анализатора уплотнения асфальтобетонных смесей в процессе их укладки.

4) Разработка нейросетевой системы управления уплотнением в процессе укладки асфальтобетонных смесей.

5) Разработка алгоритмического и аппаратно-программного обеспечения нейросетевой системы контроля и управления уплотнением для асфальтоукладчиков.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использованы теория автоматического управления, методы математической статистики, математического моделирования и машинного обучения, теория планирования эксперимента, а также тематические научные работы. Численное решение задач выполнено на основе методов математического и компьютерного моделирования в программной среде MATLAB/Simulink.

Научной новизной обладают следующие результаты исследования:

- получена модифицированная имитационная модель процесса уплотнения асфальтобетонной смеси рабочими органами укладчиков, отличающаяся от известных определением значений усилия в толкателе трамбуемого бруса и спектров вертикального ускорения вибрационной плиты, позволяющая определять влияние рабочих параметров асфальтоукладчика на физико-механические свойства дорожных материалов (п. 3);
- разработан метод непрерывного анализа уплотнения асфальтобетонных смесей на основе нейронных сетей, отличающийся учетом усилия в толкателе трамбуемого бруса, позволяющий определять коэффициент уплотнения (п. 2);
- разработана система прогнозирования качества уплотнения при укладке асфальтобетонных смесей, отличающаяся от известных учетом усилия в толкателе трамбуемого бруса и вертикального ускорения колебаний вибрационной плиты укладчика, позволяющая прогнозировать коэффициент уплотнения в режиме реального времени (п. 2);
- разработан новый метод нейросетевого управления уплотнением в процессе укладки асфальтобетонных смесей, отличающийся от известных возможностью автоматически регулировать величину коэффициента уплотнения, позволяющий автоматизировать управление процессом уплотнения (п. 2).

Теоретическая значимость. Разработанный метод нейросетевого контроля и управления процессом уплотнения асфальтобетонных смесей позволяет определять и регулировать коэффициент уплотнения в режиме реального времени.

Практическая значимость. Диссертационное исследование внедрено в производственную деятельность компании ООО «ЦИЕС» (г. Красноярск).

Поддержанно грантом РФФИ № 19-37-90052 в конкурсе «Аспиранты».

Разработан программный модуль – симулятор взаимодействия рабочего органа укладчика с асфальтобетонной смесью (свидетельство №2021661469), а также программный модуль нейросетевого прогнозирования коэффициента уплотнения дорожных материалов для укладчика (свидетельство ЭВМ №2021661554).

Математическая и имитационная модели и результаты создания интеллектуальной системы контроля и управления процессом уплотнения смеси укладчиком используются студентами в учебном процессе СФУ для исследования влияния динамических и режимных параметров асфальтоукладчиков на физико-механические свойства дорожных материалов.

Положения выносимые на защиту:

– Модифицированная имитационная модель процесса уплотнения асфальтобетонной смеси рабочими органами укладчиков позволяет определять влияние рабочих параметров асфальтоукладчика на физико-механические свойства дорожных материалов.

– Новый метод нейросетевого анализатора уплотнения в процессе укладки асфальтобетонных смесей позволяет прогнозировать коэффициент уплотнения в режиме реального времени.

– Система прогнозирования качества уплотнения асфальтобетонных смесей позволяет прогнозировать коэффициент уплотнения в режиме реального времени.

– Нейросетевая система управления процессом уплотнения при укладке асфальтобетонных смесей позволяет регулировать величину коэффициента уплотнения.

Степень достоверности результатов диссертационного исследования подтверждена корреляцией с фундаментальными положениями теории уплотнения дорожных материалов; применением экспериментально доказанных зависимостей коэффициента уплотнения асфальтобетонных смесей от режимных параметров укладчика; использованием современных вычислительных методов, методов планирования эксперимента и соответствующего программного обеспечения;

качественным и количественным согласованием полученных результатов исследования с экспериментальными данными.

Апробация результатов работы. Основные теоретические положения и результаты диссертационной работы представлены на международных конференциях: «СYBERPHУ», г. Санкт-Петербург, 2019 г.; «Математические Методы в Технике и Технологиях – ММТТ-32», г. Санкт-Петербург, 2019 г.; «Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг – «APITECH», г. Красноярск, 2019 г.; «SIBIRCON», г. Новосибирск, 2019 г.; «СYBERPHУ», г. Казань, 2020 г. «APITECH» г. Красноярск, 2020; «СYBERPHУ», г. Санкт-Петербург, 2021 г.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 43 работах, в том числе: 3 статьи в редакции журналов, рекомендованных ВАК; 14 статей в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus; 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ; 2 заявки на полезные модели; 19 публикаций в сборниках международных научных конференций.

Личный вклад автора. Проведен анализ процесса уплотнения асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками. Разработаны модели систем нейросетевого непрерывного контроля уплотнения для прогнозирования коэффициента уплотнения. Разработана модель системы нейросетевого управления уплотнением в процессе укладки. Разработано программное обеспечение для математического моделирования процесса уплотнения и нейросетевой системы управления уплотнением.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из 144 страниц машинописного текста, а также включает в себя введение, 4 главы, заключение, список литературы и 6 приложений. В работе представлено 62 рисунка, 10 таблиц и 49 формул.

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность профессору д-ру техн. наук В.И. Иванчуре, доценту канд. техн. наук А.П. Прокопьеву и профессору д-ру техн. наук Р.Т. Емельянову за большое влияние на формирование научных взглядов, за поддержку и внимание к диссертационной работе.

1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ, МОДЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Долгосрочные характеристики асфальтобетонного покрытия в значительной степени зависят от его способности выдерживать автомобильное движение без ухудшения качества. Следовательно, конструкция покрытия должна иметь достаточную плотность, чтобы выдерживать нагрузку. Недоуплотненные дорожные покрытия приводят к преждевременному износу. Существуют разные методы контроля качества уплотнения.

Технология строительства (рисунок 4) автомобильных дорог включает: подготовительные работы, транспортирование и укладку дорожных материалов, уплотнение покрытий. Процесс начинается с установки разметки объекта. От назначения и уровня испытываемых нагрузок определяется состав покрытия и толщина смеси [143].



а)

б)

Рисунок 4. Технология строительства: а) - самосвал и асфальтоукладчик; б) –
дорожные катки разных типов

Существуют 2 основных подхода укладки дорожных покрытий: холодная и горячая. Холодной укладкой пользуются при ремонте автомобильных дорог. Дорожное

покрытие приобретает прочность за счет сжатия. Технология горячей укладки применяется во время строительства новой дороги или основательного ремонта. Укладка смеси должна производиться в горячем виде. Грузовики самосвалы доставляют готовую асфальтобетонную смесь на объект. Объем доставки горячего асфальта на объект зависит от типа грузовика и может варьироваться от 7 до 20 тонн. Из 1 тонны горячей смеси получается в среднем 10 кв.м. асфальтобетонного покрытия толщиной 4 см. Рекомендуемые параметры для объектов строительства дороги при учете температуры воздуха приведены в таблице 2 [89].

Таблица 2. Рекомендуемые параметры полосы при учете температуры воздуха

Длина полосы уплотнения, м		
Температура воздуха, С	Одним асфальтоукладчиком	Двумя асфальтоукладчиками
5-10	25-40	60-70
10-15	40-60	70-80
15-20	60-80	80-100
20-25	80-100	100-150
Более 25	100-150	150-200

Температура смеси на начальном этапе уплотнения должна быть не менее 120 С. Доставленную смесь выгружают в приемный бункер укладчика и пластинчатый питатель подает ее к шнеку, распределяющему смесь по ширине укладываемой полосы. Смесь уплотняется трамбуемым брусом асфальтоукладчика и выравнивается выглаживающей плитой, доуплотнение осуществляется катками легкого, среднего и тяжелого типа (рисунок 5) [88].



Рисунок 5. Технологическая схема уплотнения асфальтобетонной смеси

Процесс уплотнения дорожных материалов состоит в накапливании остаточных деформаций, т.е в начале уплотнения деформации весьма значительные и состоят из вертикальных смещений частиц друг от друга. Когда усилие давления вальца превосходит прочность сдвига жидкой фазы, силы трения и сцепления в их контактных зонах, то появляются смещения. Вязкость и сдвиговая прочность, температура, скорость деформирования, толщина смеси влияют на сопротивление деформированию [99].

1.1 Методы неразрушающих технологий контроля уплотнения

С целью проверить объект безопасным, экономичным и надёжным способом, не нанося ущерба, применяются технологии неразрушающего контроля качества уплотнения.

К данному типу методов можно отнести использование портативных приборов – измерителей плотности асфальтобетонных покрытий. Подобные приборы основываются на принципе фиксации изменений взаимодействия собственного электромагнитного поля катушки с электромагнитным полем вихревых токов, создаваемых этой катушкой в подконтрольной поверхности. Данный метод измерения определяет соотношение диэлектрических свойств асфальтобетона с его плотностью при различных показателях температуры. Однако, есть много факторов, которые влияют на погрешность измерений:

- толщина и температура асфальтобетонного покрытия;
- присутствие поверхностной и структурной влаги;
- геометрия и однородность поверхности слоя.

Для более быстрого контроля качества уплотнения асфальтобетона используется динамический конусный плотномер (Dynamic Cone Penetration, DCP) с соответствующим наконечником (рисунок 6). Прибор устанавливают перпендикулярно к поверхности и выполняют проникновение, подсчитывая число ударов, необходимых для полного погружения конуса в поверхность дорожного покрытия. Расчет коэффициента уплотнения выполняется на основании не менее трех проникновений на участке по среднему арифметическому значению числа ударов. Расстояние между точками составляет от 20 до 30 см [9].

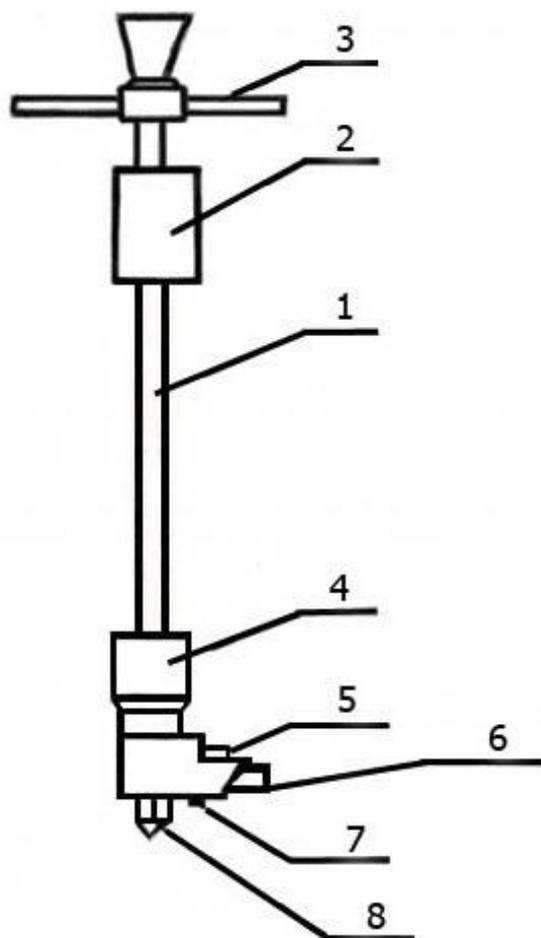


Рисунок 6. Схема динамического плотнмера. 1 – штанга; 2 – рукоятка; 3 – гиря; 4 – наковальня; 5 – ограничитель; 6 – затвор; 7 – фиксатор

Радиоизотопный плотномер (Nuclear density gauge, NDG) – один из высокоточных методов контроля плотности асфальтобетонных покрытий. NDG-

приборы основаны на взаимодействии гамма-излучения и вещества для измерения плотности, такие приборы обеспечивают проведение измерений с погрешностью не более ± 2 %. Чтобы снизить увеличение погрешности при проведении контроля плотности, необходимо использовать термостойкую и теплоизолирующую прокладку (пенопласт, фторопласт и т.д.), для того чтобы температура поверхности не превышала 40 °С. Главный недостаток радиоизотопных приборов это обязательный контроль радиационной безопасности. Для работы с такими приборами требуется специальная лицензия. Операторы обязаны носить дозиметры и регулярно посещать курсы техники безопасности [9].

При оценивании качества уплотнения дорожного полотна и подстилающего слоя также применяется метод сравнения плотности части асфальта с плотностью того же асфальта, полученной в лаборатории. Коэффициент уплотнения является результатом сравнения. Такой метод контроля качества уплотнения предполагает обязательный отбор образцов асфальта, тщательное взвешивание, установление влажности грунта при высушивании в течение 5-8 часов, уплотнение высушенного и предварительно измельченного образца в приборе стандартного уплотнения. В результате коэффициент уплотнения будет определен минимум через сутки, когда уже затруднительно или уже невозможно изменить качество уплотнения асфальтобетонного покрытия [9].

Одним из основных ограничений этих традиционных методов контроля качества как асфальта, так и слоев земляного полотна является то, что это методы точечных испытаний, которые обычно покрывают менее 1% всей площади покрытия и не оценивают все покрытие. Испытания также занимают много времени и могут проводиться только после уплотнения. Следовательно, существует острая необходимость в разработке альтернативных методов контроля качества, которые могут обеспечить точные оценки качества всего покрытия в реальном времени.

1.2 Методы непрерывного контроля уплотнения

Для того, чтобы покрыть 100% площади уплотняемого дорожного покрытия, на вибрационный каток устанавливают системы непрерывного контроля уплотнения

асфальтобетона [110]. Это способствует получению карты распределения плотности, что позволяет выявлять недоуплотненные участки, а также формировать автоматически отчет о проделываемой работе. На сегодняшний день широкое использование обрели системы уплотнения с непрерывным контролем, основанные на показателях уплотнения типа *CMV* и *RMV*.

Показатель степени уплотнения *CMV*. На данный момент показатель *CMV* является самым распространенным. В начале 1970-х годов ряд исследований был направлен на то, чтобы выяснить возможно ли измерять уплотнение мгновенно и непрерывно. Для этих целей уплотняющий каток был оснащен трёхкомпонентными акселерометрами, за ним следовал миникаток, который фиксировал вибрации, исходящие от уплотняющего катка. Также, в грунт был установлен сейсмограф для фиксации его колебаний (рисунок 7) [23].

На катках показатель степени уплотнения *CMV* замеряется с помощью акселерометра, который устанавливается на вибровалец. Акселерометр определяет ускорение вибровальца в момент отскока от уплотняемого материала – чем материал жестче, тем больше ускорение отскока. Датчик создает сигнал, который далее обрабатывается с помощью электронной системы.

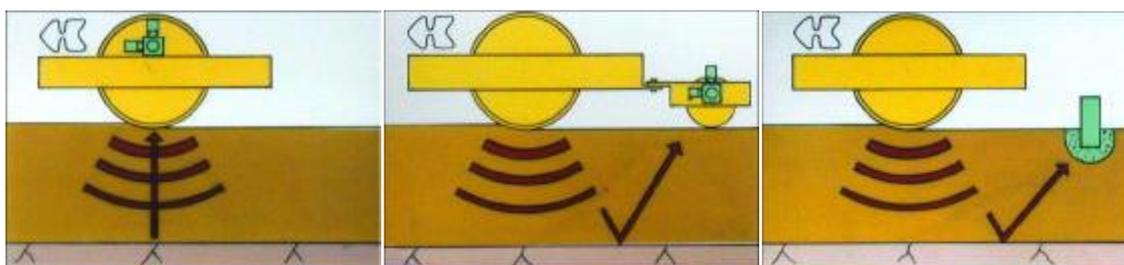


Рисунок 7. Тестовое фиксирование колебаний

Показатель степени уплотнения вычисляется на основе анализа спектра вертикальных ускорений вибрирующего вальца за два цикла вибрации:

$$CMV = C \frac{A_{2f}}{A_f} \quad (1)$$

где A_f - амплитуда вертикального ускорения вальца с частотой f , м/с²; A_{2f} - амплитуда с двойной частотой $2f$ м/с²; C – эмпирический коэффициент, корректируемый при тарировке (часто равный 300). [147]

Согласно компании Geodynamics, показатель CMV в данной точке указывает среднее значение по площади, ширина которой равна ширине барабана, а длина равна расстоянию, которое ролик проходит за 0,5 секунды. Очевидно, что фактически показатель CMV будет варьироваться от вальца к вальцу и что параметры вальца, особенно частота, должны поддерживаться равнозначными и постоянными параметрами, применяемыми в процессе калибровки. Но унифицированный валец, работающий в определенных условиях, также может применяться как средство оценки плотности покрытия. Основные преимущества использования вальца, как измерительного прибора, заключаются в достижении полного охвата области и получения результата немедленно [23].

При расчёте резонансного показателя уплотнения RMV, который также называется BV (Bouncing Value), также применяется анализ спектра вертикальных ускорений вибровальца вибрационного катка. Вычисляется это показатель по формуле:

$$RMV = BV = C \frac{A_{0,5f}}{A_f} \quad (2)$$

где $A_{0,5f}$ – амплитуда вертикального ускорения вибрирующего вальца с частотой $0,5f$, м/с² [23].

Индикатор RMV мониторит переход вибровальца из режима частичного отрыва (кратность колебаний 1) в режим «двойного отскока» (кратность колебаний от 2 и более). Оба режима поведения влияют на любой показатель измерителя уплотнения и, более того, будут способствовать снижению эффективности уплотнения, падению управляемости, а также возрастанию нагрузок на подшипники и узлы крепления вибровальца к раме катка. [23].

Контрольное значение уплотнения (CCV). Sakai представила систему IC под названием Compaction Information System (CIS). В этой системе CCV используется как индикатор жесткости покрытия. Основная идея метода заключается в том, что по мере

увеличения жесткости покрытия валец отскакивает при вибрации и теряет контакт с материалом [11]. Значение CCV является безразмерным и выражается по следующей формуле:

$$CCV = \left[\frac{A_{0.5\Omega} + A_{1.5\Omega} + A_{2\Omega} + A_{2.5\Omega} + A_{3\Omega}}{A_{0.5\Omega} + A_{\Omega}} \right] \cdot 100 \quad (3)$$

где A_{Ω} – значение амплитудного спектра основной частоты колебаний; $A_{N\Omega}$ – амплитуда N-й гармоники.

Как ранее было отмечено, непрерывное управление уплотнением, ССС, основано на использовании измерителя уплотнения, т. е. плотнометра, либо сопоставимых измерителей уплотнения [23, 147]. Значение измерителя уплотнения сохраняется и отображается на ЖК-дисплее. На дисплее оператор катка может видеть положение катка в зоне уплотнения, а также индикаторы скорости катка и частоты вибрации колебаний вальца. В дополнение к графическому изображению результат уплотнения также представлен в виде цифровых значений для каждого прохода и полосы. Наблюдение за циферблатом CMV покажет оператору катка, какого значения CMV он достиг прямо под вальцом катка. Сравнивая это значение CMV с рекомендуемым или откалиброванным минимальным значением CMV , оператор может видеть, где он закончил свою работу по уплотнению и где необходимы дополнительные проходы (рисунок 8). Основным инструментом для ССС является система документации по уплотнению. Такая система предоставляет всю соответствующую и необходимую информацию оператору катка, помогая ему в оптимальном выполнении его работы по уплотнению. Чтобы метод ССС эффективно использовался, требуется определенный уровень образования и квалификации подрядчика в отношении эксплуатации оборудования, обработки сгенерированной документации, а также организованного использования полученного опыта.

Главная цель ССС заключается в достижении однородности результата уплотнения за минимальное время. Достижение однородности означает сведение к

минимуму недоуплотненных, либо чрезмерно уплотненных участков дорожного покрытия и, следовательно, достижения минимальных затрат на ремонт и техобслуживание.

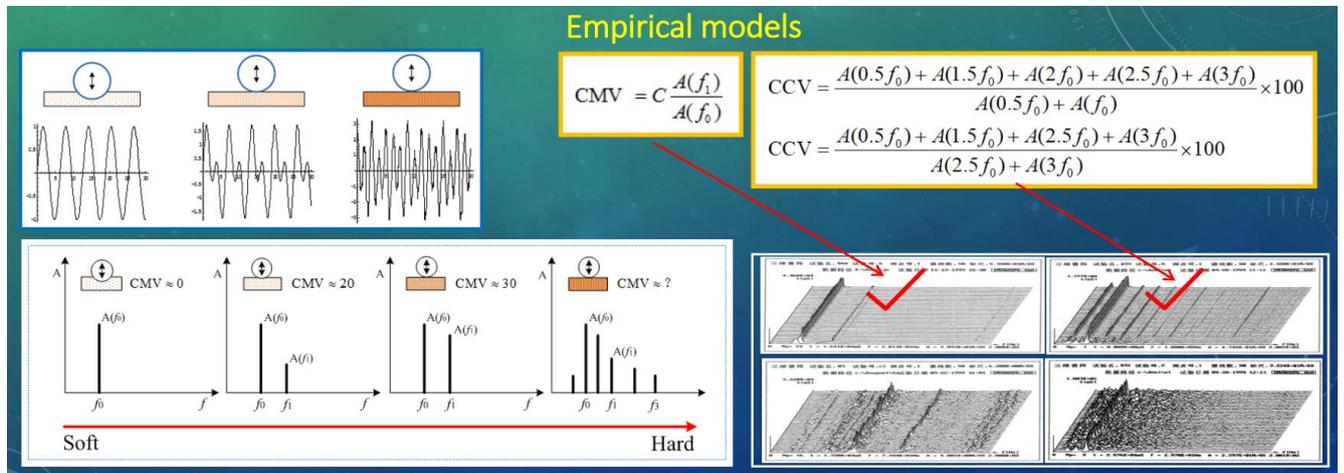


Рисунок 8. Непрерывное уплотнение на основе расчета показателей уплотнения CMV и CCV

Преимуществами данных систем являются относительная простота измерительной системы, алгоритм обработки показаний индикаторов, экономия времени и сокращение расходов [26, 42]. Однако вышеописанные системы имеют серьезный недостаток: обрабатывая спектр вертикального ускорения вибротальца они определяют косвенные показатели, а не прочностные свойства покрытия. В то время, как важной задачей процесса уплотнения является обеспечение прочности асфальтобетона. Поэтому почти сразу начался поиск альтернативных методов для обеспечения непрерывного контроля уплотнения асфальтобетона.

1.3 Методы непрерывного контроля уплотнения на основе искусственного интеллекта

Проблема раннего разрушения дорожного слоя остается несмотря на постоянное совершенствование технологий строительства асфальтобетонных покрытий. Недостаточное уплотнение асфальтобетонной смеси является одним из

главных факторов раннего разрушения дорожного покрытия [102, 104, 108, 146]. Фактор возникает, когда плотность слоя не достигает желаемого результата, что впоследствии приводит к выбоинам, трещинам, волнообразованиям и другим видам разрушений.

Таким образом, при строительстве основания и дорожного покрытия важнейшей технологической операцией считается процесс уплотнения дорожно-строительных материалов (рисунок 9). Это подтверждается результатами многочисленных научных исследований, опытом строительства и эксплуатации автомобильных дорог [23, 99, 147].

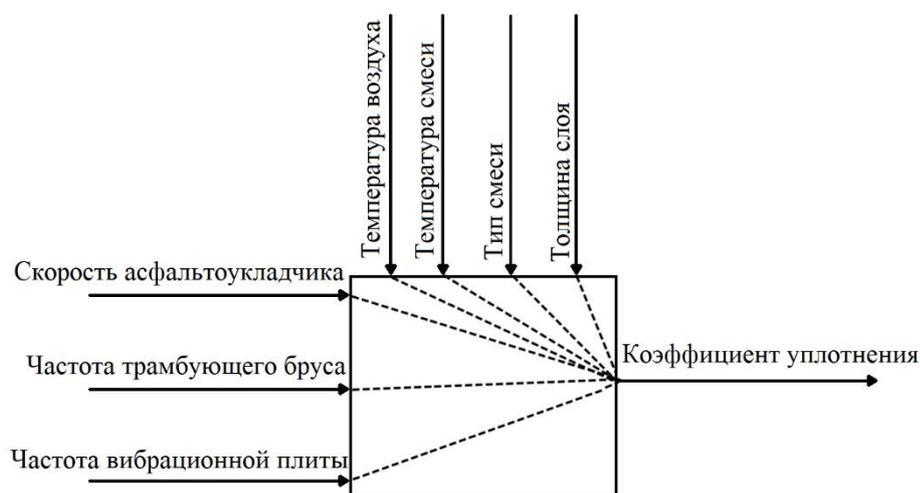


Рисунок 9. Технологическая схема уплотнения АБ смеси

Высокая эффективность уплотнения материалов обеспечивается дорожными катками, оснащенными приборами интеллектуального уплотнения ИС [26], непрерывного контроля уплотнения ССС [13]. Идея технологии ССС, разработанная учеными Соединенных Штатов, основывается на использовании ИНС, которая определяет плотность слоя непрерывно в режиме реального времени. Таким образом, получается избежать недоуплотнения или переуплотнения дорожного покрытия. Основой метода ССС является теория о том, что виброкаток и уплотняемая среда создают целостную колебательную систему, обладающую отличительными характеристиками [12]. Увеличение жесткости смеси происходит

за счет уплотнения, что влечет за собой изменение характеристик колебаний вальца дорожного катка. Сведения о характеристиках амплитуды спектров ускорения вальца катка, а также об уплотняемой смеси можно использовать чтобы оценить жесткость асфальтобетонного дорожного покрытия. Новые гармоники и субгармоники появляются в спектре, когда возрастает амплитуда колебаний вибрационного вальца из-за увеличения плотности смеси.

Ведущие производители средств автоматизации предлагают системы, обеспечивающие измерение показателей интеллектуального уплотнения и контроль параметров рабочего процесса.

Система Ammann Compaction Expert (ACE) была разработана компанией Ammann. Это измерительная и регулирующая система для вибрационных катков и плит. Интеллектуальная система ACE измеряет амплитуду, частоту и скорость движения катка автоматически [142]. В основу работы ACE заложено динамическое измерение нагрузочной способности, а также жесткости покрытия, которое производится одновременно с движением катка. Система вычисляет жесткость покрытия k_b единожды за цикл вибрации. Интеллектуальное уплотнение включает в себя вибрационный каток с контроллером технологии, которая выбирает оптимальные параметры для уплотнения.

$$k_b = 4\pi^2 f^2 \left[m_d + \frac{m_e r_e \cos \varphi}{a} \right] \quad (4)$$

где f – частота возбуждения; m и r – эксцентриковый массовый момент; φ – задержка фазы между эксцентриковой силой и смещением вальца; a – амплитуда колебаний вальца

Intelligent Asphalt Compaction Analyzer (IACA) – устройство, которое измеряет состояние уплотнения асфальтобетона в процессе уплотнения и формирует карту уплотнения, предоставляя ее оператору катка в режиме реального времени (рисунок 10). Таким образом, оператор катка может регистрировать неуплотнённые участки и сразу принять меры к их устранению [12].

Автоматизированные системы уплотнения фирмы Ingersoll-Rand активно применяются на современных дорожно-строительных машинах, среди которых:

- Система High Frequency Automatic имеет автоматическую надстройку оптимальной частоты колебаний вальца для всех восьми амплитуд, имеющих на катке.
- Smart Control Propulsion System основана на автоконтроле скорости катка для удержания установленного расстояния между ударными импульсами и ударного пространства.
- Smart Vibration System – система включения вибрации заднего вальца с задержкой на 2-3 секунды от ее включения на переднем вальце. Это позволяет избежать повреждения холодного асфальтобетона.



Рисунок 10. Принцип работы IACA

1.4 Модели процессов взаимодействия рабочих органов асфальтоукладчиков и дорожных материалов

Асфальтоукладчик – дорожно-строительная машина, используемая для распределения и предварительной укладки асфальтобетонных смесей при строительстве дорожных покрытий.

Асфальтоукладчик отличается высокой сложностью конструкции, а также хорошей уплотняющей способностью и надежностью. Выделяют два типа: по ширине укладки и по типу ходовой части. Гусеничные асфальтоукладчики показывают более высокую производительность и эффективность. Такой тип ходовой части актуален на объектах с большой площадью, где требуется равномерное и прочное покрытие участков: междугородные шоссе, дорожное покрытие аэропортов и прочее. Именно гусеничные асфальтоукладчики с широким захватом (от трех метров) позволяют получать широкие, бесшовные полосы. Колесные асфальтоукладчики не используются при строительстве широких полос, так как спроектированы для узкого захвата (от 1 до 2,5 м). Такой тип асфальтоукладчика чаще используется при строительстве городских, поселковых дорог.

К основным агрегатам асфальтоукладчика относятся [106]:

1. Приемный бункер – сюда загружается асфальтобетонная смесь.
2. Питатель – через него смесь подается к шнековой камере.
3. Распределительные шнеки – используются для равномерного распределения асфальтобетонной смеси.
4. Нагреватель – предназначен для предотвращения налипания смеси на рабочие органы.
5. Рабочий орган – элемент, который воздействует на смесь, выполняющий процесс уплотнения.

Основными элементами рабочих органов являются выглаживающая плита и трамбуемый брус. Предварительное уплотнение смеси выполняется трамбуемым брусом, частота и амплитуда его колебаний влияют на эффективность работы. На российских асфальтоукладчиках величина амплитуды варьируется от 3,2 до 8 мм. Выбирать амплитуду необходимо исходя из уровня толщины укладываемого слоя: чем толще слой, тем больше амплитуда, и наоборот [142]. Чтобы обеспечить качественное строительство асфальтобетонного покрытия необходимо выполнять регулировку положения трамбуемого бруса в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В горизонтальной плоскости производится регулировка зазора между

ножом трамбуемого бруса и торцом плиты: в пределах от 0,5 до 1,0 мм.

Выглаживающая плита производит уплотняющее воздействие на смесь и отделяет поверхность укладываемого слоя. Выглаживающая плита может быть статической или вибрационной [106]. Если рабочая скорость асфальтоукладчика менее 5 м/мин, то необходимо применять статическую выглаживающую плиту. Если этот показатель скорости превышает, то следует использовать виброплиту, чтобы избежать разрывов на поверхности укладываемого слоя. Основание плиты должно быть такой же температуры, как и асфальтобетонная смесь. Иначе смесь будет липнуть к основанию плиты и деформироваться. Для этого на выглаживающую плиту устанавливаются нагреватели. Как только будет достигнута нужная температура нагреватели отключаются.

Асфальтобетонная смесь из кузова транспортного средства выгружается в приемный бункер. Питатели подают смесь из бункера на дорожное полотно. Положение заслонки регулирует количество поступающей из бункера смеси. Затем на дорожном полотне смесь распределяется, уплотняется и выравнивается трамбуемым брусом и выглаживающей плитой. Толщина слоя асфальтобетонной смеси регулируется с помощью поднятия или опускания края выглаживающей плиты. Чтобы изменить ширину возводимой полосы используются расширители распределительных шнеков, выглаживающая плита и трамбуемый брус.

В асфальтоукладчиках устанавливается система авторегулирования, которая обеспечивает регулирование и контроль поперечного уклона поверхности и продольного профиля возводимого покрытия.

1.5 Нейросетевые технологии

Существует множество методов и моделей прогнозирования и определения качества уплотнения дорожного полотна. Одним из наиболее известных методов прогнозирования являются нейронные сети.

Нейронная сеть состоит из искусственных нейронов, аналогичные с нейронами головного мозга (рисунок 11). Через синапсы в клетку попадают

входные сигналы, а через нервные окончания выводится выходной сигнал с помощью аксона [90, 91].

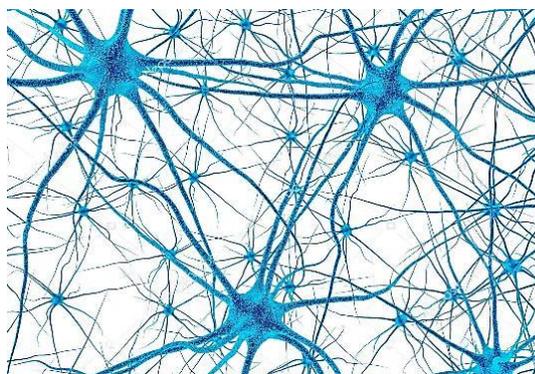


Рисунок 11. Представление нейрона мозга

Передача нервного импульса между двумя клетками происходит с помощью нейромедиаторов (выделение химических субстанций). Численные коэффициенты (веса) присваиваются для каждого входа клетки. Данные веса прямо пропорциональны количеству нейромедиатора на соответствующем синапсе. Синаптические веса – это натуральные числа, которые принимают и положительное (возбуждающее действие на клетку), и отрицательные значения (тормозящее действие) [91].

Вследствие попадания импульсов на синапсы происходит определенное электрическое возбуждение клетки. Клетка самостоятельно возвращается в исходное состояние, а на ее выходе данные изменения не регистрируются, в случае если отклонение от состояния электрического равновесия невелико. В таком случае считается, что уровень возбуждения клетки был ниже порогового. Если сумма всех торможений или возбуждений превзошла пороговый показатель возбуждения нейрона, тогда значение выходного сигнала, который аксон посылает на другие нейроны, начинает лавинообразно нарастать. Степень превышения порогового значения не влияет на данный сигнал [91].

В модели ИНС существуют 3 основных слоя:

– входной слой (все входные данные подаются в модель через данный слой). Входной слой взаимодействует с внешней средой. Его задача —

взаимодействовать со всеми входами. Данный слой передает информацию на первый скрытый слой. Количество нейронов на входном слое обычно совпадает с количеством входных данных;

- скрытые слои, применяются для обработки входов, полученных от входного слоя. Скрытый слой — это коллекция нейронов, к которым применена функция активации;

- количество нейронов на выходном слое, совпадает с требуемым количеством значений в желаемом диапазоне [128]. В результате связь между слоями искусственной нейронной сети можно представить, как показано на рисунке 12.

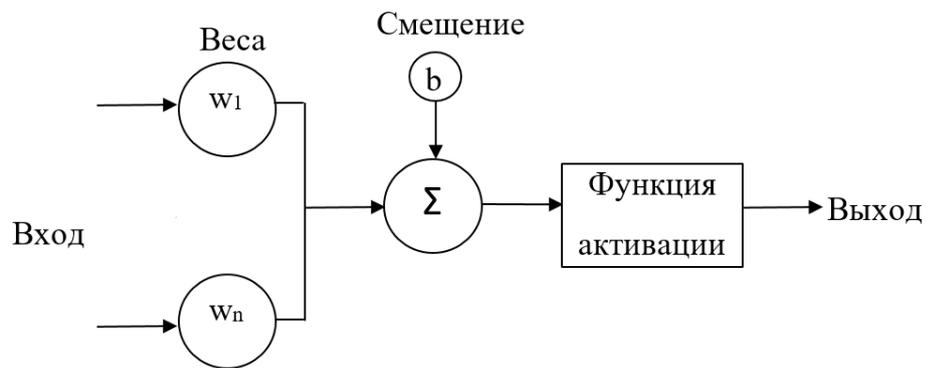


Рисунок 12. Модель нейрона

При прогнозировании коэффициента уплотнения с использованием ИНС возможно моделирование нелинейной зависимости входных данных между собой. Структура сети и функция активации определяют нелинейную зависимость [46].

Способность к обучению и обобщению приобретенных знаний является важнейшим свойством ИНС. Признаки, способные отличать образы и различные значения друг от друга, и составляющие базу для принятия решения о распределении результатов в соответствующие классы, определяются в процессе обучения. Если нейронная сеть хорошо обучена, тогда она будет малочувствительна к незначительным изменениям входных данных.

Нейронные сети также могут быть классифицированы по методу обучения. Обучение нейронной сети с учителем — это процесс, при котором производится

представление сети выборки обучающих примеров. Пример направляется на вход сети, далее он обрабатывается внутри сети, определяется выходной сигнал, который сравнивается со значением целевого вектора. После определения ошибки, изменяются весовые коэффициенты связей внутри сети, с учетом выбранного алгоритма [93, 125, 128]. При обучении нейронной сети без учителя происходит подстройка весов синапсов так, чтобы получались согласованные выходные векторы, для того чтобы предоставление близких входных векторов выдавали одинаковые выходы. При обучении с подкреплением нейронные сети получают нужные данные из взаимодействия с окружающей средой, при этом данные сети адаптивны. Во время контакта с определённой областью, используя разнообразные действия, сеть переходит в новое состояние. Исходя из этого агент получает числовое вознаграждение, которое может быть, как положительным, так и отрицательным, это решается из определенных правил, и, если установить неоптимальный набор правил, тогда нужного результата либо будет сложно достичь, либо вообще не получить [46].

Группа ученых из Китая, под руководством Вэйдон Ц., провела исследование, чтобы найти простой и удобный способ оценки степени уплотнения в реальном времени для контроля качества уплотнения (таблица 3). В своем исследовании они разработали классификатор ИНС для выявления различных характерных моделей вибрации вальца и их классификации в соответствии с различными уровнями уплотнения. Ими были выделены четыре целевых класса для классификации уровней уплотнения [37, 79].

Таблица 3. Целевые классы и уровни уплотнения

	Уровень	Степень уплотнения	Целевой массив
Целевой класс 1	1	<94	(1,0,0,0)
Целевой класс 2	2	94-96	(0,1,0,0)
Целевой класс 3	3	96-98	(0,0,1,0)
Целевой класс 4	4	>98	(0,0,0,1)

Для исследования была использована многослойная нейронная сеть. Сеть включает в себя один входной слой, два скрытых слоя, а также один выходной слой (Рисунок 13). На входной слой поступает значение массивов в количестве 500 данных. Первый и второй скрытые слои состоят из 44 и 10 нейронов. Выходной слой состоит из 4 нейронов, представляющих 4 класса уплотнения [79].

В своей работа Вэйдон Ц. использовал метод масштабируемых сопряженных градиентов для обучения сети. Метод масштабируемых сопряженных градиентов может обучать любую сеть, если ее весовые, входные и активационные функции имеют производные функции. Обратное распространение используется для вычисления производных функции потерь по весам [47].

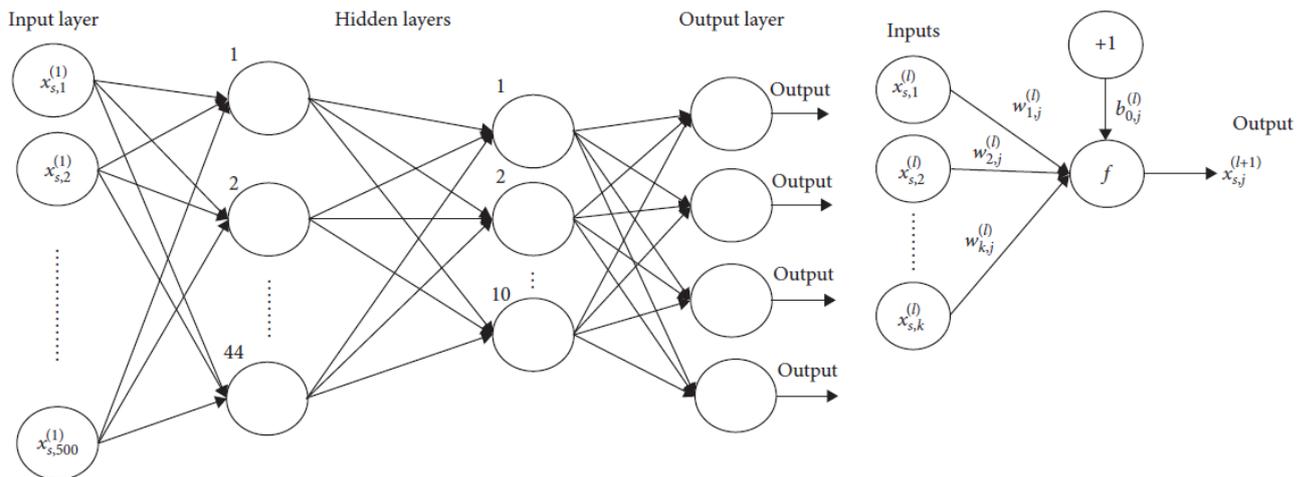


Рисунок 13. Архитектура многослойной нейронной сети и схема нейрона

Каждый нейрон на выходе рассчитывается по функции:

$$x_{s,j}^{l+1} = f\left(\sum_{i=1}^k x_{s,j}^l w_{i,j}^l + b_{0,j}^l\right) \quad (5)$$

Хорошие обучающие характеристики сети можно увидеть на рисунке 14. Объединяя метод обработки сигналов и модель нейронной сети, можно получить классификатор, как показано на рисунке 15 [45].

Были использованы случайные 0,5-секундные сигналы из более длинных сигналов в качестве входного параметра для классификатора [83]. После ввода этого параметра классификатор отображает приблизительный уровень уплотнения. Выходная точность классификатора показана на рисунке 14. Исходя из полученных данных видно, что классификатор достаточно точен для оценки качества уплотнения в реальном времени.

Выходной слой	Целевой класс				
	1	2	3	4	
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%

(a)

Выходной слой	Целевой класс				
	1	2	3	4	
1	109 7.8%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100 0.0%
2	0 0.0%	325 23.3%	9 0.6%	6 0.4%	95.6% 4.4%
3	0 0.0%	11 0.8%	481 34.5%	20 1.4%	93.9% 6.1%
4	0 0.0%	8 0.6%	17 1.2%	407 29.2%	94.2% 5.8%
	100 0.0%	94.5% 5.5%	94.9% 5.1%	94.0% 6.0%	94.9% 5.1%

(b)

Рисунок 14. Матрица эффективности обучения

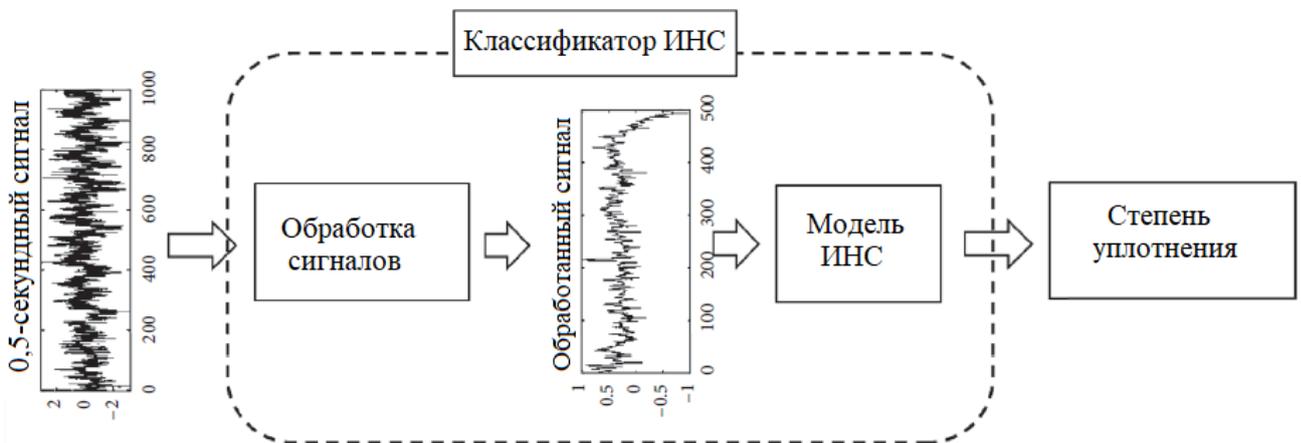


Рисунок 15. Классификатор искусственной нейронной сети

Коллектив во главе с профессором Imran также занимались разработкой классификатора на основе ИНС IACA [27]. Сеть, использованная в их исследовании, представляет собой многослойный персептрон с 74 входами. Содержание мощности, полученное из частотного спектра каждого сегментированного сигнала, выражается в виде вектора из 74 элементов. Каждый элемент вектора представляет мощность сигнала определенной полосы частот. Для использования в качестве входного сигнала выбирается мощность сигнала частот в диапазоне от нижней частоты возбуждения до свыше пятой гармоники частоты возбуждения. Сеть имеет входной слой, два скрытых слоя и выходной слой. Входной слой содержит 74 узла. Есть 15 и 7 узлов в первом и втором скрытых слоях и один узел в выходном слое (рисунок 16).

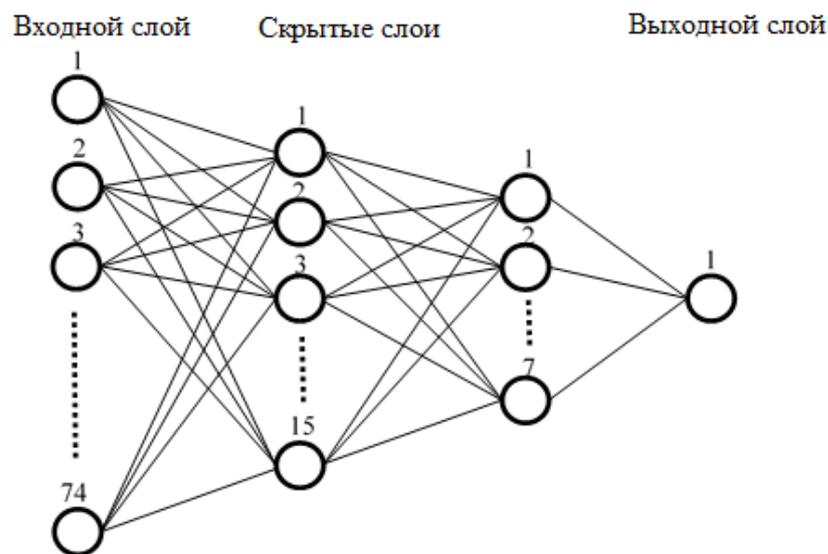


Рисунок 16. Строение ИНС, разработанной в исследовании Imran

Каждый нейрон на выходе рассчитывается по формуле:

$$x^{(k)} = f(z_i) = f(w_i'x^{(k)} + b_i) = f\left(\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j^{(k)} + b_i\right). \quad (6)$$

Используя классификатор IACA Imran выявили 4 уровня (рисунок 17) уплотнения, где уровень 0 – это уровень с наименьшей степенью уплотнения, а

уровень 4 – с самой наивысшей степенью уплотнения. Промежуточные уровни вибрации 2 и 3 получены путем линейной интерполяции максимальных и минимальных значений характеристик мощности [6, 7].

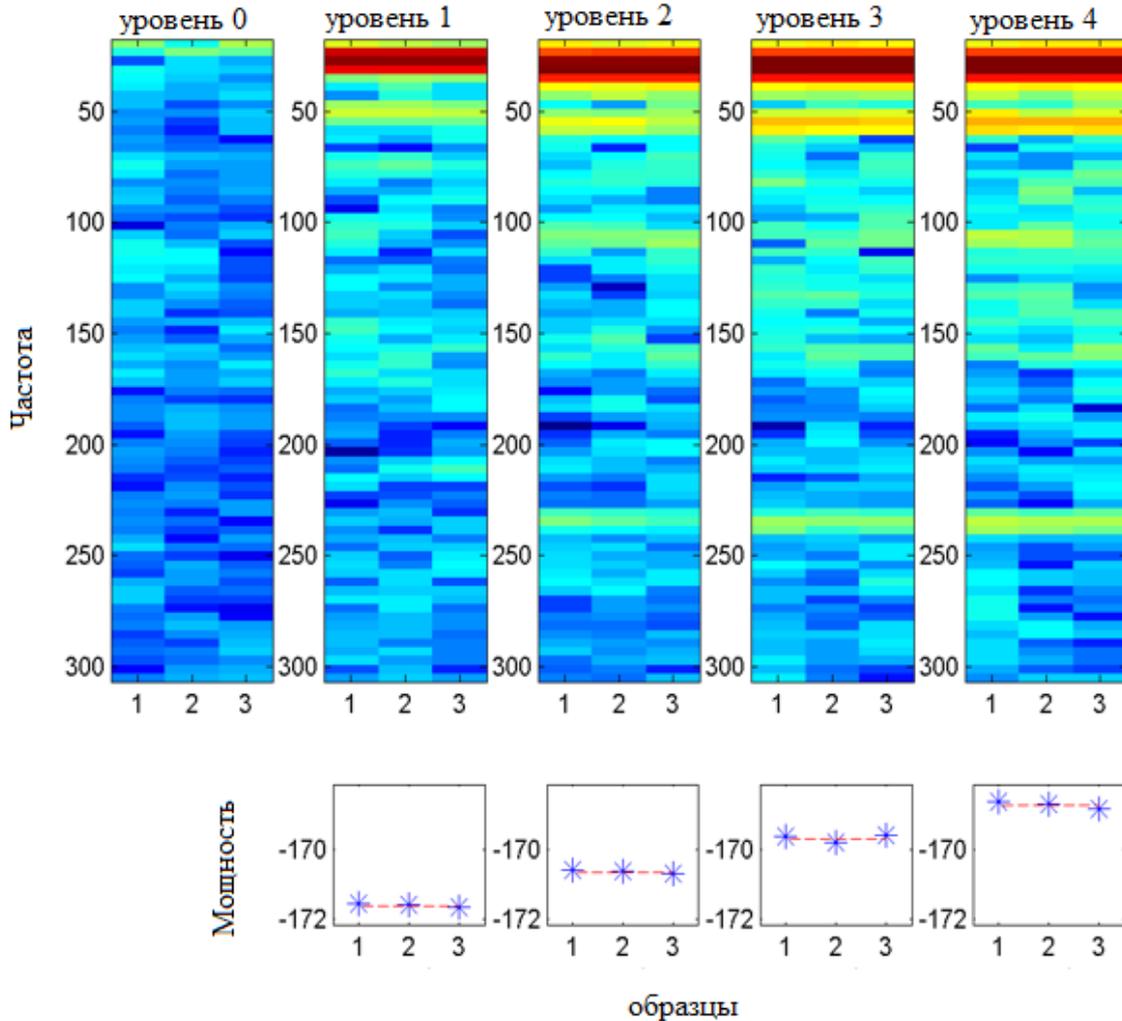


Рисунок 17. Спектральные характеристики, соответствующие пяти уровням уплотнения

Известные методы и средства контроля для катков, основанные на расчете показателей уплотнения по результатам спектрального анализа сигналов акселерометров, установленных на конструкции вибрационного вальца катка. Многими авторами установлена корреляционная зависимость ускорения вальца от характеристик асфальтобетонной смеси [2, 15, 17, 24, 27, 35, 39, 43, 49-54, 75, 80].

Исследования, посвященные проверке эффективности применения IC/ССС на вибрационных катка, показали, что существующие показатели (CCV, CMV,

RMV и др.) обладают значительной погрешностью и не позволяют оценить эффективность и качество процесса укатки. Это обусловлено тем, что существующие показатели уплотнения не учитывают переменные, оказывающие значительное влияние на уплотнение. Следовательно, разработка оперативного, постоянного и достоверного метода контроля эффективности укатки и характеристик уплотнения материала для получения нормативной плотности является задачей, которая требует решения.

На основе применения систем непрерывного контроля и управления уплотнения дорожных материалов с использованием технологий искусственного интеллекта, учитывающие информационные сигналы, оказывающие значительное влияние на качество уплотнения, можно значительно повысить эффективность технологического процесса строительства дорожного покрытия.

1.6 Цель и задачи исследования

Одной из актуальных проблем дорожного строительства, снижающей его производительность и экономическую эффективность, является контроль качества уплотнения. В процессе дорожного строительства выполняется точечный, выборочный неразрушающий контроль качества с применением приборов (экспресс-метод). Недостатком этого метода является отсутствие возможности осуществлять непрерывный контроль уплотнения. Требуется непрерывное и оперативное измерение уплотнения.

Целью диссертационной работы является повышение производительности процесса уплотнения дорожных покрытий за счет нейросетевой системы управления коэффициентом уплотнения асфальтобетонных смесей.

Для достижения поставленной цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Анализ методов, моделей и технологий неразрушающего контроля и управления уплотнением дорожных материалов. Предложить технические

решения по усовершенствованию системы управления процессом уплотнения при укладке асфальтобетонных смесей.

2) Построение математической и имитационной моделей процесса уплотнения асфальтобетонной смеси рабочим органом асфальтоукладчика.

3) Разработка методов непрерывного нейросетевого анализатора уплотнения асфальтобетонных смесей в процессе их укладки.

4) Разработка нейросетевой системы управления уплотнением в процессе укладки асфальтобетонных смесей.

5) Разработка алгоритмического и аппаратно-программного обеспечения нейросетевой системы контроля и управления уплотнением для асфальтоукладчиков.

2 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ И ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ РАБОЧИМ ОРГАНОМ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКА

Совершенствование систем автоматического управления (САУ) в дорожном строительстве происходит за счет внедрения информационного моделирования строительных объектов (концепция BIM-технологий). Прежде чем внедрить на реальных объектах, проектирование САУ подразумевает этап теоретического исследования, т.е. анализа и синтеза системы, компьютерного моделирования. Математическая модель исследуемого процесса как объекта управления (ОУ) необходима, чтобы реализовать этот этап.

Глава посвящена теоретическому исследованию процесса уплотнения асфальтобетонной смеси рабочими органами асфальтоукладчика с целью выявления параметров для непрерывного контроля коэффициента уплотнения. На текущий момент многие отечественные [95, 105, 130, 146, и др.] и зарубежные ученые [11, 19, 14, 76, 40, 78, 84] посвящают работы теоретическим исследованиям уплотнения различных дорожно-строительных материалов. Вычислительные трудности при исследовании динамических систем являются недостатками ранее сформулированных математических моделей исследуемых процессов.

Чтобы решить задачу оптимизации управления процессом дорожного строительства необходимо сократить количество факторов, воздействующих на технологический процесс уплотнения дорожного материала асфальтоукладчиком.

Предположим, что при строительстве дороги, укладка и уплотнение материала при определенных параметрических характеристиках являются основными компонентами, не смотря на качество производства и транспортировки смеси. Поэтому, чтобы получить требуемые значения коэффициента уплотнения дорожного покрытия, необходимо регулировать режимные параметры

асфальтоукладчика и разработать единую систему с дорожными катками. Решив вышеупомянутые задачи можно автоматизировать технологический процесс [137].

При правильном управлении режимными параметрами рабочих органов асфальтоукладчика можно получить качественный показатель уплотнения смеси, который может достигать желаемого значения. Это может существенно сократить количество типов катков для завершающей укатки и технологические приемы по уплотнению асфальтобетонных смесей. На данный момент, путем лабораторных работ определяют плотность асфальтобетона и чем выше показатель плотности, тем долговечнее дорожное покрытие. Зарубежные и отечественные авторы отмечают, что уплотняющая способность асфальтоукладчиков может достигать заданные значения коэффициента уплотнения за счет использования технологий непрерывного контроля и систем управления процессом уплотнения. Так как ручное управление данным процессом и точечный контроль малоэффективны и несут в себе большой объем работы и нагрузки на машиниста-оператора [130].

Определение асфальтоукладчика, как нелинейного дискретно-непрерывного динамического объекта управления представляет задачу, с которой сталкиваются разработчики управляемых систем такого класса. Закон управления рабочим процессом, учитывая показания датчиков, должен быть заранее рассчитан, основываясь на анализе математической модели динамики объекта управления – движения трамбуемого бруса и вибрационной плиты укладчика в возможных условиях и записан в контроллере.

Из анализа следует [130], что степень предварительного уплотнения разных асфальтобетонных смесей сильно зависит от изменения режимов работы асфальтоукладчика (режимные параметры работы трамбуемого бруса и плиты, скорость движения). Получены нелинейные зависимости коэффициента уплотнения от скорости движения, частоты трамбования, типа смеси. НПО «ВНИИСтройдормаш» провел достаточно объемные экспериментальные исследования уплотняющих рабочих органов. Данные исследования были проведены с помощью стенда-укладчика, оборудованном тензометрической аппаратурой, при уплотнении аналога песчаной асфальтобетонной смеси типа Д.

Вид полученных зависимостей – нелинейный. Результаты научных исследований Пермякова В.Б., Иванченко С.Н. и др. авторов [97, 98, 106] подтверждают нелинейность зависимостей коэффициента уплотнения от режимных параметров асфальтоукладчиков.

В работах Иванченко С.Н., Пермякова В.Б. и др. авторов, во время теоретических исследований и моделирований асфальтобетонные смеси считаются упруго-вязко-пластическим материалом, чьи свойства зависят от изменения скорости деформирования и уровня напряженного состояния в уплотняемом слое. Один цикл уплотнения асфальтоукладчика представляет собой несколько ударов трамбуемого бруса (при скорости 3,2 м/с и частоте трамбования 1300 с^{-1} – около 5 ударов на ударной части бруса размером 12 мм), после которых достигается требуемая степень уплотнения смеси асфальтоукладчиком. При постоянной скорости $V = \text{const}$, цикл уплотнения смеси характеризуется как одинаковый промежуток времени, за который в зависимости от частоты трамбования будет происходить несколько (4-6) ударов. САУ должна гарантировать заданную степень уплотнения за данный промежуток времени без оператора. К недостаткам данных распространённых методов моделирования уплотняемой среды, основанной на реологических моделях, относятся: их использование преимущественно для выявления показателей нагрузок в металлоконструкциях ДСМ, а также недоступность их применения в разработке алгоритмов автоматического управления рабочих процессов.

Математическая модель процесса уплотнения асфальтобетонной смеси рабочим органом асфальтоукладчика в модифицированном варианте предложена в данной работе, чтобы устранить вышеуказанные недостатки, а также повысить эффективность теоретического исследования ОУ [64, 66, 68].

2.1 Математическая модель функционирования системы «рабочий орган асфальтоукладчика – дорожный материал»

Повышение эффективности дорожного строительства является возможным

за счёт увеличения степени уплотнения асфальтобетонной смеси рабочими органами асфальтоукладчиков [67, 130, 134, 138, 139].

На основании исследований асфальтоукладчика, проведенных в реальных условиях эксплуатации, получены экспериментальные зависимости, позволяющие реализовать идею системы непрерывного неразрушающего контроля уплотнения для укладчиков [130].

Выполненные экспериментальные исследования дают возможность прийти к выводу о том, что существует зависимость коэффициента уплотнения от наибольшего усилия в толкателях трамбуемого бруса на заключительной ступени цикла уплотнения при нарастании сопротивления смеси деформированию (рисунок 18). Увеличение сопротивления смеси уплотнению происходит постепенно и достигает максимальную величину после 4-5 воздействий трамбуемым брусом.

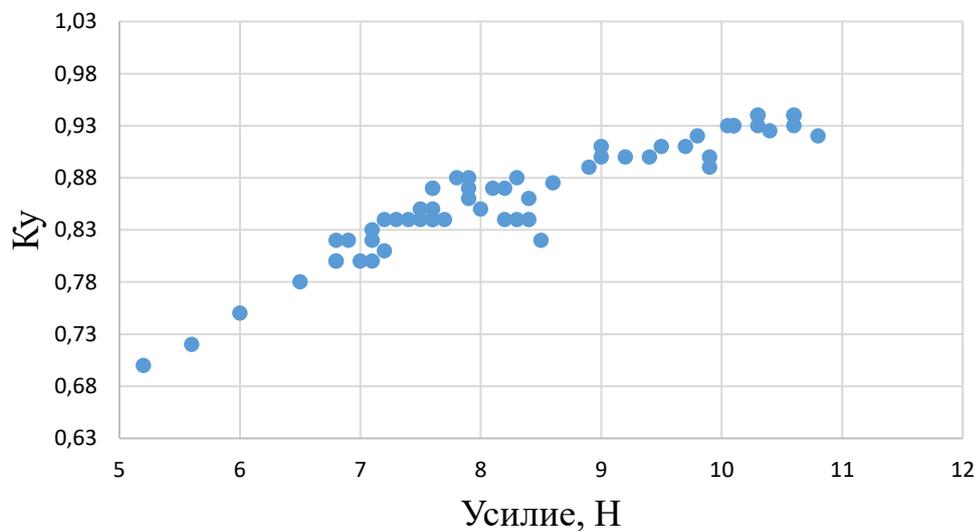


Рисунок 18. Зависимость коэффициента уплотнения от усилия в толкателе трамбуемого бруса

Известна работа [28], результатами которой являются зависимости ускорения трамбуемого бруса асфальтоукладчика от рабочих режимов. Катки, оборудованные системой непрерывного контроля уплотнения ССС, используют

данные об ускорении вибрационного вальца, на основе которых определяется показатель уплотнения. Для расчета показателя уплотнения используется спектральное преобразование Фурье [1, 60].

В данной работе объектом контроля является процесс уплотнения асфальтобетонной смеси асфальтоукладчиком. Основные рабочие органы асфальтоукладчика это трамбуемый брус и выглаживающие плиты (вибрационные, статические) и прессующие планки.

Теоретические исследования рабочего процесса асфальтоукладчиков проводились многими зарубежными и российскими учеными. Экспериментальные исследования асфальтоукладчиков в реальных условиях выполнялись небольшим количеством исследователей, что связано со значительными трудностями организации работ при укладке горячих асфальтобетонных смесей. Поэтому эффективным средством исследований и проектирования систем контроля (управления) являются методы математического моделирования [55].

Вычислительные трудности во время решения задач проектирования автоматизированных систем контроля управления являются недостатком ранее разработанных математических моделей. Применение методов пространства состояний, позволяющие выполнить четкую автоматизацию и формализацию вычислительных процедур [116, 117, 133], рекомендуется для улучшения эффективности теоретического исследования объекта контроля с использованием современного программного обеспечения

С помощью описания систем в пространстве состояний можно выявить и исследовать такие свойства, которые остались бы скрытыми во время применения классических методов частотного анализа и описания в терминах «вход-выход». Используемая в методе пространства состояний, матричная форма записи обладает бесспорным преимуществом при численном решении [63, 71].

Во время рабочего процесса происходит деформация смеси виброплитой и трамбуемым брусом с кинематическим приводом. Виброплита совершенствует структуру дорожного покрытия и закрепляет полученную степень уплотнения покрытия. Уплотнение смеси производится при постоянном контакте виброплиты

со смесью.

В процессе уплотнения значение амплитуды зависит от изменяющихся характеристик уплотняемого материала. Скорость, частота и ускорение являются динамическими параметрами рабочих органов асфальтоукладчика, соответственно, данные параметры необходимо регулировать в процессе уплотнения, учитывая изменяющиеся характеристики (реологические свойства) асфальтобетонной смеси [60].

В результате исследований [1] было определено, что во время уплотнения асфальтобетонная смесь накапливает остаточные деформации, и разработано правило при котором можно достичь максимальную производительность рабочих органов дорожно-строительного катка, а именно контактное давление σ_k рабочего органа асфальтоукладчика, образующееся в процессе уплотнения, должно находиться в диапазоне между пределом текучести уплотняемой среды σ_t и прочности $\sigma_{пр}$:

$$\sigma_t < \sigma_k \leq [\sigma_{пр}] ,$$

Математическая модель уплотнения смеси асфальтоукладчиком разработана с нижеуказанными допущениями:

- 1) Вибрационная плита работает в безударном режиме;
- 2) Асфальтобетонная смесь имеет свойства упругости и вязкости;
- 3) Учитываются вертикальные вибрации рабочих органов укладчика;
- 4) Уплотняемая среда обладает инерционными свойствами.

Расчетная схема модели динамической системы рабочего органа асфальтоукладчика показана на рисунке 19.

Теоретическое представление уплотнения асфальтобетонной смеси основано на упруго-вязкой модели Кельвина-Фойгта.

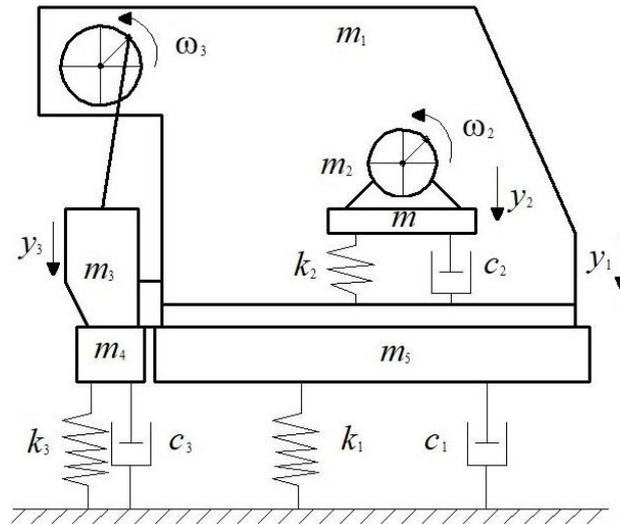


Рисунок 19. Расчетная схема модели процесса уплотнения смеси асфальтоукладчика

На схеме обозначены следующие элементы: m_1 , m_2 и m_3 – массы рабочих органов асфальтоукладчика (трамбуемый брус, вибрационная плита и вибрационный модуль соответственно) кг; m_4 , m_5 – масса асфальтобетонной смеси под трамбуемым брусом и виброплитой, кг; k_1 , k_2 и k_3 – коэффициенты упругого сопротивления уплотняемой смеси, виброплиты и смеси под трамбуемым брусом, Н/м; c_1 , c_2 и c_3 – коэффициенты демпфирования уплотняемой среды под плитой, виброплиты и смеси под трамбуемым брусом, Н с/м; y_1 , y_2 , y_3 – перемещение элементов системы, соответственно.

Математическая модель, отражающая и динамику колебаний элементов конструкции, и реологические свойства уплотняемой среды, составлена по итогам анализа процесса уплотнения смеси рабочим органом укладчика (рисунок 19). В результате получены дифференциальные уравнения динамической системы «трамбуемый брус-вибрационная плита-смесь».

Дифференциальное уравнение колебаний вибратора

$$m_2 \cdot \ddot{y}_2 - c_2 \cdot \dot{y}_1 + c_2 \cdot \dot{y}_2 - k_2 \cdot y_1 + k_2 \cdot y_2 = m \cdot r \cdot \omega_2^2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t), \quad (7)$$

где m – масса дебалансного вала, кг; r – радиус эксцентриситета дебалансного вала, м; ω_2 – угловая частота вращения дебалансного вала вибратора, рад/с, $\omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_2$; f_2 – частота колебаний вибратора, Гц; t – время, с.

Дифференциальное уравнение движения трамбуемого бруса:

$$(m_3 + m_4) \cdot \ddot{y}_3 + c_3 \cdot \dot{y}_3 + k_3 \cdot y_3 = F_3 + m_4 \cdot g, \quad (8)$$

где F_3 – F_5 – усилие толкателя трамбуемого бруса, Н.

Учитывая принципа относительного движения, получим дополнительное уравнение:

$$y_3 = y_1 + e \cdot \sin(\omega_3 \cdot t), \quad (9)$$

где e – радиус эксцентриситета привода трамбуемого бруса, м; ω_3 – угловая скорость вращения привода трамбуемого бруса, рад/с.

Подставляя уравнение (9) в (8) с преобразованиями, получим следующее уравнение:

$$F_3 = (m_3 + m_4) \cdot \ddot{y}_1 + c_3 \cdot \dot{y}_1 + k_3 \cdot y_1 - (m_3 + m_4) \cdot e \cdot \omega_3^2 \cdot \sin(\omega_3 \cdot t) + k_3 \cdot e \cdot \sin(\omega_3 \cdot t) + c_3 \cdot e \cdot \omega_3 \cdot \sin(\omega_3 \cdot t + \pi/2) - m_4 \cdot g. \quad (10)$$

Дифференциальное уравнение движения выглаживающей плиты

$$(m_1 + m_5) \cdot \ddot{y}_1 + (c_1 + c_2) \cdot \dot{y}_1 - c_2 \cdot \dot{y}_2 + (k_1 + k_2) \cdot y_2 - k_1 \cdot y_1 = -F_3 + (m_1 + m_5) \cdot g. \quad (11)$$

Переместив уравнение (9) в (10), получим следующее дифференциальное выражение

$$(m_1 + m_3 + m_4 + m_5) \cdot \ddot{y}_1 + (c_1 + c_2 + c_3) \cdot \dot{y}_1 - c_2 \cdot \dot{y}_2 + (k_1 + k_2 + k_3) \cdot y_1 - k_2 \cdot y_2 = ((m_3 + m_4) \cdot e \cdot \omega_3^2 - k_3 \cdot e) \cdot \sin(\omega_3 \cdot t) - c_3 \cdot e \cdot \omega_3 \cdot \sin(\omega_3 \cdot t + \pi/2) + (m_1 + m_4 + m_5) \cdot g. \quad (12)$$

Метод пространства состояний позволяет представлять систему управления в виде системы уравнений [94, 149]:

$$\dot{x}(t) = A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t); \quad (13)$$

$$y(t) = C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot u(t), \quad (14)$$

где $x(t) \in R^n$; $y(t) \in R^q$; $u(t) \in R^p$; $x(t)$ – вектор состояния, компонентами которого являются переменные состояния системы n -го порядка; $y(t)$ – вектор выхода, компонентами которого являются выходные переменные системы; $A(t)$ – матрица коэффициентов системы ($n \times n$); $B(t)$ – матрица входа ($r \times n$), где r – число воздействий; $u(t)$ – вектор входа, компонентами которого являются входные переменные системы; $C(t)$ – матрица выхода ($n \times p$), где p – число выходных величин; $D(t)$ – матрица обхода, определяющая прямую зависимость выхода от входа.

Система уравнений (7) – (12) приводится к следующему виду:

$$\ddot{y}_1 = \frac{1}{m_1 + m_3 + m_4 + m_5} \cdot \left[\begin{array}{l} -(c_1 + c_2 + c_3) \cdot \dot{y}_1 + c_2 \cdot \dot{y}_2 + (k_1 + k_2 + k_3) \cdot y_1 + k_2 \cdot y_2 + \\ + ((m_3 + m_4) \cdot e \cdot \omega_3^2 - k_3 \cdot e) \cdot \sin(\omega_3 \cdot t) + \\ + c_3 \cdot e \cdot \omega_3 \cdot \sin(\omega_3 \cdot t + \pi/2) + (m_1 + m_4 + m_5) \cdot g \end{array} \right]; \quad (15)$$

$$\ddot{y}_2 = \frac{1}{m_2} \cdot (c_2 \cdot \dot{y}_1 - c_2 \cdot \dot{y}_2 + k_2 \cdot y_1 - k_2 \cdot y_2 + m \cdot r \cdot \omega_2^2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t)).$$

Система уравнений (15) после преобразований с учетом принятых параметров состояния в форме Коши

$$\dot{z}_1 = z_2;$$

$$\dot{z}_2 = \frac{1}{m_1 + m_3 + m_4 + m_5} \cdot \left[\begin{array}{l} -(c_1 + c_2 + c_3) \cdot z_2 + c_2 \cdot z_4 + (k_1 + k_2 + k_3) \cdot z_1 + k_2 \cdot z_3 + \\ + ((m_3 + m_4) \cdot e \cdot \omega_3^2 - k_3 \cdot e) \cdot \sin(\omega_3 \cdot t) + \\ + c_3 \cdot e \cdot \omega_3 \cdot \sin(\omega_3 \cdot t + \pi/2) + (m_1 + m_4 + m_5) \cdot g \end{array} \right]; \quad (16)$$

$$\dot{z}_3 = z_4;$$

$$\dot{z}_4 = \frac{1}{m_2} \cdot (c_2 \cdot z_2 - c_2 \cdot z_4 + k_2 \cdot z_1 - k_2 \cdot z_3 + m \cdot r \cdot \omega_2^2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t)).$$

где z_1 – перемещение выглаживающей плиты, $z_1 = y_1$; z_2 – скорость движения выглаживающей плиты, $z_2 = \dot{y}_1$; z_3 – перемещение вибратора, $z_3 = y_2$; z_4 – скорость движения вибратора, $z_4 = \dot{y}_2$.

Путем преобразования данных параметров получены матрицы и векторы модели в пространстве состояний:

$$\dot{Z} = [\dot{z}_1 \quad \dot{z}_2 \quad \dot{z}_3 \quad \dot{z}_4]^T; Z = [z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z_4]^T;$$

матрица коэффициентов системы

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1+k_2+k_3}{m_1+m_3+m_4+m_5} & -\frac{c_1+c_2+c_3}{m_1+m_3+m_4+m_5} & \frac{k_2}{m_1+m_3+m_4+m_5} & \frac{c_2}{m_1+m_3+m_4+m_5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix};$$

матрицы: входа (B), выхода (C), обхода (D), вектор выхода (Y):

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m_1+m_3+m_4+m_5} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; Y = [y_1 \quad y_2]^T;$$

вектор входа (U)

$$U = \begin{bmatrix} ((m_3+m_4) \cdot e \cdot \omega_3^2 - k_3 \cdot e) \cdot \sin(\omega_3 \cdot t) - c_3 \cdot e \cdot \omega_3 \cdot \sin(\omega_3 \cdot t + \pi/2) + (m_4+m_5) \cdot g \\ m \cdot r \cdot \omega_2^2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) \end{bmatrix}.$$

2.2 Моделирование рабочего процесса асфальтоукладчика при уплотнении дорожных материалов

В программе MATLAB были выполнены вычисления чтобы оценить адекватность математической модели процесса. На рисунке 20 показана имитационная модель исследуемого процесса.

Значение коэффициента амортизаторов вибратора k_3 практически не меняется при изменении значения коэффициента уплотнения дорожного материала, поэтому при моделировании принято значение 0.85 МН/м.

Функцией коэффициента уплотнения дорожного покрытия являются коэффициенты упругого сопротивления уплотняемой смеси под выглаживающей виброплитой k_1 и под трамбующим брусом k_3 . При моделировании значения

коэффициентов в зависимости от коэффициента уплотнения K_y определялись по зависимости:

$$k_1 \cong 15.5444 \cdot K_y^9 \cdot 10^6 \quad (17)$$

$$k_3 \cong 33.0318 \cdot K_y^9 \cdot 10^5 \quad (18)$$

Моделирование проводилось с целью получения графиков ускорения вибрационной выглаживающей плиты, трамбуемого бруса и спектров виброускорения в процессе уплотнения дорожного покрытия рабочим органом асфальтоукладчика (рисунок 20).

Исходные данные из работы [28] были использованы чтобы смоделировать процесс:

$$k_1 = 15.5444 \cdot K_y^9 \cdot 10^6 \text{ Н/м}; k_2 = 1.1 \cdot 10^7 \text{ Н/м}; k_3 = 33.0318 \cdot K_y^9 \cdot 10^5 \text{ Н/м}; c_1 = 3200 \text{ Н} \cdot \text{с/м};$$

$$c_2 = 1800 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; c_3 = 1200 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; m = 21.6 \text{ кг}; m_1 = 682 \text{ кг}; m_2 = 80 \text{ кг}; m_3 = 71.3 \text{ кг};$$

$$m_4 = 0.1 \cdot m_3; m_5 = 0.2 \cdot m_1; r = 0,03 \text{ м}; e = 0,006 \text{ м}; f_2 = 20 \text{ Гц}; f_3 = 15 \text{ Гц}.$$

$$k_1 = 4 \cdot 10^6 \text{ Н/м}; k_2 = 1.1 \cdot 10^7 \text{ Н/м}; k_3 = 8.5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}; c_1 = 3200 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; c_2 = 1800 \text{ Н} \cdot \text{с/м};$$

$$c_3 = 1200 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; m = 21.6 \text{ кг}; m_1 = 682 \text{ кг}; m_2 = 80 \text{ кг}; m_3 = 71.3 \text{ кг}; m_4 = 0.1 \cdot m_3; m_5 = 0.2 \cdot m_1;$$

$$r = 0,03 \text{ м}; e = 0,006 \text{ м}; f_2 = 20 \text{ Гц}; f_3 = 15 \text{ Гц}.$$

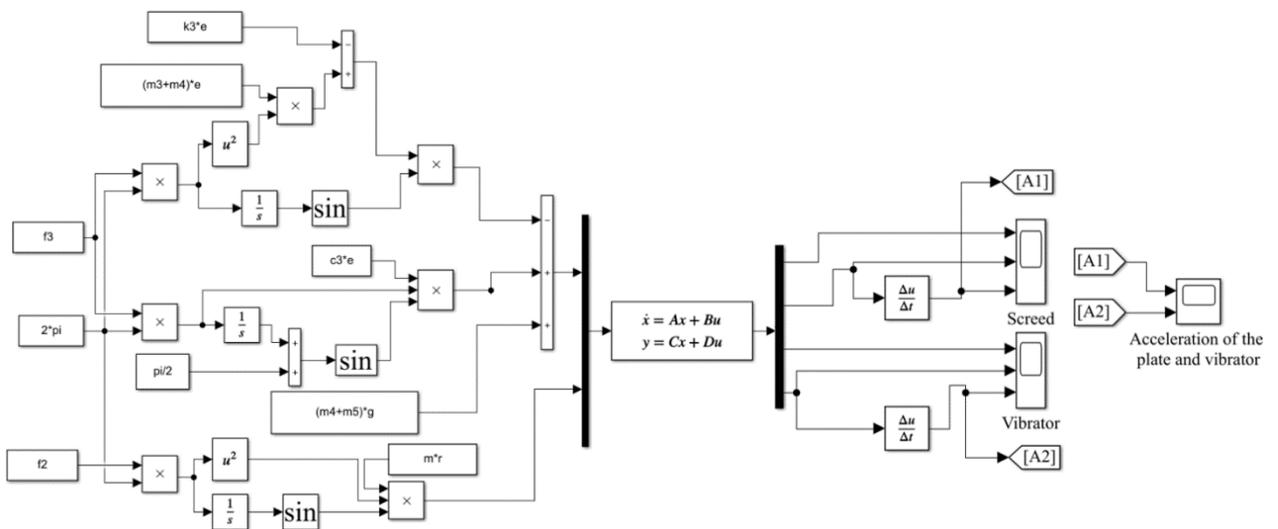


Рисунок 20. Имитационная модель исследуемого процесса на языке MATLAB/Simulink

Для расчетов был выбран тип смеси А – щебеночная при скорости движения асфальтоукладчика 1 м/мин. Параметры процесса уплотнения смеси рабочим органом асфальтоукладчика были получены по результатам компьютерного

моделирования: ускорения плиты и вибратора (рисунок 21).

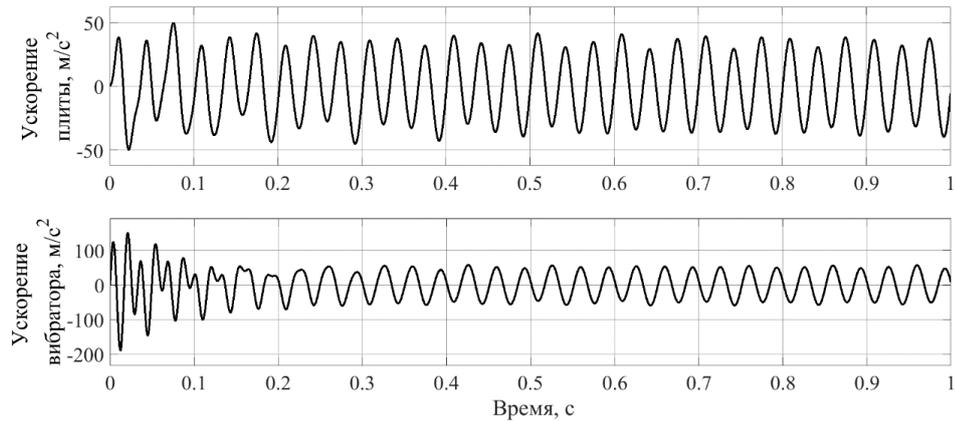


Рисунок 21. Временные зависимости ускорений

Результаты экспериментальных исследований укладчика с эффективным рабочим органом (два трамбуемых бруса, выглаживающая плита) в реальных условиях дорожного строительства [130] позволяют сделать вывод о наличии зависимости коэффициента уплотнения от максимального усилия в толкателях трамбуемого бруса (рисунок 23).

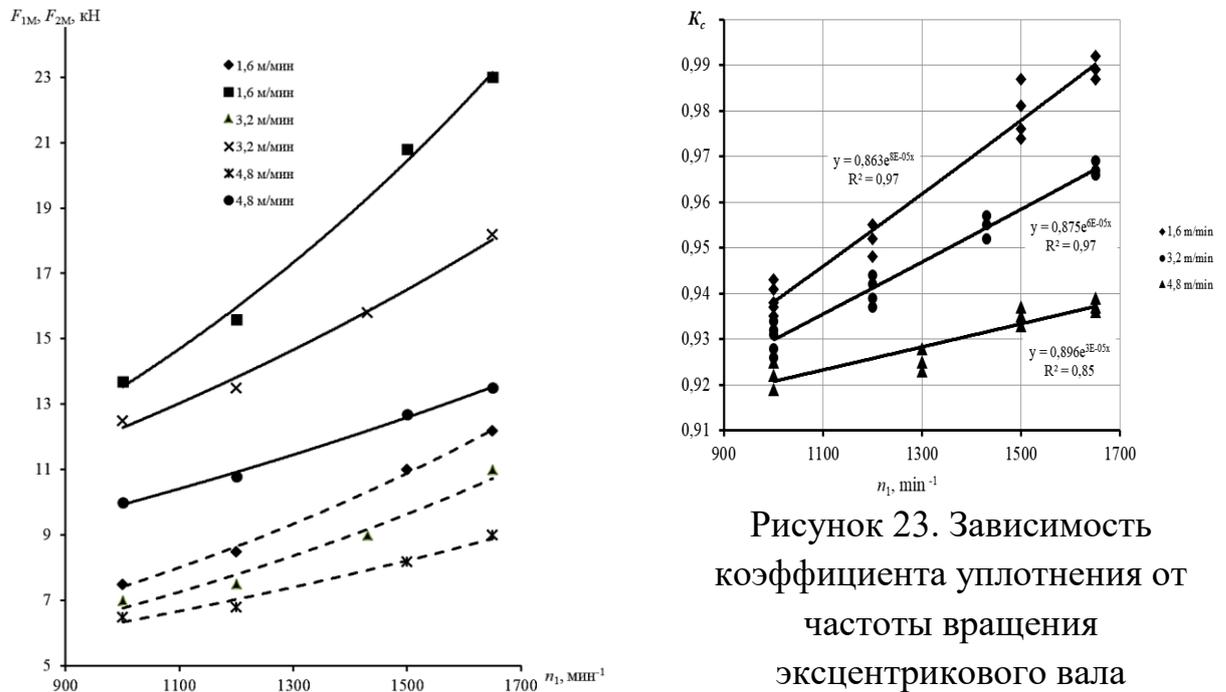


Рисунок 22. Зависимость максимальных усилий от частоты вращения эксцентрикового вала (F1m - пунктирная; F2m - сплошная)

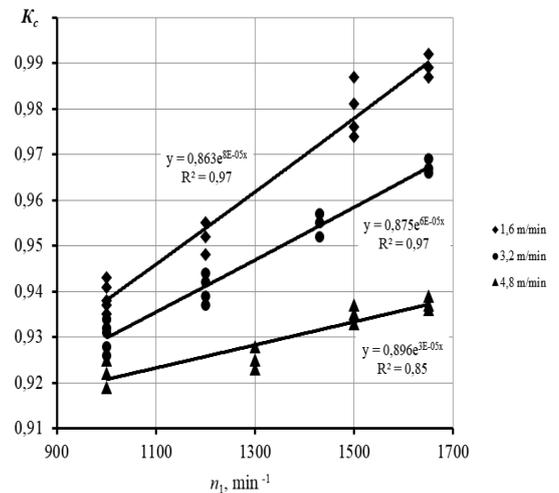


Рисунок 23. Зависимость коэффициента уплотнения от частоты вращения эксцентрикового вала

В процессе уплотнения сопротивление смеси возрастает и достигает максимальные значения после 4-5 воздействий трамбуемым брусом на смесь. Исследования проводились при соблюдении следующих скоростей укладчика: 1,6, 3,2, 4,8 м/мин; а также при частоте вращения эксцентрикового вала от 1100 мин⁻¹ до 1700 мин⁻¹ (рисунок 22).

Для получения значений усилия в толкателе трамбуемого бруса имитационная модель была модифицирована с учетом параметров процесса уплотнения рабочим органом асфальтоукладчика (рисунок 24).

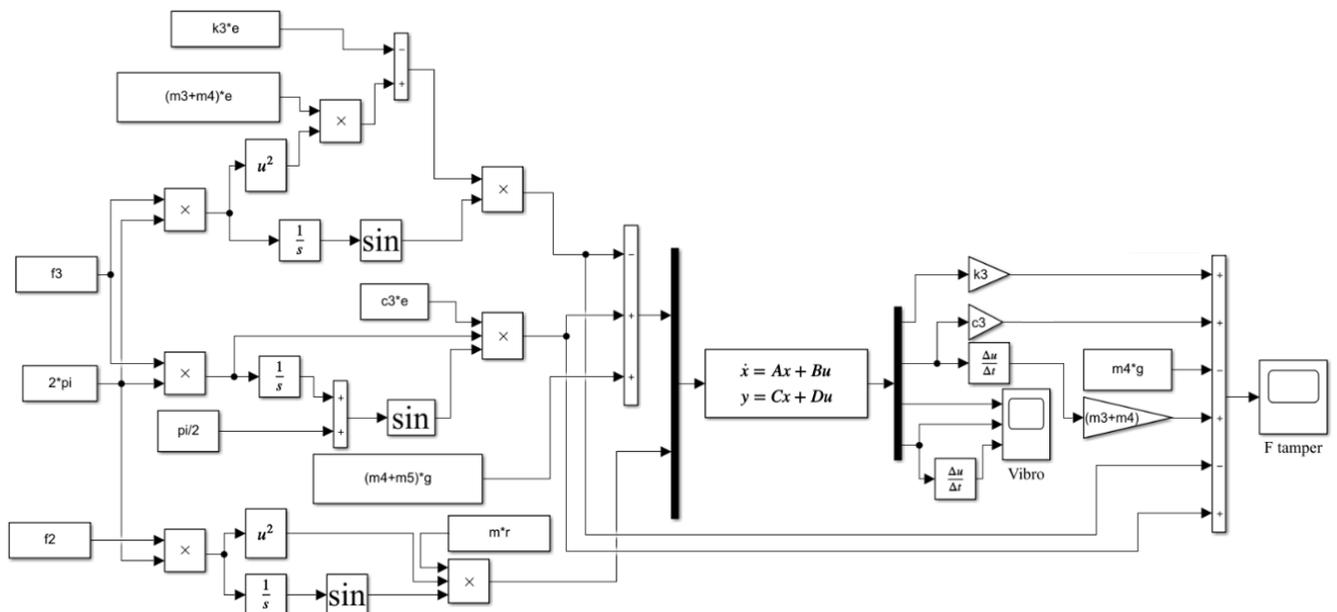


Рисунок 24. Имитационная модель с учетом параметра усилия

Временная зависимость усилия толкателя трамбуемого бруса при уплотнении смеси типа А на скорости движения 1 м/мин асфальтоукладчика при коэффициенте уплотнения K_u равной 0,93 представлена на рисунке 25.

Спектральный анализ данных временных рядов вертикального ускорения колебаний вибрационной плиты проводится на основе метода быстрого преобразования Фурье (БПФ) [13,131]. Преобразованные сигналы поступают в блок анализатора спектра, который отображает частотные характеристики сигналов.

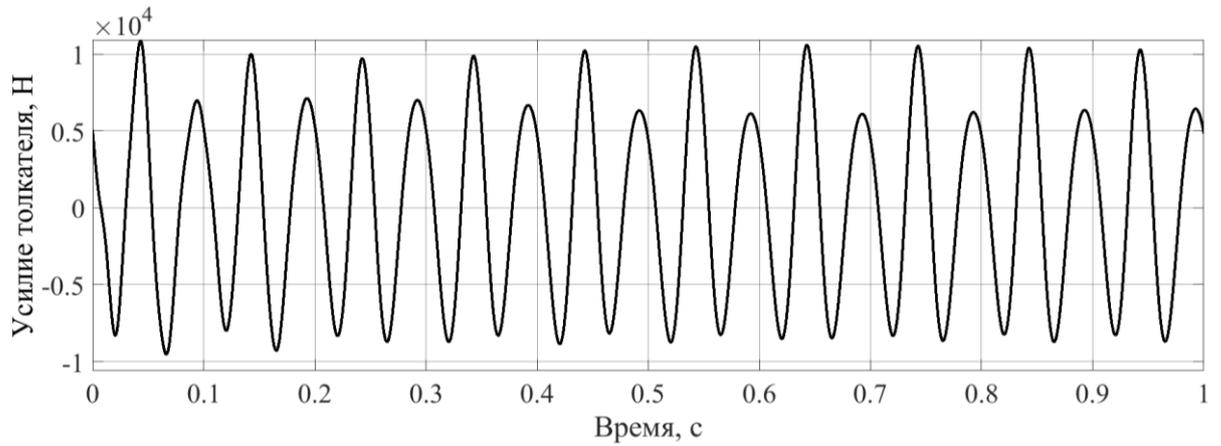


Рисунок 25. Временная зависимость усилия толкателя трамбующего бруса

В программной среде MATLAB/Simulink представлена разработанная модифицированная имитационная модель с учетом математической модели (рисунок 26).

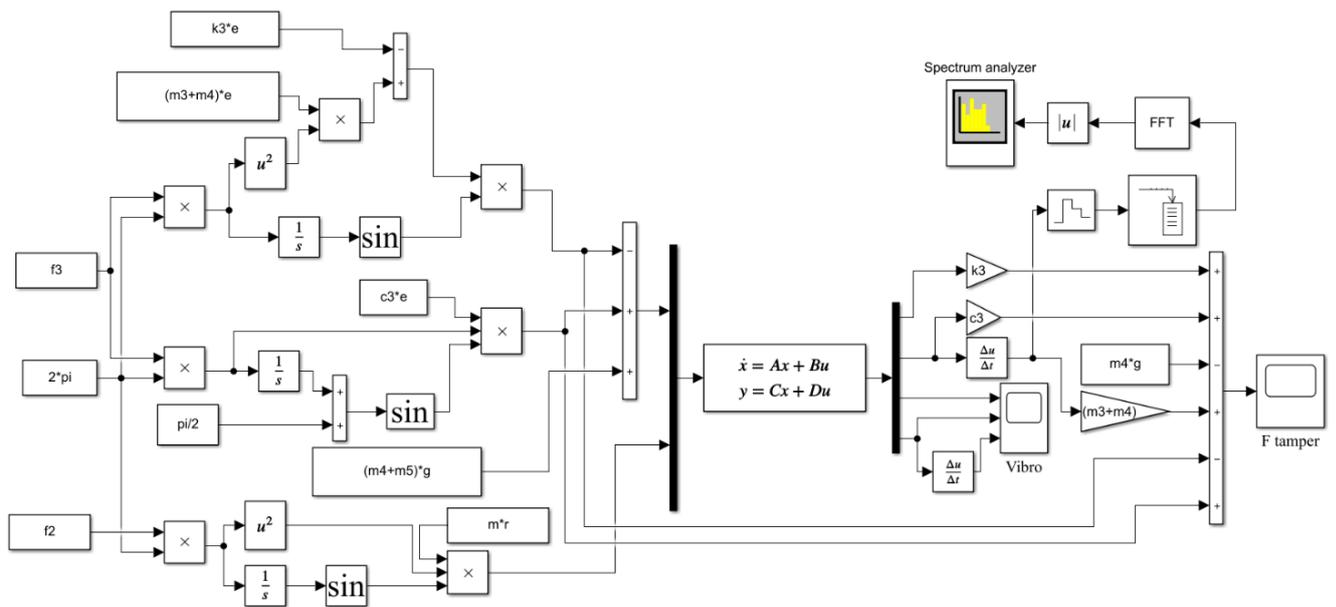


Рисунок 26. Имитационная модель на языке MATLAB/Simulink

В результате компьютерного моделирования получены численные значения параметров процесса уплотнения смеси рабочим органом АУ: ускорение вибрационной плиты, усилие толкателя трамбующего бруса и частотные характеристики сигналов ускорения вибрационной плиты (рисунки 27, 28, 29).

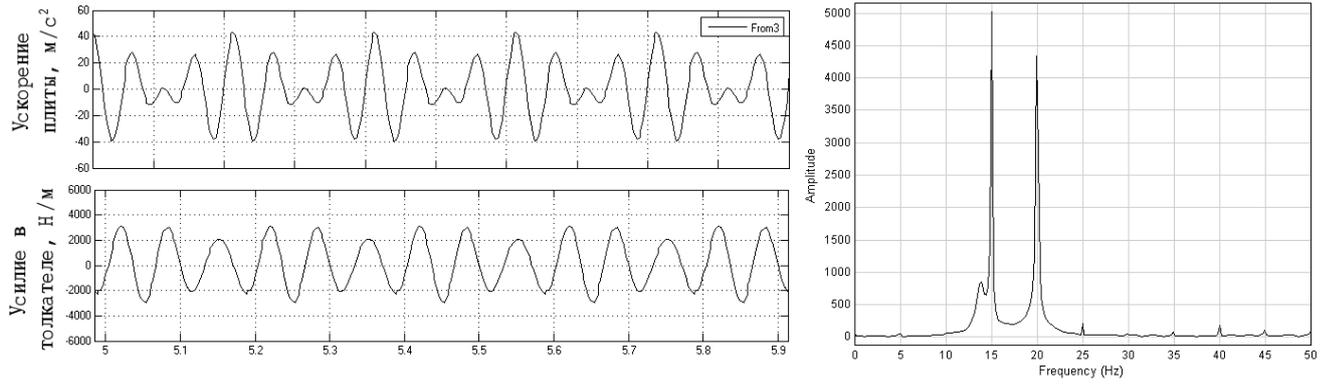


Рисунок 27. Результаты моделирования при скорости движения 1м/мин и $K_u=0,9$ для смесей типа А

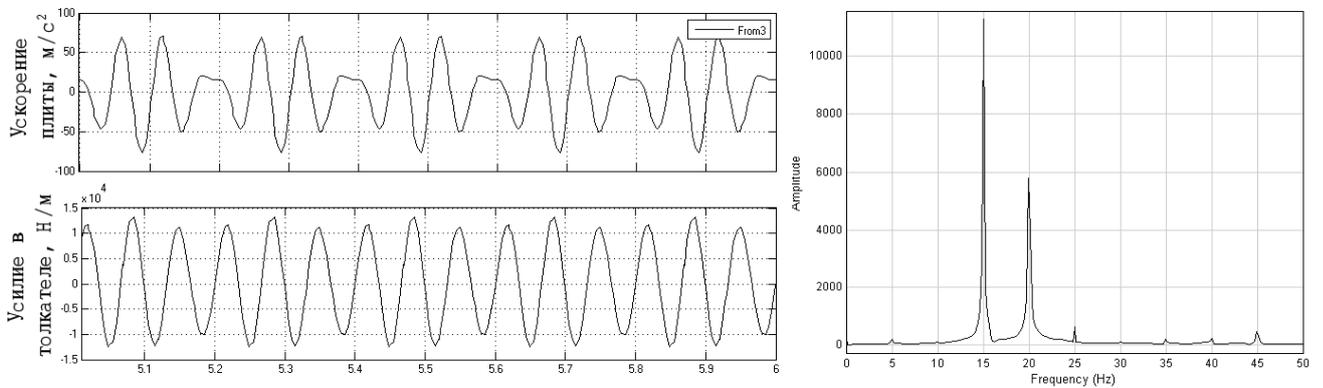


Рисунок 28. Результаты моделирования при скорости движения 1м/мин и $K_u=0,93$ для смесей типа А

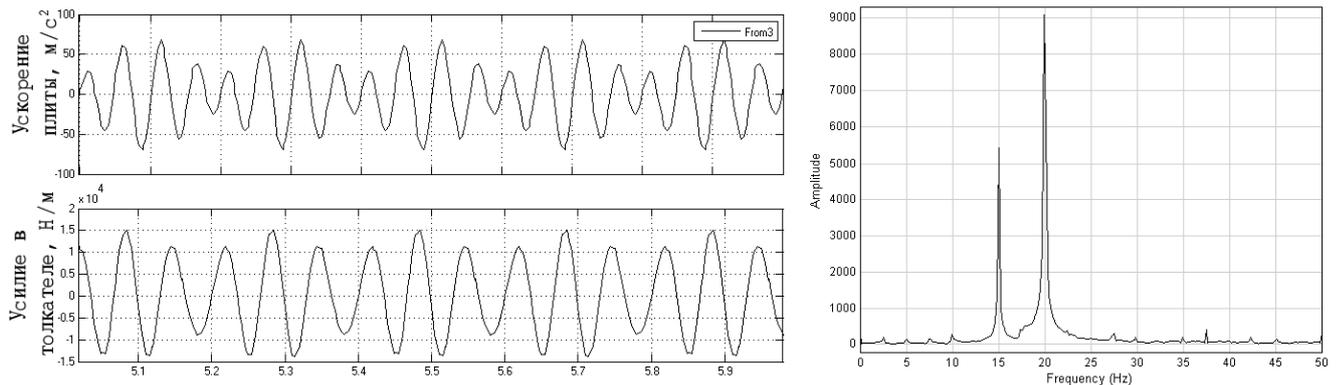


Рисунок 29. Результаты моделирования при скорости движения 1м/мин и $K_u=0,95$ для смесей типа А

Частотные данные полученные с помощью имитационной модели представлены в таблице 4.

Таблица 4. Частотные данные

s1	s2	s3	s4	...	s255	s256
1171,783	36,43933	36,73757	37,22958	...	39,92718	39,22479
1194,929	43,43755	43,71289	44,16773	...	52,89281	52,23749
34,88839	27,08935	27,32193	27,67557	...	10,58843	10,17564
634,4043	0,05953	0,105382	0,190436	...	1,800467	1,361657
1687,743	32,8675	33,07983	33,3992	...	21,32752	21,66461
1224,245	23,19318	23,34064	23,54141	...	20,80433	21,13363
1084,438	76,90801	76,86786	76,93656	...	41,14456	40,37883
1874,431	50,49641	50,7054	51,16921	...	10,76712	8,592545
...
669,4179	11,72178	11,79807	11,83206	...	17,51458	18,04091

Выполнена проверка полученной модели имитационным моделированием в программной среде MATLAB/Simulink. С помощью инструмента FFT программной среды Simulink выполнен спектральный анализ на основе сигналов ускорений вибрационной плиты каждые 6 с. Для хранения сигналов ускорений использовался блок `buffer`. Достигнутые зависимости соответствуют колебательному процессу, а также прослеживаются свойства устойчивости динамической системы.

2.3 Выводы

На основании проведенного теоретического исследования процесса взаимодействия уплотняющего рабочего органа укладчика с асфальтобетонной смесью можно сделать следующие выводы:

1. Существующие математические модели процесса уплотнения дорожных материалов, основанные на механореологических моделях, разработаны для расчета усилий в металлоконструкциях машин, определения временных зависимостей перемещения, скорости и ускорения уплотнителя и уплотняемого материала, но не позволяют выполнить четкую формализацию и автоматизацию вычислительных процедур при разработке алгоритмов автоматического

управления рабочих процессов.

2. Разработана модифицированная математическая модель в терминах пространства состояний, характеризующая процесс взаимодействия рабочего органа укладчика с дорожным материалом, позволяющая алгоритмизировать процесс определения временных зависимостей усилия в толкателе трамбуемого бруса, ускорения вибрационной плиты укладчиков при различных значениях частоты вращения эксцентрикового вала, вибратора плиты, с учетом изменения физико-механических свойств уплотняемых материалов.

3. Построена имитационная модель исследуемого процесса в программной среде MATLAB/Simulink, позволяющая определять рациональные режимные параметры уплотнения при укладке различных типов асфальтобетонных смесей.

4. Выполнена проверка адекватности имитационной модели сопоставлением результатов компьютерного эксперимента и полевых исследований. Получены зависимости максимального усилия в толкателе трамбуемого бруса от частоты вращения эксцентрикового вала, а также зависимость коэффициента уплотнения от частоты вращения эксцентрикового вала привода при уплотнении асфальтобетонной смеси типа А при скорости движения укладчика 1 м/мин. Полученные зависимости соответствуют колебательному процессу, а также прослеживаются свойства устойчивости динамической системы.

Полученные численные значения параметров использованы при разработке метода непрерывного контроля уплотнения асфальтобетонных смесей на основе ИНС для укладчиков в следующей главе.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ НЕЙРОСЕТЕВОГО КОНТРОЛЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УПЛОТНЕНИЕМ ДОРОЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКАМИ

Создание математических моделей, которые учитывают параметры дорожного материала и динамику рабочих процессов укладчика, необходимо чтобы автоматизировать процесс уплотнения дорожных покрытий с помощью асфальтоукладчика. Аналитико-имитационные модели показывают наглядно строй рабочих процессов, но не имеет возможности подстраиваться автоматически под меняющиеся внешние условия. Помимо этого, проектирование регуляторов затрудняется из-за сложности имитационных моделей [113-122, 135]. Выбор структуры модели и определение ее параметров затрудняются нелинейными зависимостями между показателями рабочих процессов. Падение качества контроля происходит из-за упрощения аналитических моделей рабочих процессов.

Определение элементов рабочих процессов на основе входных и выходных показателей требуется для того, чтобы решить эту проблему.

Оптимальная настройка режимов работы укладчика возможна только с учетом информации о коэффициенте уплотнения в реальном времени. Приборы непрерывного неразрушающего контроля и САУ уплотнением смесей асфальтоукладчиками не производятся.

Создание методов математического моделирования рабочих процессов и синтеза систем управления сложных технических объектов, чем и являются асфальтоукладчики, стимулируется за счет проблем автоматизации. Для таких динамических сложных систем целесообразно использование нейросетевых технологий. Тогда определение рабочего процесса состоит в разработке нейросетевой модели на основе входных и выходных экспериментальных данных. В связи с тем, что искусственные нейронные сети обладают способностью

моделировать существенные нелинейности в структуре сложных, динамических объектах управления, автором был выбран данный метод.

Предлагаемые методы базируются на технологиях искусственного интеллекта. Спрогнозированное системой значение коэффициента уплотнения позволяет машинисту укладчика скорректировать рабочие режимы, отправить радиосигнал вибрационным каткам для оптимизации режимов их работы. Наличие систем непрерывного контроля и управления на асфальтоукладчике, с учетом известных САУ (заполнение шнековой камеры, профилирование, нивелирование, температурный контроль смеси в бункере и уплотненного покрытия, глобальная навигация, документирование результатов уплотнения и измерения температуры), значительно повышает уровень автоматизации и доводит машину до соответствия понятию «Умный укладчик». В доступных открытых источниках информации отсутствуют аналогичные или подобные научные и технические решения.

3.1 Разработка нового метода непрерывного нейросетевого контроля уплотнения асфальтобетонных смесей для асфальтоукладчиков

Рабочий процесс уплотнения с помощью асфальтоукладчика представляет собой «черный ящик» (рисунок 30), и модель строится на основе полученных экспериментальных данных, которые зависят от временных параметров рабочего процесса и параметров, которые влияют на коэффициент уплотнения [65, 72]. Ошибка моделирования определяется разностью между текущими значениями выхода модели по времени и ожидаемым (заданным) значением, которые используются для обучения сети. Такая модель рабочего процесса, представленного в виде «черного ящика», может быть использована в системе непрерывного контроля для получения информации о процессе уплотнения и контроля значения коэффициента уплотнения.

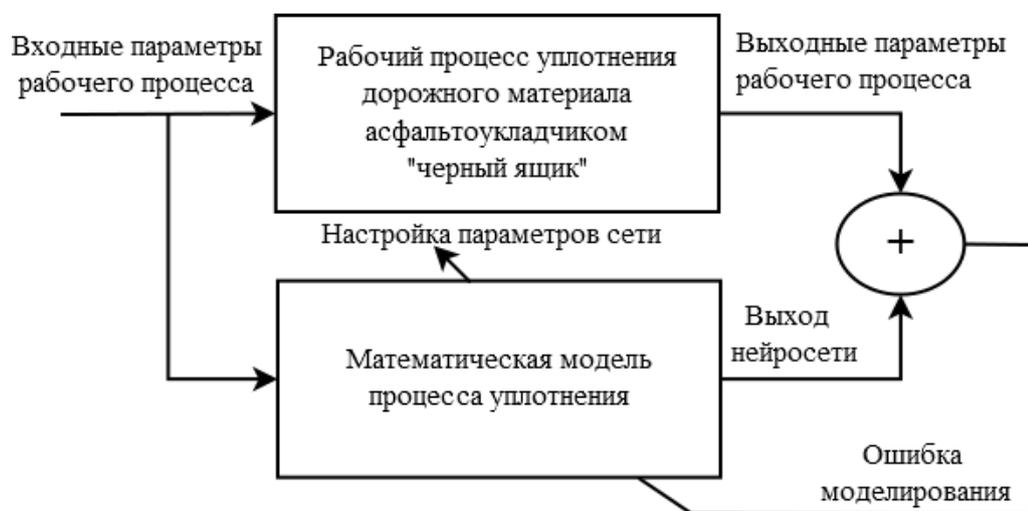
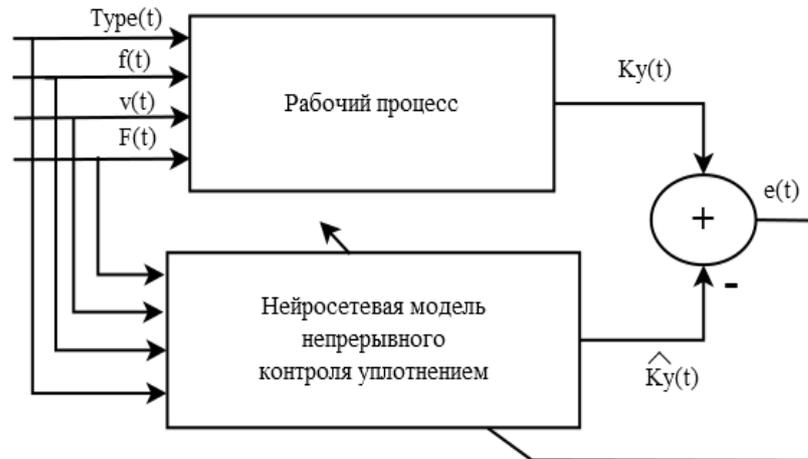


Рисунок 30. Рабочий процесс уплотнения и обучение нейросетевой модели

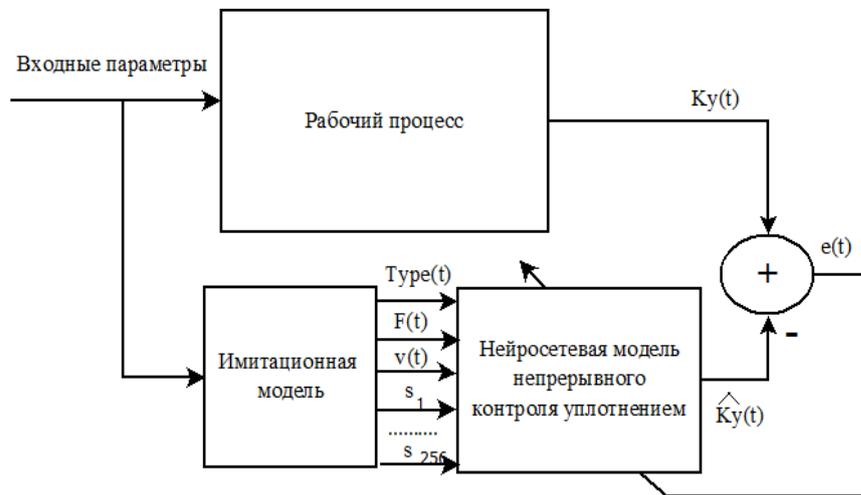
Разработаны метод непрерывного анализа уплотнения и система прогнозирования качества уплотнения асфальтобетонных смесей для асфальтоукладчиков на основе ИНС, которые позволяют находить и воспроизводить нелинейные зависимости между экспериментально измеренными показателями рабочего процесса уплотнения асфальтобетонных смесей (рисунок 26). Система прогнозирования качества уплотнения базируется на разработанной имитационной модели во второй главе, где входными параметрами ИНС служат тип смеси (Type), скорость движения укладчика (v), усилие в толкателе трамбующего бруса (F) и частотные характеристики сигналов ускорений вибрационной выглаживающей плиты ($s1-s256$). Метод непрерывного анализа уплотнения смеси на основе значений информационных сигналов, полученных в полевых условиях, таких как частота колебания трамбующего бруса (ft), тип смеси (Type), скорость движения АУ (v) и максимальное усилие в толкателе трамбующего бруса (F). Выходным параметром разработанных методов является значение коэффициента уплотнения (K_u) (рисунок 31).

На сегодняшний день существует и разрабатываются множество различных видов ИНС [15, 18, 58, 103]. Также, увеличивается количество вариантов реализации сетей. При внедрении ИНС к процессу, необходимо выбрать нейронную сеть, которая максимально подходит для решения всех поставленных

задач. Разные нейронные сети обладают различными качествами для решения задач.



$$a) K_y = f(\text{Type}, f_t, v, F)$$



$$б) K_y = f(\text{Type}, v, F, s_1, s_2 \dots s_{256})$$

Рисунок 31. Схема методов непрерывного контроля для асфальтоукладчиков; а) – непрерывный анализ, б) система прогнозирования

Нейроны являются относительно однотипными, простыми элементами, которые имитируют работу нейронов мозга. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием (возбужден или заторможен) по аналогии с нервными клетками головного мозга [103].

Искусственный нейрон, также, как и его естественный прототип, имеет группу синапсов (входов), соединенных с выходами других нейронов, а также аксон – выходную связь данного нейрона – откуда сигнал возбуждения или

торможения поступает на синапсы (веса) других нейронов. Исходя из параметров весов и смещений, нейрон ставит в соответствие входным сигналам выходной сигнал.

$$a = f(x); \quad x = \sum_{i=1}^N w_i p_i + b \quad (19)$$

где, a – выходной сигнал; b – смещение; w – весовой коэффициент; $f(x)$ – функция активации.

Далее при описании параметров и сигналов нейросетевых моделей применяются обозначения, принятые в [16, 112]. Данные обозначения используются в программной среде MATLAB, который предназначен в данной работе для реализации нейросетевых моделей непрерывного контроля уплотнением дорожных материалов для асфальтоукладчика.

Параллельное соединение нейронов образует слой (рисунок 32). Сеть может выступать в качестве аппроксиматора сложных зависимостей за счет объединения значительного количества нейронов в слой. В матричной форме вектор входных сигналов слоя определяется следующей формулой [52, 81]:

$$a = f(Wp + b) \quad (20)$$

где W – матрица весовых коэффициентов; p – вектор входных сигналов; b – вектор смещений; $f()$ – вектор-функция активации.

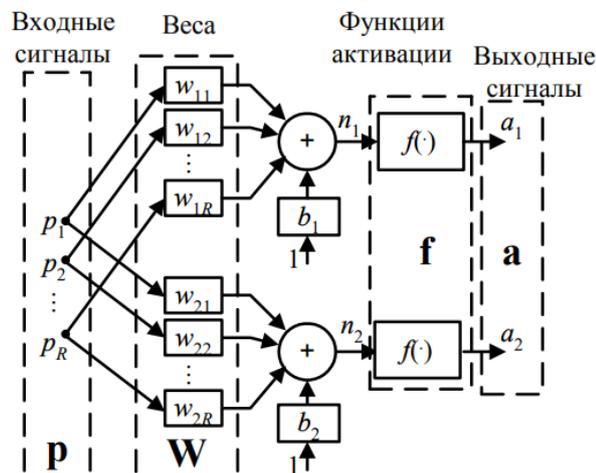


Рисунок 32. Объединение несколько нейронов в слой

3.1.1 Система прогнозирования качества уплотнения асфальтобетонных смесей для асфальтоукладчиков

Из разработанной имитационной модели во второй главе, разработана система прогнозирования коэффициента уплотнения асфальтобетонных смесей. Моделирование проводилось для представления частотной области сигналов ускорений вибрационной выглаживающей плиты и максимальных значений усилия в толкателе трамбующего бруса значений для разных типов асфальтобетонных смесей при различных значениях скорости движения асфальтоукладчика для определения коэффициента уплотнения и обучения ИНС.

Разработан алгоритм обработки сигналов ускорений для получения частотных характеристик с помощью БПФ и подготовки данных для обучения ИНС. Алгоритм состоит из следующих шагов:

1) Длинный вибрационный сигнал ускорений от выглаживающей плиты за весь проход асфальтоукладчика делится на партии коротких сигналов в интервале [0:512];

2) Каждый короткий сигнал преобразуется в представление частотной области с использованием БПФ для извлечения частотных характеристик;

3) Выход БПФ использует первую половину значений спектров в интервале [0:256], так как вторая половина дублируются. Затем данные спектры для каждого короткого сигнала нормализуются с помощью функции `mapminmax` для отображения данных в интервале [-1:1], чтобы исключить влияние амплитуд и усилить незаметные частотные составляющие;

4) Обработанные сигналы подаются на вход нейросетевой модели.

С помощью данного алгоритма извлекаются частотные характеристики вибрационных сигналов выглаживающей плиты асфальтоукладчика и обработанные массивы будут использоваться в качестве входных данных для обучения нейросетевой модели (рисунок 33). Таким образом, в модели каждый образ имеет 256 функций.

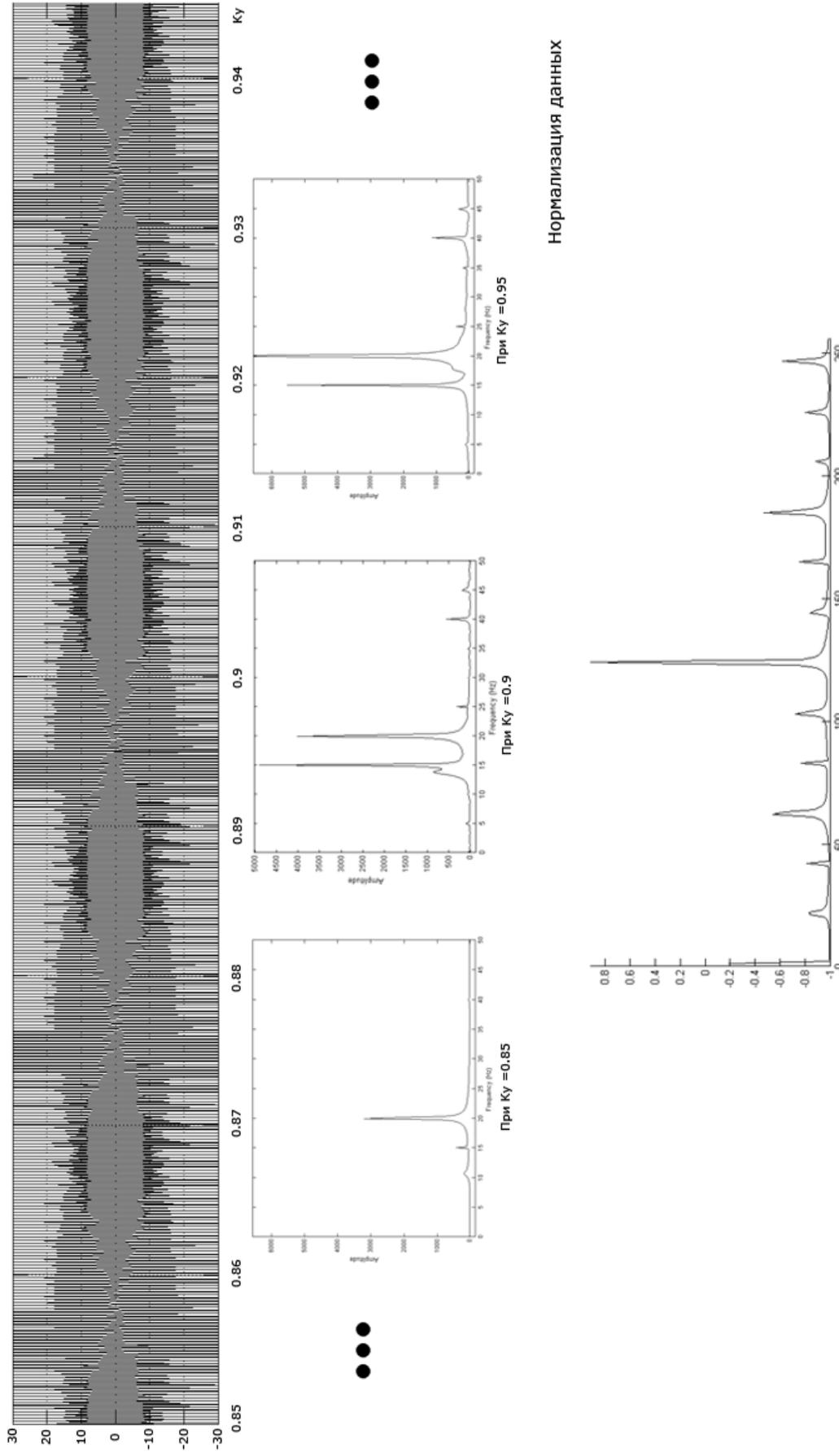


Рисунок 33. Схема обработки сигналов ускорений вибрационной плиты

Выполнены исследования рабочих органов асфальтоукладчика и параметры процесса «трамбуемый брус – вибрационная плита – смесь» с помощью имитационной модели (рисунок 35, 36, 37). Целью автоматического контроля является определения коэффициента уплотнения в режиме реального времени.

Предложена идея использования максимального усилия в толкателе трамбуемого бруса укладчика для нейросетевой модели непрерывного контроля уплотнением дорожного материала для асфальтоукладчиков. Система с нейросетевой моделью непрерывного контроля уплотнением работает по алгоритму, показанный на рисунке 34.

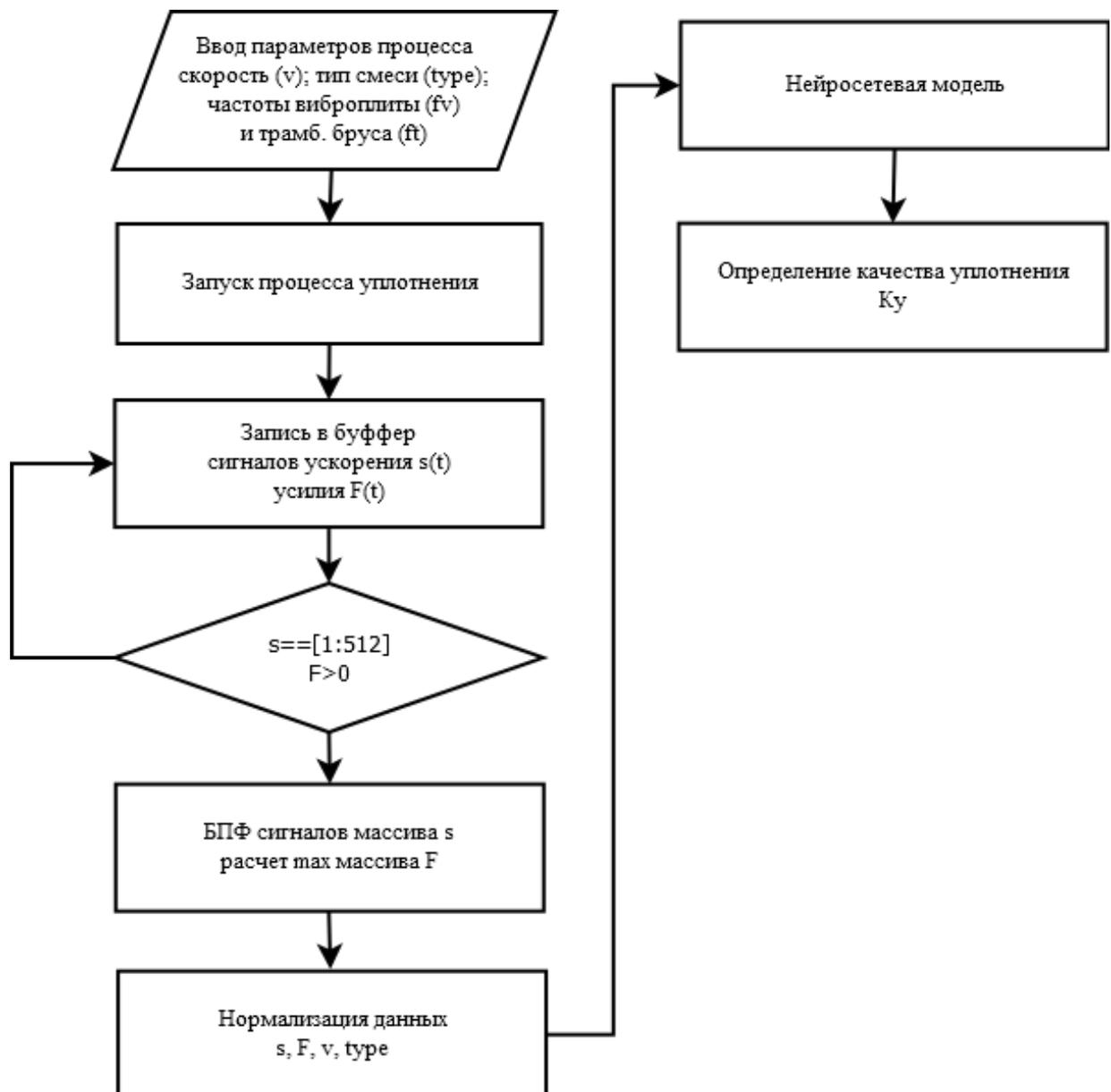


Рисунок 34. Алгоритм работы нейросетевой модели непрерывного контроля

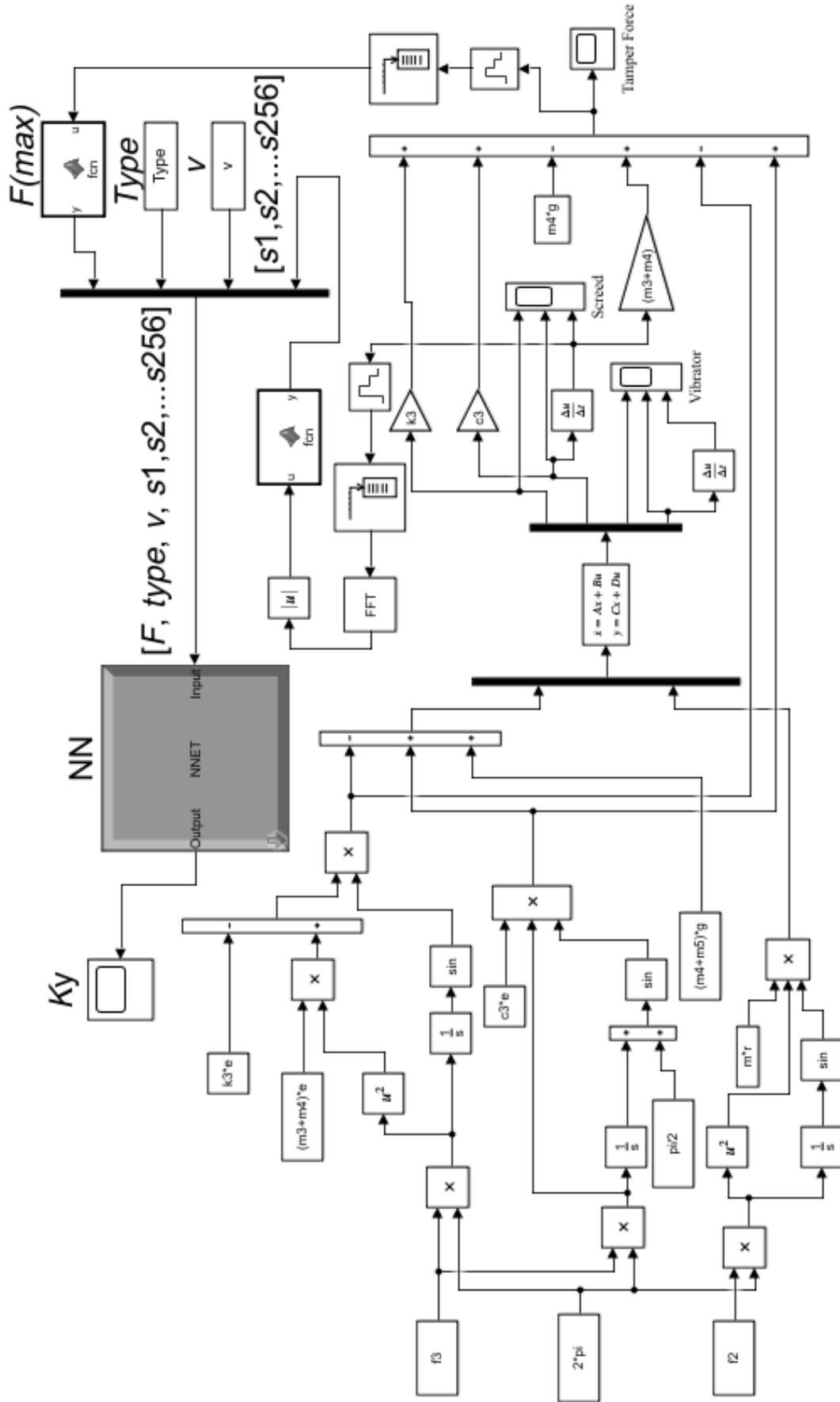


Рисунок 35. Имитационная модель системы непрерывного контроля уплотнения

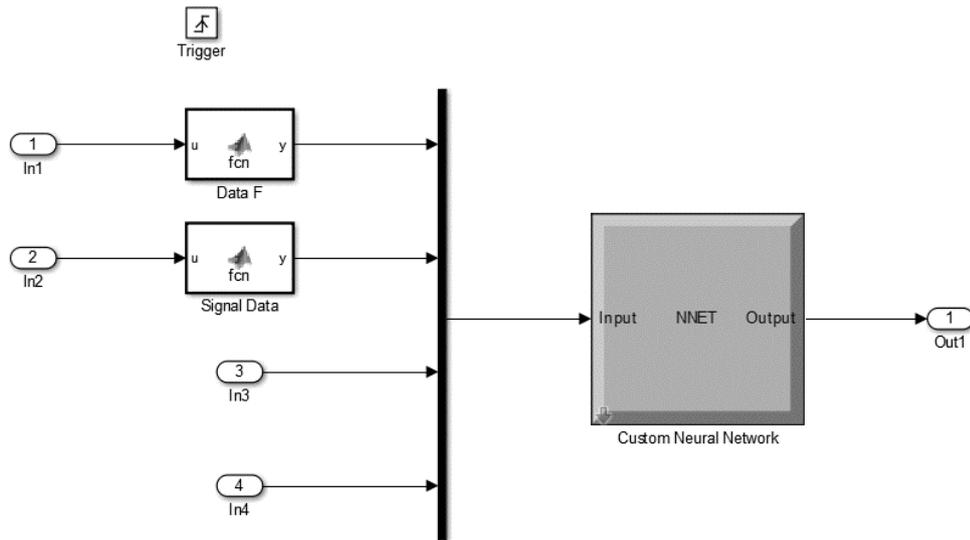


Рисунок 36. Содержание блока predictNN

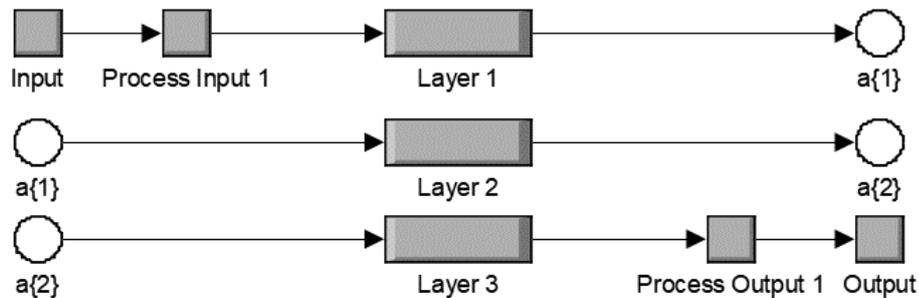


Рисунок 37. Содержание блока Custom Neural Network

Разные структуры ИНС и параметры рабочего процесса виброплиты и трамбующего бруса асфальтоукладчика были исследованы во время разработки метода [111]. Суммарный квадрат ошибки принят за критерий обучения ИНС, а смещения нейронов сети и веса являются настраиваемыми параметрами. В итоге, обучение сети сводится к решению задач оптимизации.

Входами сети являются сигналы ускорения вибрационной плиты s , усилие в толкателе трамбующего бруса, тип смеси и скорость движения укладчика. Массивы весов и смещений являются настраиваемыми параметрами модели. Архитектура ИНС для первого метода представлена на рисунке 38.

Оптимизация параметров нейросетевой модели осуществляется методом масштабируемых сопряженных градиентов [111, 48].

Следующая задача после выбора структуры, определение ее размерности, т.е. количество скрытых нейронов, функций активации и т.д. Неудовлетворительное количество скрытых нейронов провоцирует невозможность точного воспроизведения скрытых зависимостей между параметрами рабочего процесса в динамике, превышение необходимого количества нейронов приводит к неоправданному увеличению времени для моделирования и лишняя нагрузка на вычислительные мощности ЭВМ. Нужное количество нейронов в скрытых слоях можно определить по формуле, являющейся следствием из теорем В.И. Арнольда, А.Н. Колмогорова и Х. Нильсена [22, 32, 48, 100]:

поиск необходимого количества синаптических связей N_w , определяется по формуле:

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y \quad (21)$$

где Q – число элементов множества обучающих примеров; N_x – размерность входного сигнала; N_y – размерность выходного сигнала.

Определив необходимое количество синаптических связей, необходимо рассчитать количество нейронов скрытого слоя. Для данной системы использованы два скрытых слоя. Количество нейронов для двух скрытых слоев рассчитывается по формуле:

для первого скрытого слоя:

$$\sqrt{(N_y + 2)Q} + 2\sqrt{Q/(N_y + 2)}; \quad (22)$$

для второго скрытого слоя:

$$N_y \sqrt{Q/(N_y + 2)}. \quad (23)$$

В итоге получена многослойная нейронная сеть с двумя скрытыми слоями, где на первом скрытом слое 50 нейронов, а на втором 20 нейронов. Функцией активации на скрытых слоях является гиперболический тангенс, а на выходе линейная функция активации. За критерий обучения принят суммарный квадрат ошибки. Сеть обучена методом масштабируемых сопряженных градиентов.

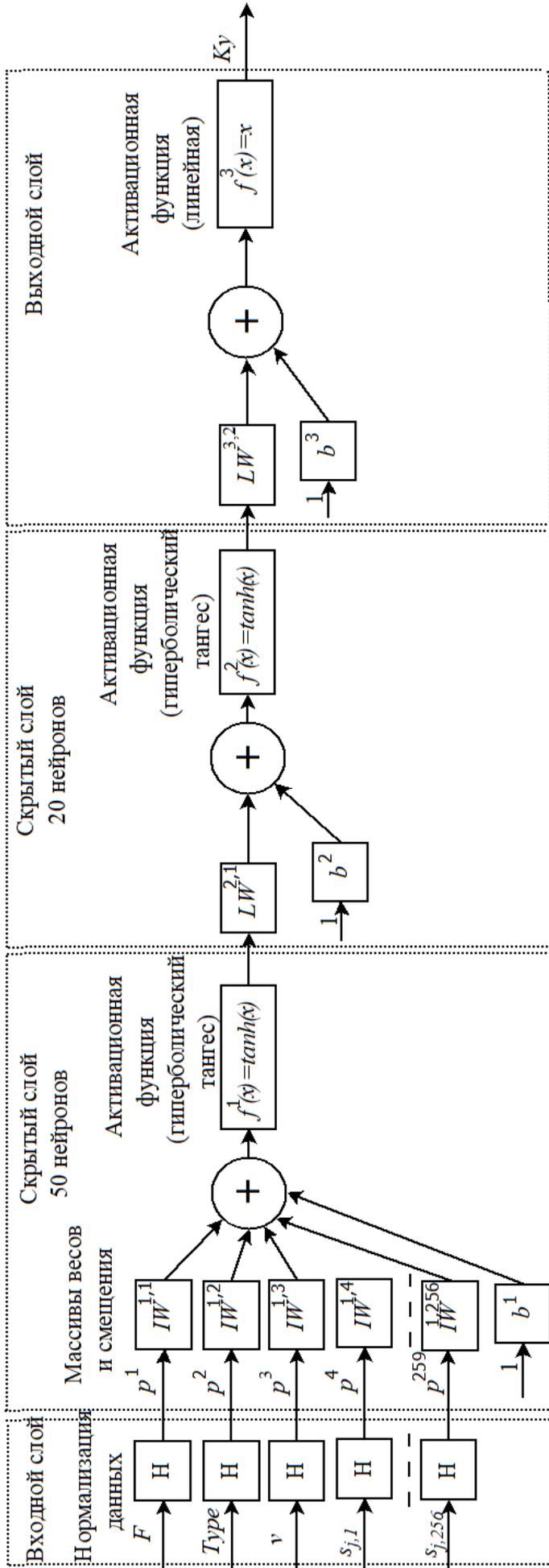


Рисунок 38. Архитектура нейронной сети

Метод масштабируемых сопряженных градиентов был разработан на основе метода сопряженных градиентов [48].

Пусть $p_1, p_2, \dots, p_k \in R^N$ - множество ненулевых векторов. Множество векторов $\{p_i\}_{i=1,k}$ образуют сопряженную систему векторов относительно симметричной матрицы A размером $N \times N$, если выполнено условие:

$$p_i^T A p_j = 0, \quad i \neq j, i = 1, k, j = 1, k$$

Таким образом, множество точек $w \in R$ называют k -плоскостью, если удовлетворяют уравнению:

$$w = w_i + \alpha_1 p_1 + \dots + \alpha_k p_k, \quad \alpha_i \in R$$

где w_i - точка в пространстве весов; p - подмножество сопряженной системы векторов.

Идея метода масштабируемых сопряженных градиентов заключается в объединении методов Левенберга-Марквардта и сопряженных градиентов. Это делается путем введения скаляра λ_k в метод сопряженных градиентов, который должен регулировать неопределенность $F''(w_k)$. Такой результат получается при использовании формулы:

$$s_k = \frac{F'(w_k + \sigma_k p_k) - F'(w_k)}{\sigma_k} + \lambda_k p_k \quad (24)$$

Значение λ_k напрямую масштабирует величину шага: чем больше λ_k , тем меньше шаг.

Аппроксимация квадратичной функции, для которой запускается алгоритм, не всегда может показывать хорошие результаты, так как λ_k масштабирует

матрицу Гессе искусственным путем. А механизм значения λ_k позволяет добиться хорошей аппроксимации даже когда матрица Гессе положительно определена.

Алгоритм масштабирования сопряженных градиентов:

1. Выбирается вектор весов w , величины $0 < \sigma \leq 10^{-4}$, $0 < \lambda_1 \leq 10^{-6}$, $\hat{\lambda}_k = 0$.

Устанавливаются значения $p_1 = r_1 = -F'(w_1)$, $k = 1$ и $\text{success} = \text{true}$;

2. Если $\text{success} = \text{true}$, то вычисляются необходимые значения:

$$\sigma_k = \frac{\sigma}{|p_k|} \quad (25)$$

$$s_k = \frac{F'(w_k + \sigma_k p_k) - F'(w_k)}{\sigma_k} \quad (26)$$

$$\delta_k = p_k^T s_k \quad (27)$$

3. δ_k масштабируется по формуле:

$$\delta_k = \delta_k + (\hat{\lambda}_k - \lambda_k) + \lambda_k |p_k|^2 \quad (28)$$

4. Если $\delta_k \leq 0$, то матрица Гессе преобразуется к положительно определенной по формуле:

$$\delta_k = -\delta_k + \lambda_k |p_k|^2 \quad (29)$$

$$\hat{\lambda}_k = \lambda_k \quad (30)$$

5. Вычисляется величина шага по формулам:

$$\mu_k = p_k^T r_k \quad (31)$$

$$\alpha_k = \frac{\mu_k}{\delta_k} \quad (32)$$

6. Вычисляется параметр сравнения результатов Δ_k :

$$\Delta_k = 2\delta_k \frac{F(w_k) - F(w_k + \alpha_k p_k)}{\mu_k^2} \quad (33)$$

7. Если $\Delta_k \geq 0$, тогда уменьшить величину ошибки и продолжить алгоритм:

$$w_{k+1} = w_k + \alpha_k p_k \quad (34)$$

$$r_{k+1} = -F'(w_{k+1}) \quad (35)$$

$$\hat{\lambda}_k = 0 \quad (36)$$

Значение `success = true`. Если $k \bmod N = 0$, то алгоритм перезапускается по формуле $p_{k+1} = r_{k+1}$, иначе вычисляются следующие значения:

$$\beta_k = \frac{|r_{k+1}|^2 - r_{k+1}^T r_k}{\mu_k} w_k + \alpha_k p_k \quad (37)$$

$$p_{k+1} = r_{k+1} + \beta_k p_k \quad (38)$$

Если $\Delta_k \geq 0.75$, то изменяется значения параметра Δ_k :

$$\lambda_k = \frac{1}{4} \lambda_k \quad (39)$$

Если $\Delta_k < 0$, то `success = false` и $\hat{\lambda}_k = \lambda_k$.

8. Если $\Delta_k < 0.25$, тогда значение λ_k увеличивается:

$$\lambda_k = \lambda_k + \delta_k \frac{(1 - \Delta_k)}{|p_k|^2} \quad (40)$$

9. Если направление наискорейшего спуска $r_k \neq 0$, тогда $k = k + 1$ и переход к шагу 2. Иначе возвращается w_{k+1} как достигнутый минимум.

Величина σ должна быть минимальной.

ИНС обучилась при параметре скорости равной 0,01 на 59 эпохе (рисунок 39). Для процесса обучения случайным образом было выбрано 70% наборов данных и для процессов проверки и тестирования обученной модели ИНС

оставшиеся 30% наборов данных были разделены поровну, 15% для процесса тестирования и 15% для процесса проверки. Значение MSE обученной сети равна 0,0000148, т.е. близка нулю.

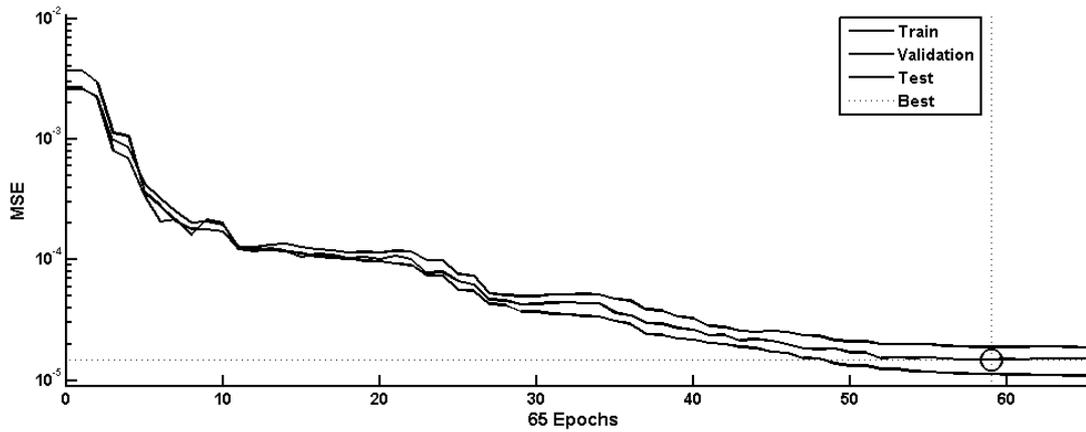


Рисунок 39. Результаты обучения нейросетевой модели

Отношение между фактическими и прогнозируемыми значениями коэффициента уплотнения с помощью нейросетевой модели представлены на рисунке 40.

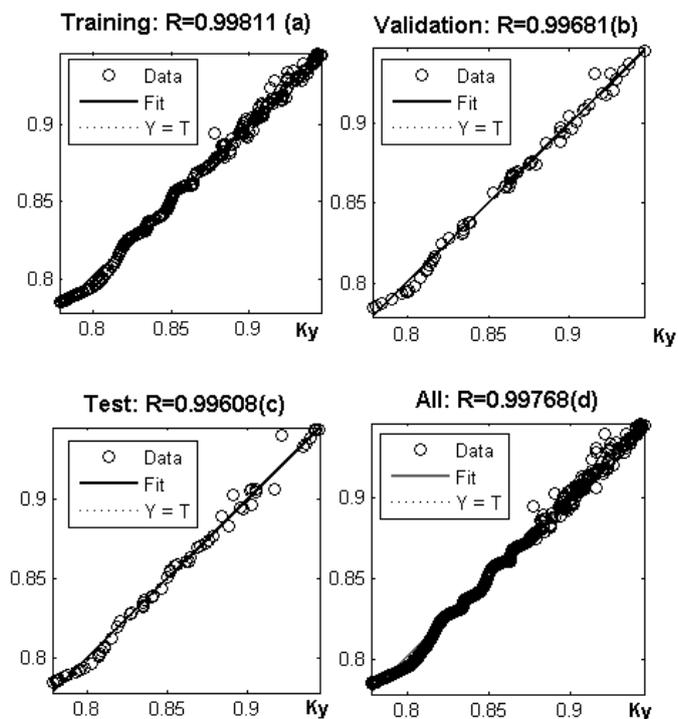


Рисунок 40. Результаты обучения ИНС: а) – тренировки; б) – проверки; с) – тестирования; д) – всех данных

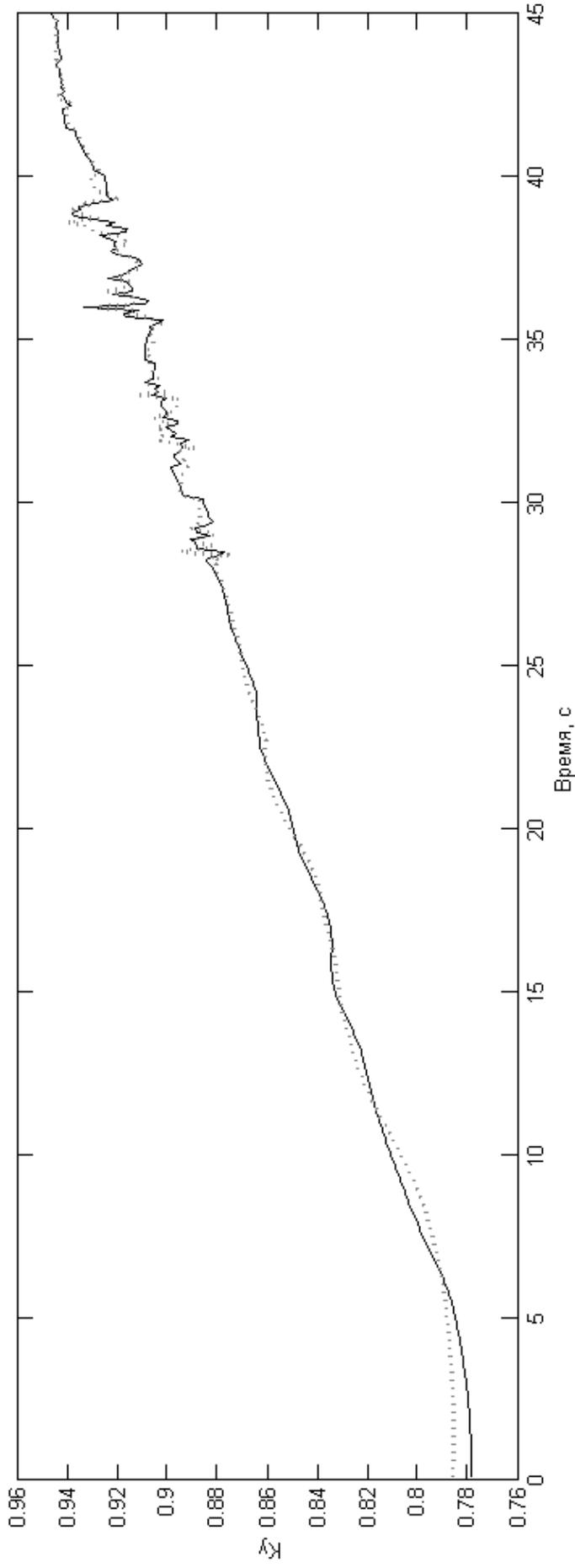


Рисунок 41. Прогнозирование коэффициента уплотнения во время моделирования рабочего процесса

На рисунке 41, показан выходной сигнал ИНС $\hat{K}_y(t)$ и экспериментально измеренный коэффициент уплотнения $K_y(t)$ во время работы рабочих органов асфальтоукладчика. Время моделирования в момент максимальных показателей укладки равен 45с. При моделировании выход сети близок к экспериментальным данным, это говорит, что прогнозирование $K_y(t)$ проходит в нормальном состоянии и что сеть выполняет свою работу с минимальной вероятностью ошибки. Оценена точность прогнозирования $K_y(t)$, средняя относительная ошибка составляет менее 3%.

3.1.2 Метод непрерывного анализа уплотнения асфальтобетонных смесей для асфальтоукладчиков

Данный метод разработан на основе информационных сигналов, полученных инженерами и научными сотрудниками в Союздорнии, ВНИИ Стройдормаш и нами в полевых условиях. Эти данные получены на реальных моделях машин при уплотнении горячих асфальтобетонных смесей (таблица 6). Процедура получения информативных признаков процесса уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиком заключается в следующем. На предварительно размеченных участках на нижний слой покрытия укладывали листы из металла размером 500x250x6 мм. Расположение листа фиксировали специальными указателями. После прохода асфальтоукладчика лист вместе с уложенной и уплотненной смесью извлекали из покрытия. После остывания образец осторожно снимали с листа и раскалывали на более мелкие пробы и определяли их объемную массу. Затем определяли коэффициент уплотнения [130]. Типы асфальтобетонных смесей при проведении исследований приведены в таблице 5.

На основании предварительных испытаний и характеристик асфальтоукладчика были выявлены основные режимы работы уплотняющих органов, на которых и были проведены опытно-производственные эксперименты.

Таблица 5. Типы асфальтобетонных смесей

Тип смеси	Вид смеси (содержание щебня, относительно массы, %)	Температура, С
А	Щебеночная (от 50 до 60)	130-150
Б	Щебеночная (от 40 до 50)	120-140
В	Щебеночная (от 30 до 40)	100-130
Г	Песчаная на дробленном песке	130-140

Режимы работ рабочих органов асфальтоукладчиков были выбраны таким образом, чтобы уплотнение асфальтобетонных смесей проводилось на различных частотах вращения приводных валов виброплиты и трамбующего бруса, включая максимально и минимально возможные.

Таблица 6. Набор данных

Тип смеси, (А-1, Б-2, В-3, Г-4)	Скорость асфальтоукладчика, м/мин	Частота трамбующего бруса, Гц	Максимальное усилие в толкателе, кН	Коэффициент уплотнения
1	1	24	9	0,91
2	5	6	10,6	0,94
3	2	12	8,2	0,87
4	5	24	8,6	0,875
...
3	3	12	8,3	0,88

Таким образом, уплотнение асфальтобетонных смесей осуществлялись на различных режимах работы виброплиты и трамбующего бруса и четырех режимах скорости движения асфальтоукладчика (1, 2, 3 и 5 м/мин). Режимы работы асфальтоукладчика при проведении эксперимента приведены в таблице 7.

Таблица 7. Режимы работы асфальтоукладчика

Наименование	Значения, единица измерения
Скорость	1, 2, 3, 5 м/мин
Частота трамбующего бруса	Min = 180 Max = 1440 об/мин
Частота вибрационной плиты	Min = 1800 Max = 4200 об/мин

Использован метод корреляционного анализа данных, чтобы определить насколько зависимы друг от друга независимые переменные [87, 148], таблица 8.

Таблица 8. Результаты значений корреляции Пирсона

	Тип	Скорость	Частота	Усилие
Тип	1	-0,091	-0,124	-0,451
Скорость	-0,091	1	0,127	-,118
Частота	-0,124	0,127	1	0,552
Усилие	-0,451	-0,118	0,552	1

Все независимые переменные между собой связаны слабо и можно их использовать для прогнозирования качества уплотнения. Также, определены важности используемых информационных сигналов [92] (рисунок 42).

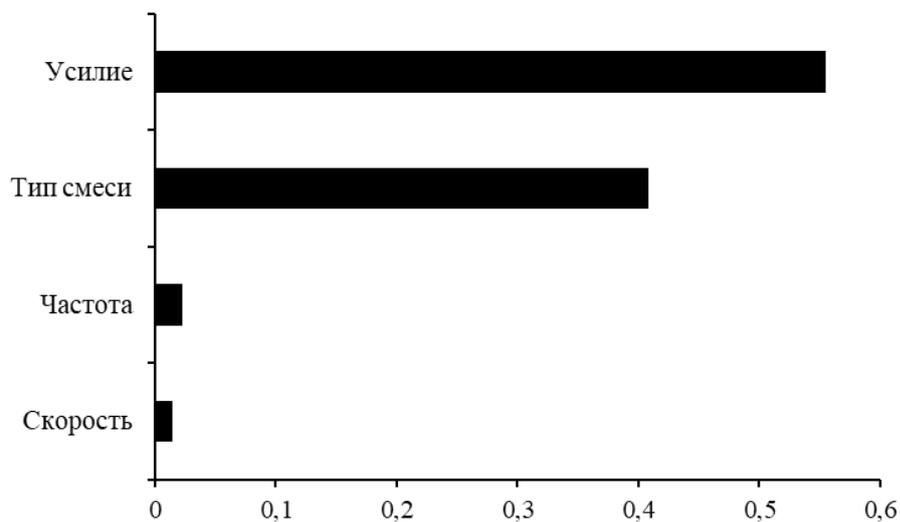


Рисунок 42. Важность предиктора

Из полученных результатов видно, что для всех исследуемых смесей, как правило, с увеличением частоты колебаний рабочих органов до определенного значения коэффициент уплотнения возрастает (рисунок 43), при этом для каждого вида смеси и скорости укладки существует свой оптимальный режим. Например, для каркасной смеси (Тип А), экстремум при минимальной скорости 1 м/мин имеет частоту колебания равной 684 об/мин. Дальнейшее увеличение частоты колебаний при этой скорости приводит к разуплотнению смеси, следовательно, повышенный режим работы уплотняющих органов при низких скоростях укладки для данного типа смесей нецелесообразен.

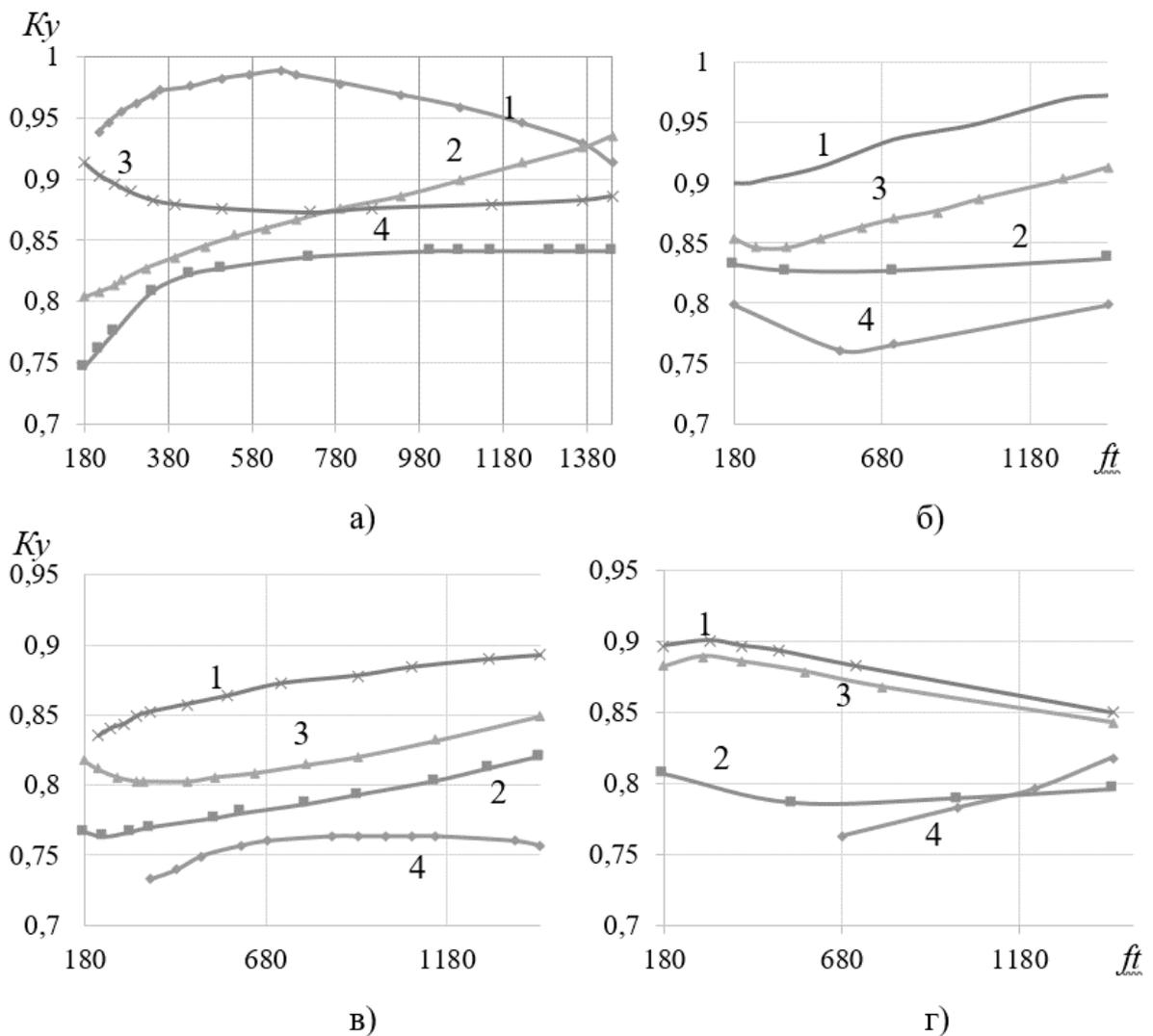


Рисунок 43. Результаты коэффициента уплотнения при скорости движения укладчика: а) – 1 м/мин; б) – 2 м/мин; в) – 3 м/мин; г) – 5 м/мин; для типов смеси: 1 – А; 2 – Б; 3 – В; 4 – Г

Рост скорости движения укладчика, как правило, приводит к снижению коэффициента уплотнения, что особенно заметно при средних и низких частотах колебаний уплотняющих органов. Это связано с уменьшением числа ударов по одному следу с увеличением скорости движения укладчика (рисунок 44).

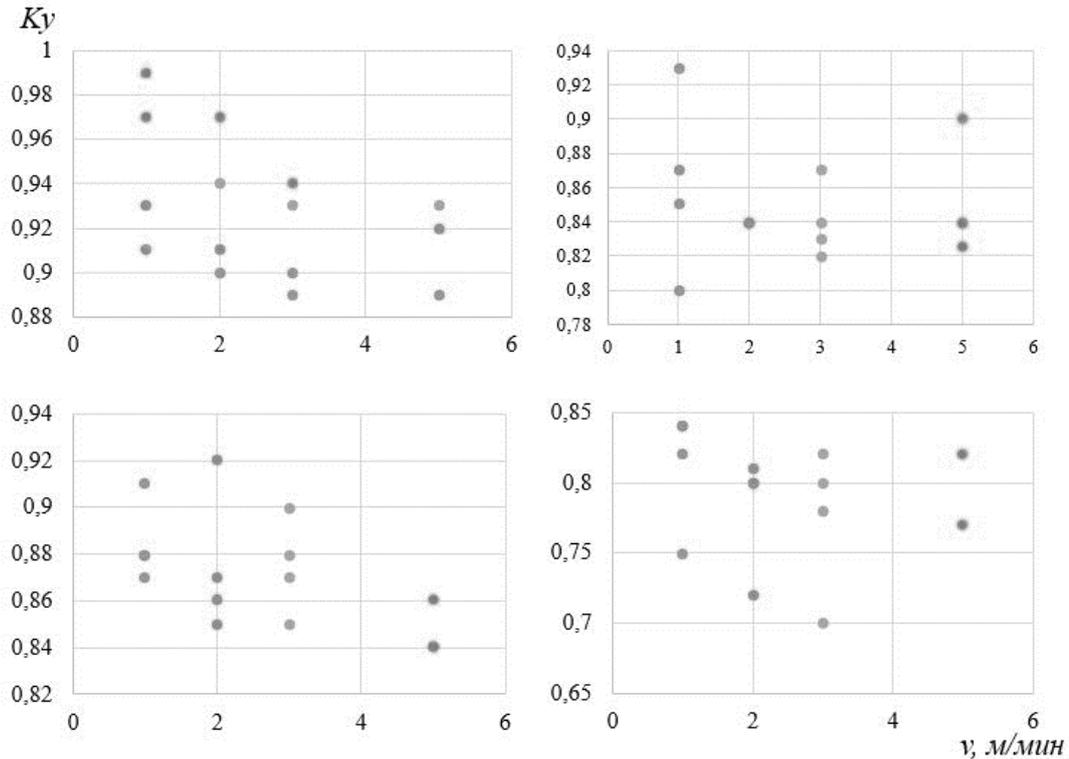


Рисунок 44. Изменение коэффициента уплотнения при увеличении скорости движения укладчика

Далее рассмотрена методика разработки нейросетевых моделей непрерывного контроля уплотнением дорожных материалов для асфальтоукладчиков на примере полученных экспериментальных данных. Входные сигналы (рисунок 26, а) – тип смеси $Type(t)$, скорость движения укладчика $v(t)$, усилие в толкателе $F(t)$ и частота трамбующего бруса $f(t)$. Выходной сигнал этого метода $\hat{K}_y(t)$ по завершению обучения сети на экспериментальных данных должен повторять сигнал $K_y(t)$ с минимальной ошибкой $e(t)$.

$$K_y = f(Type, f_t, v, F) \quad (41)$$

В каждом отдельном случае одной из главных задач является поиск оптимального соотношения параметров нейросетевых моделей и их характеристик, для эффективного решения которой необходим широкий спектр методов, алгоритмов и программ синтеза, которые отличаются по качеству получаемых результатов, объему вычислений, способам представления данных, времени поиска решения. При решении задач прогнозирования с использованием ИНС возникают трудности с подготовкой и обработкой входных значений и выбором оптимальной архитектуры сети [114, 122, 134].

При разработке методики нейросетевой идентификации были исследованы различные структуры нейросетевых моделей [53, 114, 115, 121-124, 134, 136-139]. За критерий обучения модели принят суммарный квадрат ошибки, а настраиваемыми параметрами модели являются веса и смещения нейронов сети, соответственно обучение ИНС сводится к решению задач оптимизации:

$$[W, b] = \arg \min_{t_0} \sum_{t_0}^{t_{fin}} e^2(t) \quad (42)$$

Оптимизация параметров нейросетевой модели осуществляется методом Левенберга-Марквардта [73,100].

Архитектура нейронной сети представляет собой многослойную нейронную сеть (рисунок 45). В модели существуют 3 основных слоя: входной слой модели включает в себя четыре нейрона, соответствующим четырем параметрам: тип смеси, скорость движения асфальтоукладчика, частота трамбуемого бруса и усилие в толкателе трамбуемого бруса. Скрытый слой состоит из десяти нейронов, которые находятся между входными и выходными слоями. В качестве функции активации на выходе скрытого слоя использован гиперболический тангенс. Выходной слой определяет качество уплотнение смеси с помощью коэффициента уплотнения. Функция активации выходного слоя является линейная функция. Трехуровневая модель ИНС показывает, что каждый входной параметр умножается на соответствующее весовое соединение. Смещение представляет

собой вес соединения с постоянным ненулевым значением, добавленным к сумме входных данных и соответствующих весов. Массивы весов и смещений являются настраиваемыми параметрами модели.

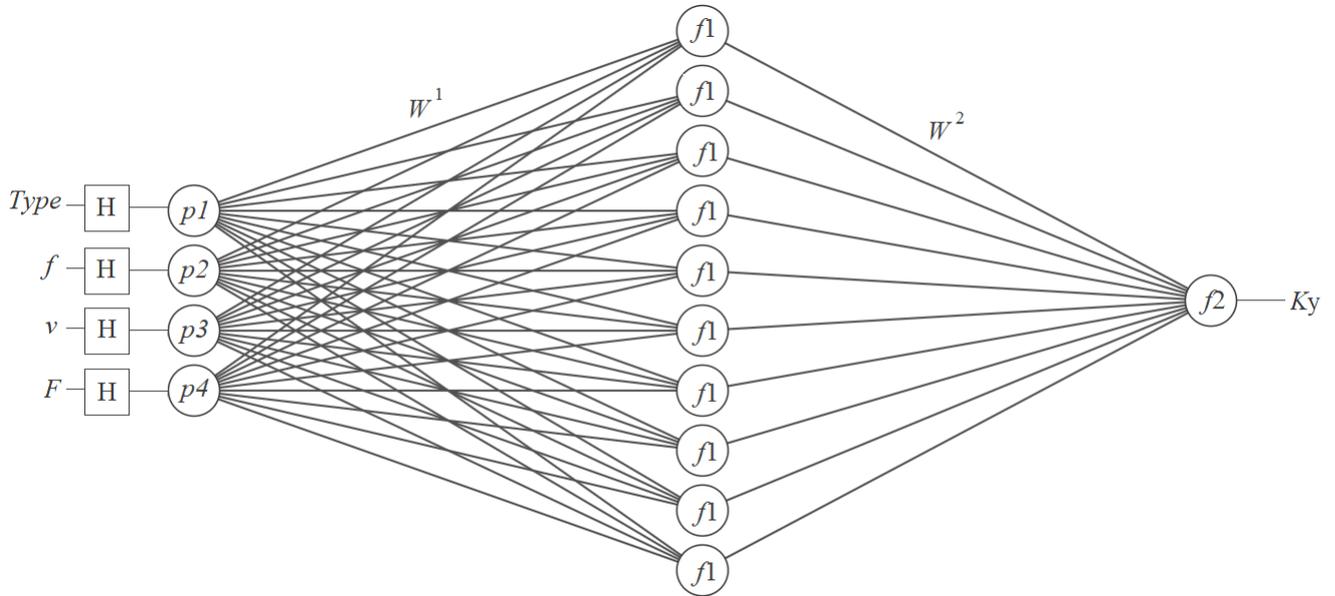


Рисунок 45. Архитектура нейронной сети

После выбора структуры ИНС необходимо определить ее размерности. Необходимо определить количество синаптических связей по формуле (21), после определить оптимальное количество нейронов на скрытом слое согласно теореме А.Н. Колмогорова [32, 100]:

$$N_w / (N_x + N_y) \quad (43)$$

В качестве функции активации на выходе скрытого слоя использован гиперболический тангенс, вычисляемый по формуле [111]:

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad (44)$$

где x – сумма произведений входных сигналов на соответствующий вес.

Выходной слой определяет качество уплотнение смеси с помощью коэффициента уплотнения. Функция активации выходного слоя является линейная функция [111]:

$$f(x) = x. \quad (45)$$

Графики активационных функций, описанных формулами (44) и (45) представлены на рисунке 46.

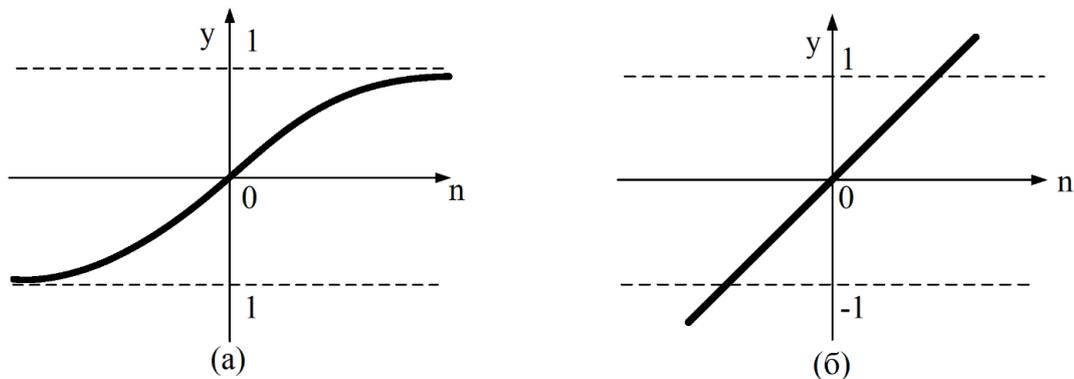


Рисунок 46. Графики активационных функций:

а – гиперболический тангенс; б – линейная функция

Смещение представляет собой вес соединения с постоянным ненулевым значением, добавленным к сумме входных данных и соответствующих весов.

Оптимальное число нейронов в скрытом слое равен 10, рассчитанный формулой 7. Чтобы проверить оптимальность количества нейронов в скрытом слое, полученных по теореме Колмогорова А.Н., опробованы различные количества скрытых слоев. Значения среднеквадратичной ошибки (MSE) при разных количествах скрытых слоев представлены на рисунке 47.

Наименьшее значение MSE связано с десятью нейронами. Таким образом, ИНС с десятью нейронами в скрытом слое оказалась наиболее подходящей топологией для модели ИНС.

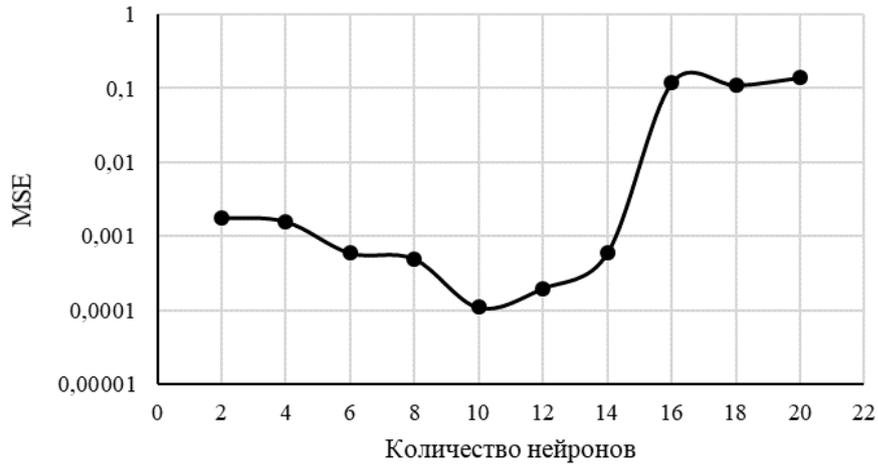


Рисунок 47. Количество нейронов в скрытом слое

При исследовании влияния параметра скорости обучения методом Левенберга-Марквардта, для значений 0,0001, 0,001, 0,01 и 0,1 самая высокая точность для ИНС по данным испытаний была достигнута для значения 0,01 (рисунок 48). Обучение было проведено в диапазоне от 10 до 150 эпох, чтобы определить влияние количества тренировочных эпох (итераций) на точность ИНС.

На графике показано изменение MSE во время процесса обучения, проверки и тестирования экспериментальных данных. Процесс обучения прекращается, когда ошибка валидации перестает уменьшаться. Уменьшение ошибки в данных тестирования показывает, как сеть будет обобщена для новых данных

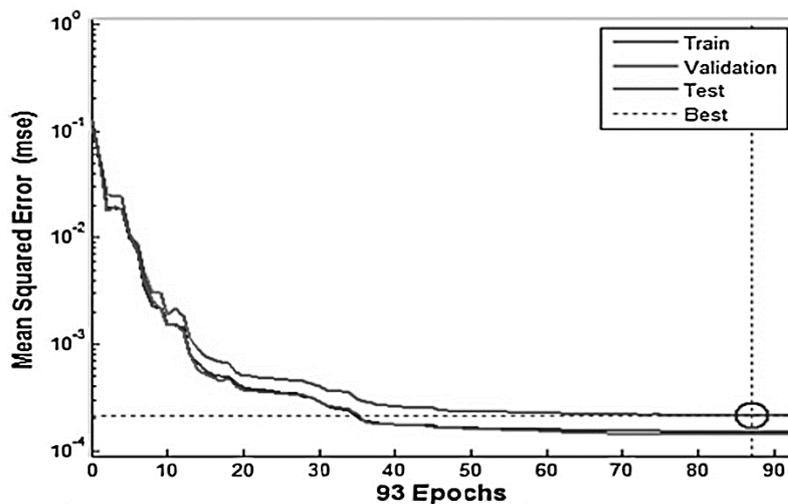


Рисунок 48. График обучения ИНС

После 87 эпохи сеть достигла наилучшего значения MSE. Это означает, что модель ИНС с прямой связью может прогнозировать качество уплотнения смеси асфальтоукладчиком с высокой степенью точности и обеспечить единообразное представление обучающих данных за довольно короткое время с низкой частотой ошибки.

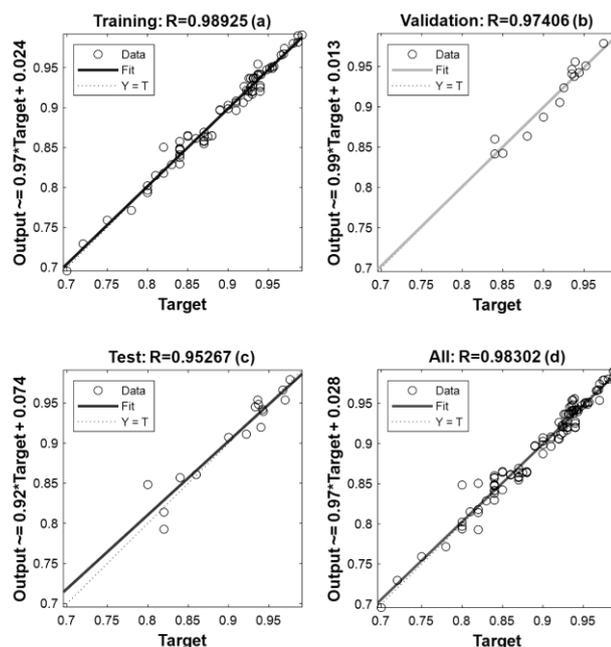


Рисунок 49. Результаты обучения ИНС. Регрессионный анализ (a) – тренировочные данные, (b) – проверочные данные, (c) – тестовые данные и (d) – все данные

Исходя из полученных результатов, предложенная нейросетевая модель показывает хорошее согласие с экспериментальными результатами и может прогнозировать коэффициент уплотнения с высокой точностью. Прогнозируемые значения модели очень близки к измеренным. Это подтверждено высокой корреляцией между входными параметрами и выходом ИНС, также высокими значениями R^2 и низкими значениями MSE.

Значения R^2 при обучении, проверке и тестирования для всего набора данных составляют 0,989, 0,974 и 0,952 соответственно (рисунок 49). Это означает, что все значения R^2 , полученные с помощью подхода моделирования ИНС, превышали 94%.

Полученный результат указывает на то, что разработанный метод на основе ИНС с прямой связью способен объяснить более 94% измеренных данных и эффективно использоваться для прогнозирования коэффициента уплотнения.

В результате моделирования систем непрерывного контроля уплотнения на основе ИНС оценена точность прогнозирования коэффициента уплотнения (таблица 9) путем сравнения полученных результатов, где средняя относительная ошибка для метода непрерывного анализа 5%, а системы прогнозирования – 3%.

Таблица 9. Результаты моделирования

Время, с	Коэффициент уплотнения		
	Лабораторные данные	Метод непрерывного анализа	Система прогнозирования
5	0,94	0,9041	0,97
10	0,949	0,976	0,918
20	0,957	0,91	0,976
30	0,98	1,01	0,951
40	0,99	0,95	0,96

Полученные результаты показали высокие точности относительно результатам, полученным в лабораторных условиях, и могут определять и прогнозировать коэффициент уплотнения в режиме реального времени.

3.2 Разработка нейросетевого управления уплотнением асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками

В процессе уплотнения в широком диапазоне меняются статистические характеристики, а также динамические свойства машины. Самонастройка САУ необходима, так как фиксируемые ранее заданные значения параметров рабочего органа асфальтоукладчика не могут обеспечить требуемого качества уплотнения,

поэтому необходима самонастройка САУ [8, 34, 44, 85]. В связи с этим, предложена нейросетевая модель управления рабочими органами асфальтоукладчика. Идентификация рабочих процессов в реальном времени обеспечивается за счет нейросетевой модели непрерывного контроля уплотнением дорожного покрытия и параметров процесса: тип асфальтовой смеси, скорость движения асфальтоукладчика и коэффициент уплотнения.

Задача проектирования модели нейросетевой САУ процесса уплотнения асфальтобетонной смеси рабочим органом асфальтоукладчика с трамбуемым брусом и вибрационной плитой решается на базе основополагающего утверждения, что смесь уплотняется трамбуемым брусом, и повышение коэффициента уплотнения практически прекращается после 5-7 ударов [30, 31, 33, 61, 62]. Число воздействий плиты от установленного на ней вибратора практически не оказывает влияния на увеличение плотности смеси после воздействия трамбуемого бруса, но способствует улучшению качества поверхности уплотненного покрытия [30].

Предложена функциональная схема нейросетевой САУ (рисунок 50). Здесь y – коэффициент уплотнения смеси, полученный после укладчика; g – заданное значение КУ; y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 – переменные на входе нейросетевой системы непрерывного контроля, называемой «Система автоматического контроля уплотнением – САКУ» (тип смеси, скорость асфальтоукладчика, усилие в толкателе трамбуемого бруса, частота трамбуемого бруса, толщина слоя соответственно); v_1, v_2, v_3 – переменные на входе нейросетевого регулятора (тип смеси, скорость движения асфальтоукладчика, толщина слоя соответственно).

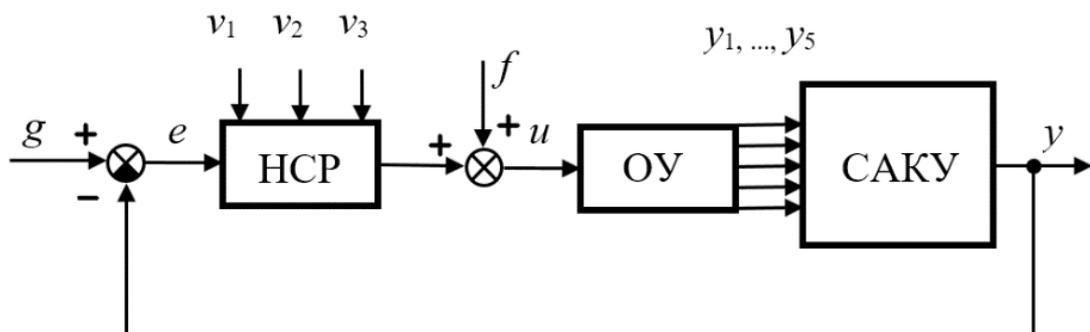


Рисунок 50. Функциональная схема нейросетевой САУ

Объект управления (ОУ) описан с помощью передаточной функции (ПФ) четвертого порядка. ПФ получена по результатам математического моделирования:

$$W(s) = \frac{0,0125 \cdot s^3 + 0,08642 \cdot s^2 + 425,1 \cdot s}{s^4 + 29,41 \cdot s^3 + 1,716 \cdot 10^5 \cdot s^2 + 1,164 \cdot 10^6 \cdot s + 2,99 \cdot 10^9}. \quad (46)$$

Наибольшее распространения в САУ получили ПИД регуляторы. Параметрический синтез таких регуляторов для управления объектами не выше второго порядка хорошо изучен. Но, для систем с объектами высокого порядка (выше второго), задачи синтеза регуляторов являются актуальными [69, 70, 73, 74, 119, 126, 127].

Одним из подходов к проектированию регуляторов для систем высокого порядка является построение инверсной модели, использование ИНС и алгоритма обратного распространения ошибки, т.е. метода инверсного нейруправления [3, 4, 10, 21, 56, 57, 112, 125].

В исследовании принята схема специализированного инверсного нейруправления, в которой для обучения ИНС используется ошибка выхода системы, а входным сигналом может быть случайное воздействие (рисунок 51).

Приняты следующие условия:

- регулируемый сигнал САУ – коэффициент уплотнения;
- регулирующий сигнал – частота колебаний трамбуемого бруса;
- толщина уплотняемого слоя находится в диапазоне 0,04-0,08 м.

На рисунке 51 приняты следующие обозначения: Δ – набор элементов задержки, количество которых должно быть не меньше, чем порядок объекта; ΔW – изменение вектора весов ИНС; $u_m(k)$ – выход инверсной модели; $e_y(k)$ – ошибка выхода системы; Y – выходы объекта управления

$$Y = \{y(k), y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n)\}. \quad (47)$$

Объект управления – процесс взаимодействия рабочего органа асфальтоукладчика (трамбуемый брус – вибрационная плита) и асфальтобетонной смеси. При моделировании полагаем, что известен порядок модели объекта управления, от этого зависит количество задержек на входе ИНС.

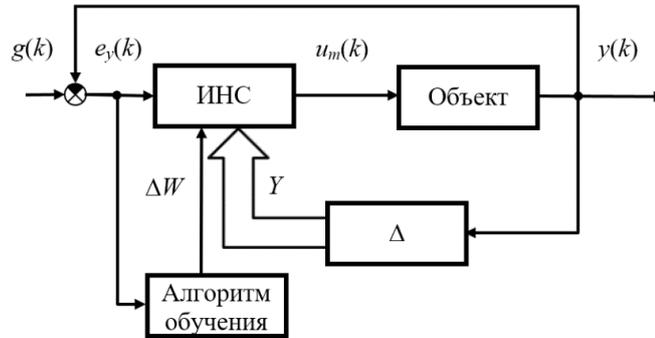


Рисунок 51. Функциональная схема обучения инверсной модели ИНС по ошибке выхода

Полагаем, что объект управления является линейной стационарной динамической системой, описываемой в переменных состояния уравнениями вида:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + Bu; \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (48)$$

где $u \in R^r$ – управляющий вход; $x \in R^n$ – состояние; $y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \in R^m$ – управляемый выход; $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times r}$, $C \in R^{m \times n}$ – числовые матрицы, причем $1 < m \leq r$. Математическая модель объекта управления в пространстве состояний имеет четвертый порядок и подробно описана во второй главе [74].

Для определения коэффициента уплотнения предлагается САКУ на основе ИНС. Данные входного слоя ИНС в режиме реального времени формируются на основе выходных сигналов датчиков, установленных на рабочие органы асфальтоукладчика: тип смеси ($T_{ур}$); скорость укладчика (v); усилие в толкателе трамбуемого бруса (F); частота трамбуемого бруса (f_i). Функциональная зависимость САКУ коэффициента уплотнения (K_y) для асфальтоукладчиков:

$$K_y = \theta(\text{Type}, V, F, f_t,) \quad (49)$$

Нейросетевой регулятор получает три входных переменных – ошибку управления, ее производную и интеграл. При дискретной реализации рассматривается ошибка e_k и ее задержанные значения: e_{k-1} ; e_{k-2} ; e_{k-3} ; e_{k-4} . Объект управления описывается передаточной функцией четвертого порядка. Первый шаг конструирования – получение обратной модели, описывает блок-схема на рисунке 52, где массивы P и T служат для обучения ИНС. Массивы *simout* и *simout1* накапливают обучающие данные модели. Применена трехслойная ИНС прямого распространения с пятью входами и одним выходом.

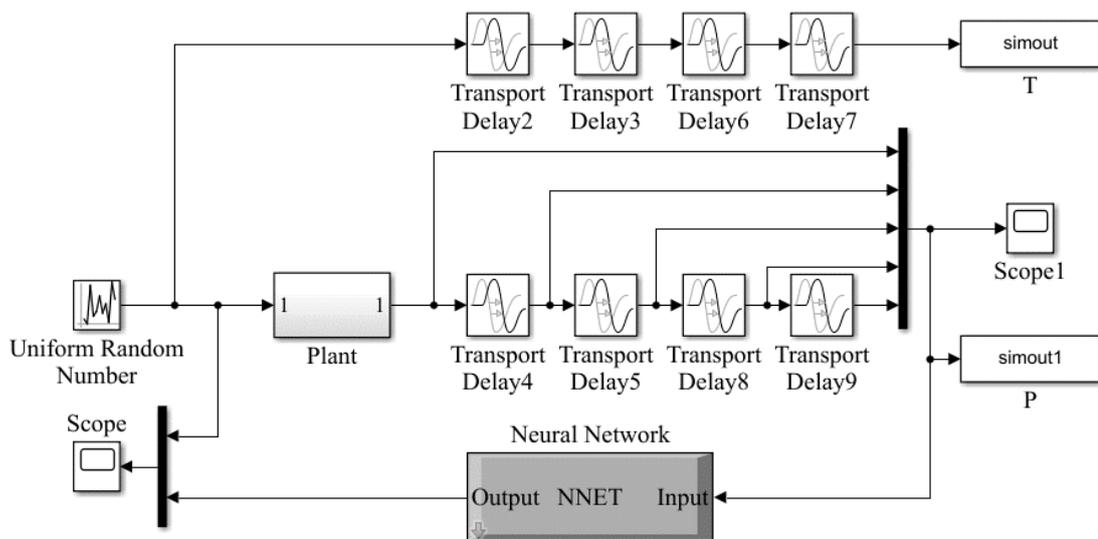


Рисунок 52. Формирование инверсной нейросетевой модели системы управления в программной среде Matlab/Simulink

На рисунке 54 показано формирование обучающей выборки с помощью инверсной модели, включенной на выходе желаемой замкнутой системы. Массив P здесь описывает вход нейросетевого регулятора, а массив T - выход, т. е. заданный выход нейронной сети.

В качестве объекта управления использована имитационная модель (рисунок 53).

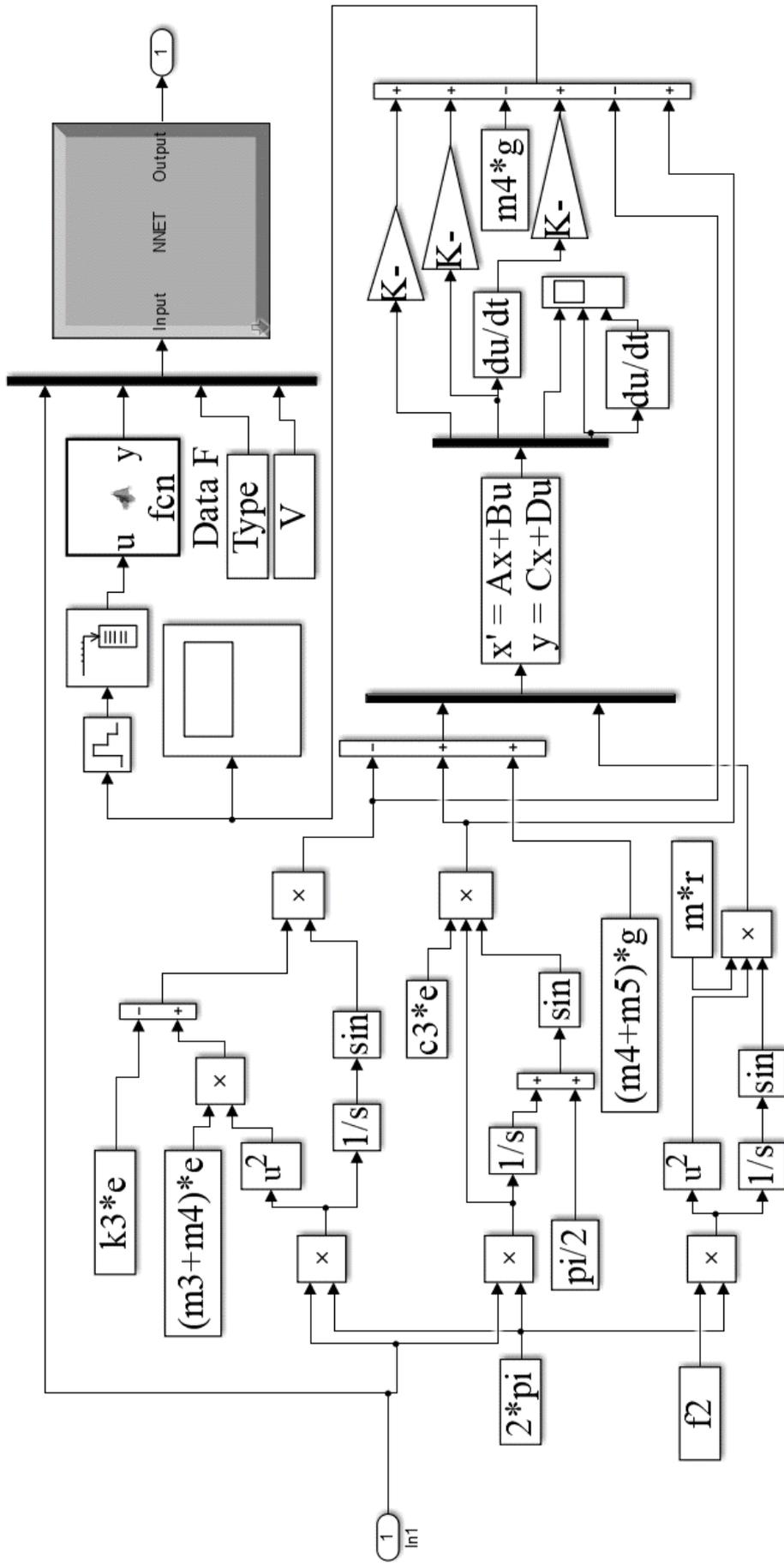


Рисунок 53. Имитационная модель динамической системы «трамбующий брус – вибрационная плита – смесь» и САКУ на основе ИНС

Объект управления построен с помощью метода пространства состояний. На вход модели поступает частота колебаний трамбуемого бруса, а на выходе определяется коэффициент уплотнения.

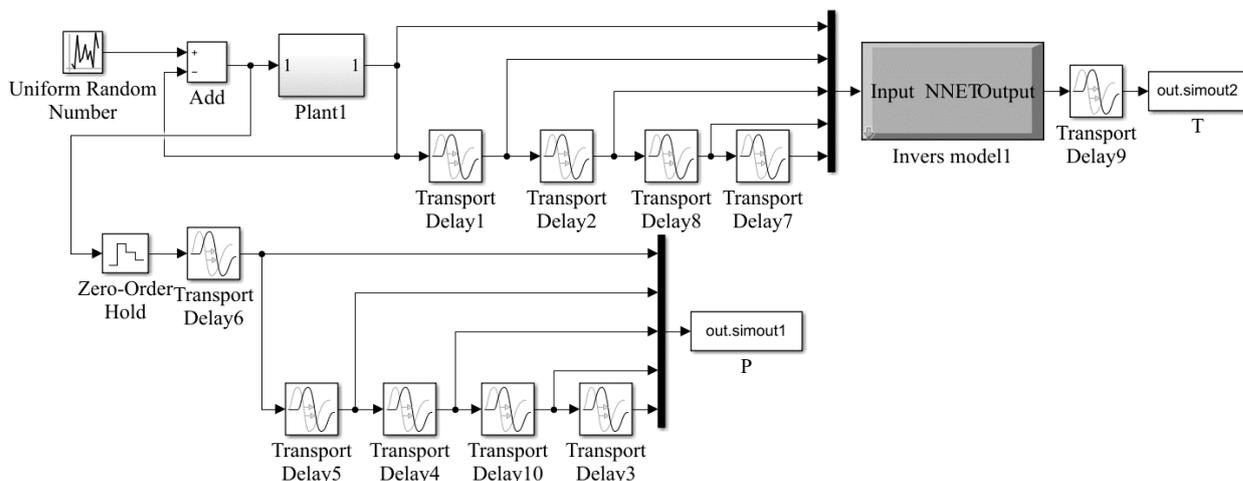


Рисунок 54. Формирование обучающей выборки для нейроконтроллера

После обработки и масштабирования обучающей выборки, выбрана архитектура ИНС, функцией активации которой между входным и скрытым слоями является тангенциальная, а на выходе линейная функция активации. ИНС обучена методом Левенберга-Марквардта в программной среде MATLAB. После обучения нейроконтроллер включается на входе объекта управления (рисунок 55).

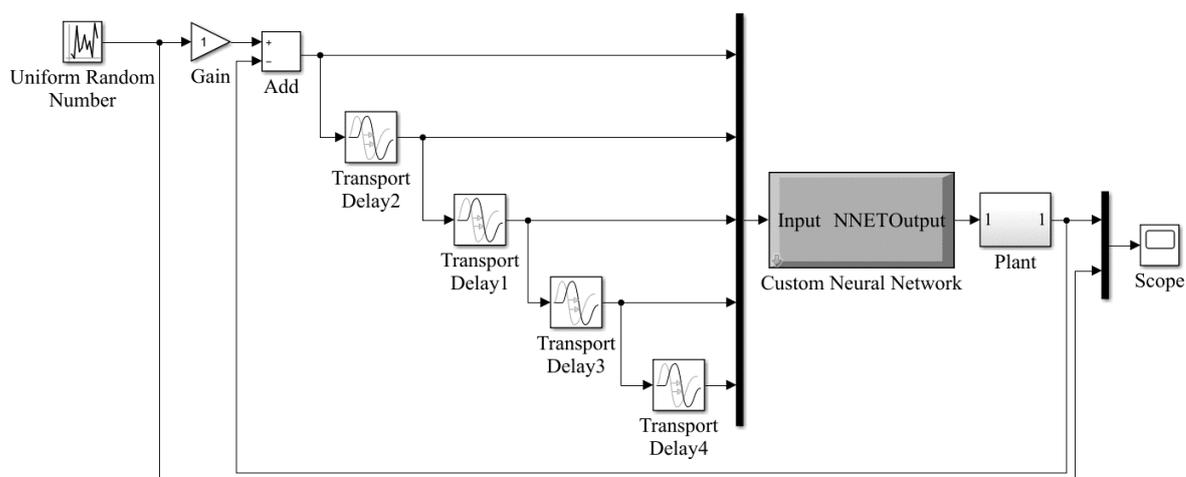


Рисунок 55. Модель системы управления с нейроконтроллером

Сеть обучалась при разных параметрах скорости обучения, количество эпох, количества скрытых слоев и нейронов и других параметрах, для получения наилучшего результата обучения. ИНС имеет 5 нейронов на первом слое, где первый нейрон соответствует ошибке моделирования, а остальные 4 нейрона ее предыдущим значениям по времени. На скрытом слое 10 нейронов, которые показали наилучшее значение MSE равной 0,002795. На выходном слое 1 нейрон, определяющий следующую частоту трамбуемого бруса для достижения желаемого значения коэффициента уплотнения.

Модель САУ состоит из двух ИНС, первая сеть основана на нейросетевом регуляторе частоты колебания трамбуемого бруса, а вторая на методе непрерывного анализа уплотнения (МНАУ) дорожных материалов асфальтоукладчиками (рисунок 56), реализованный в предыдущем разделе.

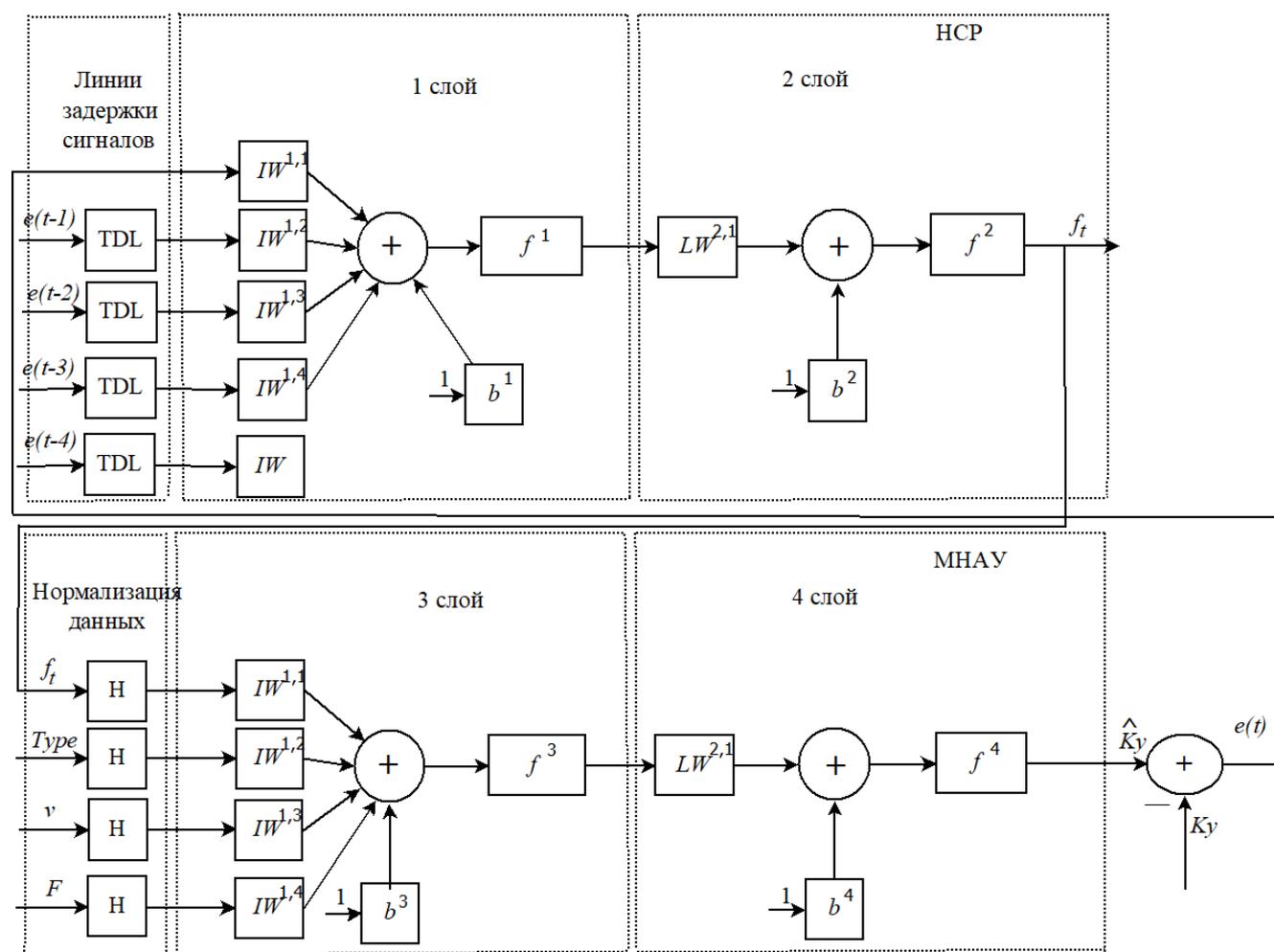


Рисунок 56. Схема интеллектуальной системы управления

Проведенный опыт с объектом четвертого порядка показывает хорошее качество полученных переходных процессов, даже при значительном изменении параметров объекта для системы с инверсным нейроконтроллером. Обученная сеть методом оптимизации Левенберга-Марквардта показывает хорошую согласованность с экспериментальными результатами.

Разработан алгоритм функционирования системы управления уплотнением для асфальтоукладчиков (Рисунок 57). Алгоритм функционирования нейросетевой САУ уплотнением асфальтобетонной смеси асфальтоукладчиком заключается в следующем: до запуска САУ машинистом задаются несколько параметров: тип смеси Туре; рабочая скорость движения асфальтоукладчика v , начальная частота трамбования (по рекомендациям) f_i , заданный коэффициент уплотнения K_u^* . Текущая частота трамбования f_{id} присваивается равной заданной частоте f_i . Далее проверяется условие, включена ли система управления, если нет, то алгоритм заканчивается и управление машиной происходит обычным ручным способом, без управляющего воздействия, определяемое САУ. Если же система включена, то происходит сбор информации за время уплотнения асфальтобетонной смеси асфальтоукладчиком в течение 1-3 мин. Информация об усилии на трамбуемом бруске, скорость v , тип смеси Туре, частота трамбования f_{id} , в виде вектора данных подаются на вход ИНС системы автоматического контроля уплотнения. Эта сеть обучена рассчитывать коэффициент уплотнения асфальтобетонной смеси. Определяется K_u . Далее идет проверка, соответствует ли полученный расчетом коэффициент уплотнения заданному (требуемому). Величина отклонения равна 1%. В случае соответствия, текущая частота f_{id} остается без изменений. В случае несоответствия K_u заданному значению, определяется ошибка e , которая подается на вход нейросетевого регулятора. Нейросетевой регулятор определяет управляющий сигнал u , поступающий далее на исполнительный механизм (регулируемый дроссель) гидравлического привода, изменяющего значение частоты трамбуемого бруса f_{id} .

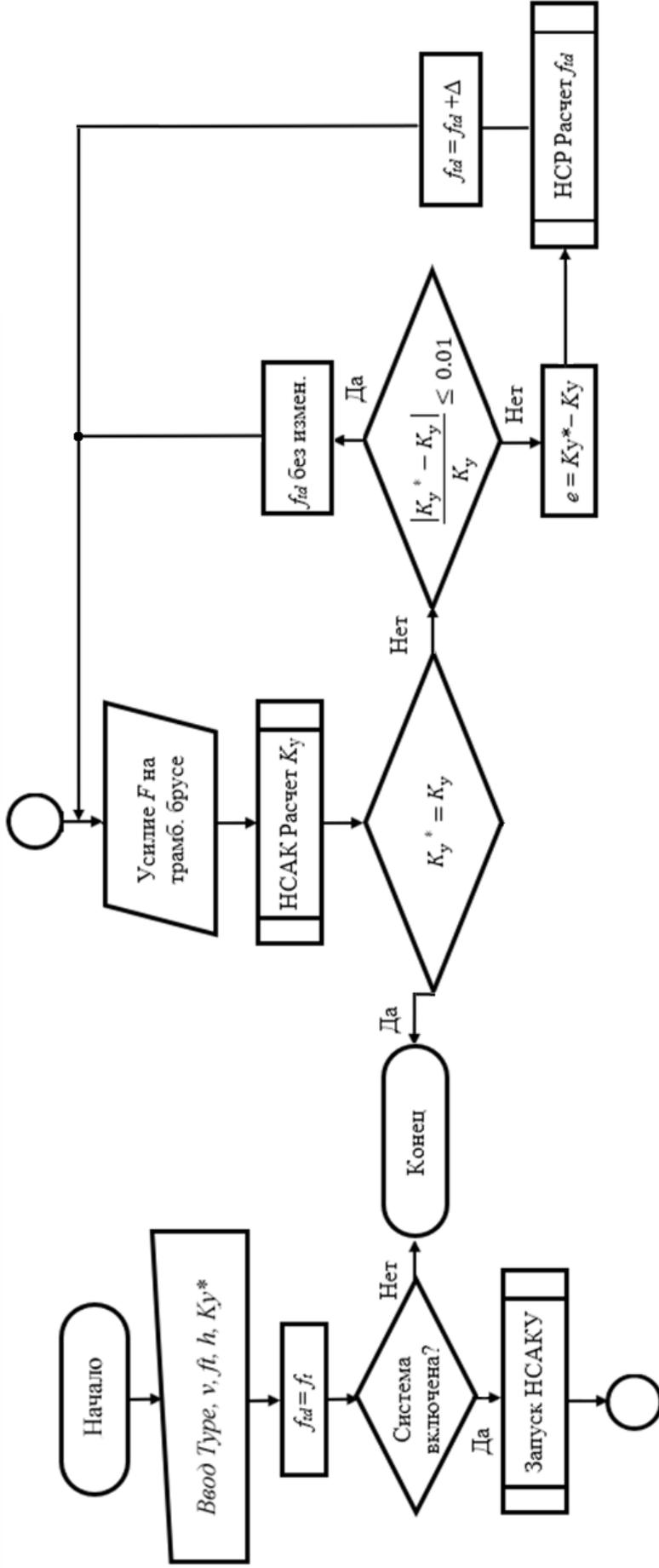


Рисунок 57. Блок-схема алгоритма управления в реальном времени

Моделирование нейросетевой системы управления было выполнено средствами программы MATLAB/Simulink. Используются исходные данные асфальтобетонной смеси типа А, рабочего органа асфальтоукладчика с трамбуемым брусом и вибрационной плитой. Скорость движения асфальтоукладчика – 3 м/мин. Заданное значение коэффициента уплотнения изменялось ступенчато – 0,94, 0,96, 0,98, 0,95. Переходные процессы в системе при подаче ступенчатого сигнала на вход системы при различных скоростях движения асфальтоукладчика показаны на рисунке 58 (пунктирная линия – входной сигнал, сплошная линия – выход системы с нейроконтроллером).

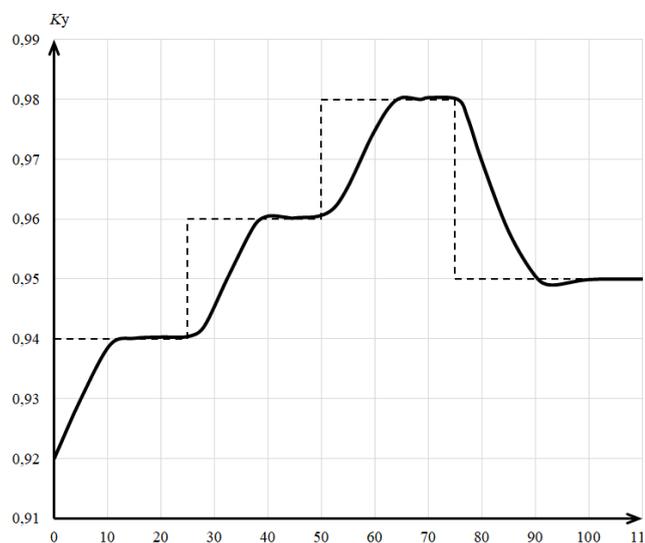


Рисунок 58. Переходная характеристика системы управления с нейросетевым, регулятором

Проведенные опыты для системы с инверсным нейроконтроллером и объектом четвертого порядка показывают хорошее качество полученных переходных процессов. Время регулирования переходного процесса от одного установившегося состояния к другому составляет от 10 до 15 с, что удовлетворяет условиям на проектирование. Переходный процесс с небольшим перерегулированием

Таким образом, предложенная модель нейросетевой системы управления для асфальтоукладчиков, позволяет повысить эффективность процесса уплотнения за

счет автоматического регулирования коэффициента уплотнения изменением частоты колебаний трамбуемого бруса. Использование регулятора на основе искусственной нейронной сети повышает качество прогнозирования режимных параметров уплотняющего рабочего органа. Предложенный способ определения коэффициента уплотнения на базе ИНС может улучшить условия работы оператора по ручному выбору оптимальных режимных параметров. Также, данный способ может быть использован для вибрационных и асфальтовых катков.

3.3 Выводы

Реализация концепции ВІМ-технологий в дорожно-строительных работах предполагает применение асфальтоукладчиков и вибрационных катков с приборами интеллектуального уплотнения, а также с системами непрерывного контроля работающие комплексно. Данные системы должны поддерживать технологии глобальной навигации GPS/ГЛОНАСС и радиосвязи, что значительно повышает эффективность строительства автомобильных дорог.

Предложены варианты внедрения концепции интеллектуализации систем непрерывного контроля и управления технологическими процессами строительства дорожных материалов асфальтоукладчиками.

Разработан метод непрерывного контроля уплотнения дорожных материалов для асфальтоукладчиков на основе параметров рабочего процесса: частоты трамбуемого бруса, усилия в толкателе, скорости движения укладчика и типа смеси. Обученная сеть представляет собой многослойную нейронную сеть прямого распространения с методом оптимизации Levenberg Marquardt. Данный метод позволяет прогнозировать коэффициент уплотнения в режиме реального времени. Высокая точность сети была достигнута при скорости обучения 0,01 на 87 эпохе при 10 нейронах в скрытом слое.

Разработана система прогнозирования качества уплотнения дорожных материалов для асфальтоукладчиков на основе спектрального анализа виброускорений вибрационной выглаживающей плиты, а также типа смеси, усилия

в толкателе и скорости движения укладчика. Разработан алгоритм обработки сигналов ускорения вибрационной выглаживающей плиты асфальтоукладчика. Обученная сеть представляет собой многослойную нейронную сеть прямого распространения с методом оптимизации масштабируемых сопряженных градиентов. Высокая точность сети была достигнута при скорости 0,01 на 59 эпохе при 50 нейронах в первом скрытом слое и 20 нейронах во втором скрытом слое. Оценена точность прогнозирования коэффициент уплотнения в полевых условиях во время уплотнения асфальтобетонного покрытия где средняя относительная ошибка составляет менее 2%.

Разработан новый метод нейросетевого управления уплотнением асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками, позволяющий регулировать коэффициент уплотнение. Разработан алгоритм функционирования системы управления уплотнением для асфальтоукладчиков. Данный метод состоит из двух ИНС, первая сеть основана на нейросетевом регуляторе частоты колебания трамбующего бруса, а вторая сеть на нейросетевой системе непрерывного контроля уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками. Сеть обучена методом Levenberg Marquardt, где среднеквадратичная ошибка равна 0,002795.

4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ УПЛОТНЕНИЕМ ДЛЯ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОВ

Киберфизическая дорожно-строительная система включает машины (асфальтоукладчики, дорожные катки среднего и тяжелого типа), датчики и информационные системы, которые объединяются на всех этапах строительства дорожных покрытий (приема смеси из автосамосвала, укладка и предварительное уплотнение рабочим органом укладчика, уплотнение слоев вибрационными катками среднего типа, окончательное уплотнение статическими катками тяжелого типа) и непрерывно взаимодействуют, используя стандартные интернет-протоколы для прогнозирования коэффициента уплотнения и адаптации к изменениям характеристик асфальтобетонной смеси и окружающей среды (температура и скорость движения воздуха).

Структурная схема киберфизической дорожно-строительной системы непрерывного неразрушающего контроля и управления уплотнения дорожных покрытий, имеющая иерархические слои: присоединение, преобразование, облако хранения, изучение и конфигурация, показана на рисунке 59.

Слой «присоединение» характеризуется выбором и установкой измерительных преобразователей (датчиков). В слое «преобразования» сигналы от датчиков подвергаются анализу и обработке, при которой все входные данные проходят процесс «масштабирования».

Большие объемы текущей технологической информации хранятся на облачных серверах. Это позволяет осуществлять информационный поток и связь между дорожно-строительными машинами (асфальтоукладчиками и дорожными катками) в онлайн режиме для оптимизации технологического процесса с учетом

изменяющегося состояния окружающей среды и характеристик уплотняемого слоя дорожного покрытия [77].

В иерархическом слое «изучения» определяются результаты измерений и прогнозирования, которые становятся доступными заинтересованным специалистам, используются для теоретического анализа с помощью математической модели объекта для дальнейшей настройки оптимальных режимов работы.

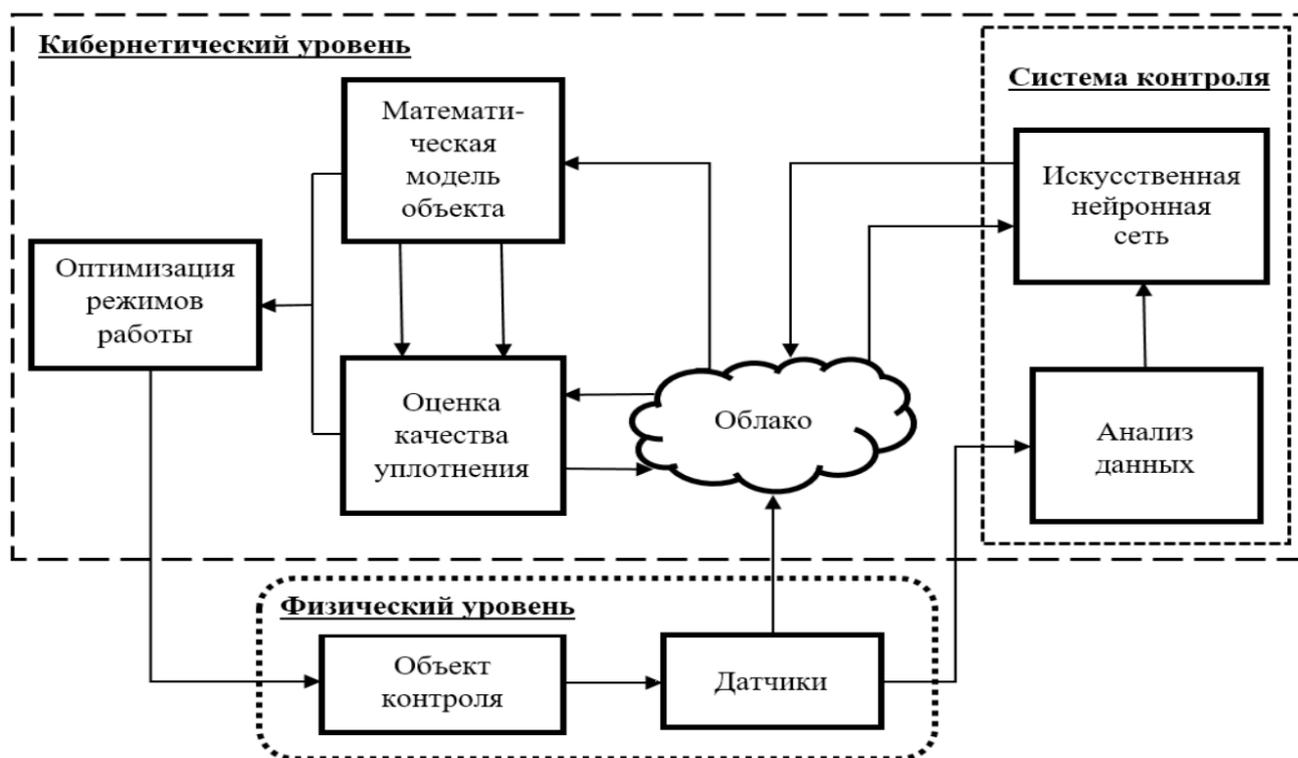


Рисунок 59. Киберфизическая система непрерывного контроля уплотнения дорожного покрытия

Проведены работы по подготовке экспериментальных измерений динамических параметров с помощью программно-технических средств (рисунок 60) в полевых условиях на объекте дорожного строительства Красноярского края на автомобильной дороге Березовского района, а также на 19 км дороги от Красноярска в сторону с. Кача.

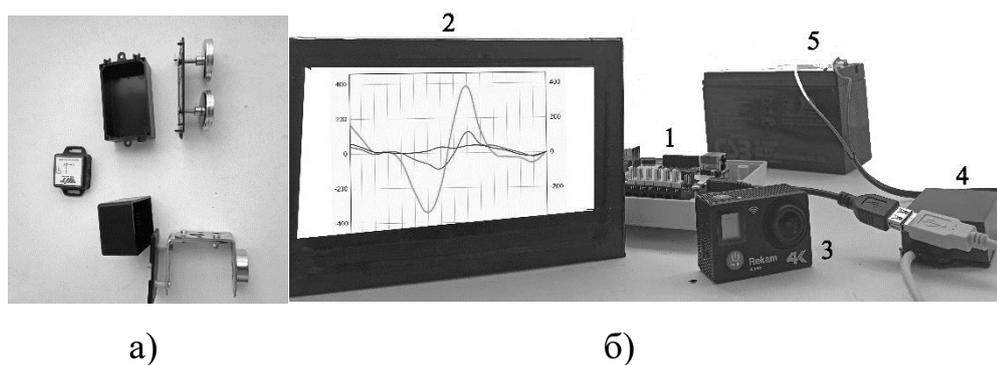


Рисунок 60. Фотографии программно-технических средств использованных в полевых условиях: а) датчик акселерометр с корпусом и магнитом; б) 1 – мини-компьютер с программируемым контроллером, 2 – дисплей с тач-панелью, 3 – фото/видео экшн-камера, 4 – преобразователь напряжения и тока, 5 – аккумулятор

Применение нейросетевых систем непрерывного контроля и управления уплотнением на российских моделях асфальтоукладчиков позволит повысить эффективность управления рабочим процессом уплотнения. Таким образом, проектирование такой системы, которое учитывает современное развитие систем навигации ГЛОНАСС и GPS, сервисов сети Интернет, цифровой автоматике, помогает дорожно-строительной отрасли подготовиться к внедрению технологий информационного моделирования автомобильных дорог (концепция BIM технологии) [5, 77]. Регулирование рабочих режимов асфальтовых катков и укладчиков с применением цифровой информационной модели объекта строительства, контроль качества уплотнения и документирование результатов дорожного строительства в режиме реального времени являются важнейшими функциями, чтобы реализовать BIM технологии.

Состав приборов для модели информационных процессов системы нейросетевого непрерывного контроля и управления уплотнением дорожных материалов для асфальтоукладчиков представлен на рисунке 61.

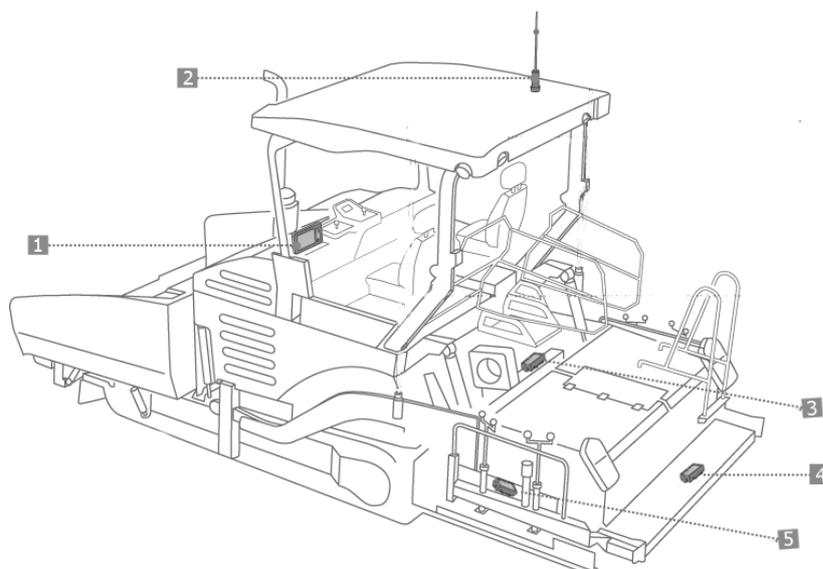


Рисунок 61. Асфальтоукладчик с системой нейросетевого непрерывного контроля и управления: 1 – контроллер (блок управления) с дисплеем; 2 – приборы глобальной навигации ГЛОНАСС/GPS; 3 – датчик углового положения; 4 – датчик ускорения (акселерометр); 5 – тензометрический преобразователь

Контроллер с блоком управления на базе Intel используется для ввода параметров процесса, таких как рабочие параметры асфальтоукладчика, параметры дорожного материала и т.д., а также систему сбора и хранения данных в режиме реального времени.

Приборы глобальной навигации GPS или ГЛОНАСС должны обладать субметровой точностью в измерениях и способностью непрерывно выполнять обновления. В виде стандартной строки NEMA представлен интерфейс системы связи, и система имеет способность извлекать долготу и широту местоположения уплотнителя.

Чтобы определить ускорение выглаживающей виброплиты, система обеспечивается акселерометром. Выход акселерометра – аналоговое напряжение от 0 до 5 В. Вертикальное ускорение следует измерять с частотой 1кГц (один раз за 1 мс). Предполагается применение трехосного акселерометра с модулем приема и передачи данных по Bluetooth, который способен определять ускорение 10g с частотой 10 кГц.

Датчик углового положения, который имеет переключатели задатчика стабилизирующего угла и индикатор ошибки. Датчик должен иметь возможность производить измерения на высокой скорости вращения и высокую точностью (с погрешностью 0,5 градусов).

Тензометрический датчик производит сигнал, который пропорционален усилию в металлоконструкции трамбуемого бруса, поступающий на вход блока управления. Датчик должен иметь высокую точность измерения усилия.

Функциональные требования модели информационных процессов системы нейросетевого непрерывного контроля и управления уплотнением дорожных материалов для асфальтоукладчиков можно разделить на следующие подгруппы:

- эксплуатационные требования;
- распознавание данных приборов;
- калибровка системы нейросетевого непрерывного контроля и управления;
- пользовательский дисплей и запись данных;
- учебная и пользовательская документация.

Требования к распознаванию. Необходимо создать контрольно-измерительную систему, которая будет считывать и преобразовывать данные, полученные с приборов, установленных на асфальтоукладчик. Выполняется распознавание и обработка в режиме реального времени следующих данных: местоположение асфальтоукладчика на объекте дорожного строительства; температуры уплотняемой поверхности; состояние рабочих уплотняющих органов укладчика; максимального усилия в толкателе трамбуемого бруса; параметры уплотняемого материала и т.д.

Эксплуатационные требования. Необходимо обеспечить высокую скорость обработки данных и вывода необходимых значений параметров и характеристик на дисплей оператора. Система должна обновлять не реже одного раза в секунду информацию о параметрах рабочего процесса, в зависимости от выбранного режима вывода информации. Машинист асфальтоукладчика должен видеть на дисплее значение коэффициента уплотнения. Ошибка в расчетной плотности смеси и фактической, измеренной точечным способом, должна быть в пределах

допустимой погрешности. Приборная часть модели информационных процессов системы нейросетевого непрерывного контроля и управления уплотнением дорожных материалов для асфальтоукладчиков должна быть размещена в прочном корпусе, который проверяется на вибрацию и удар, а также на такие переменные среды, как температура и влажность.

Требования к калибровке. Для настройки модели информационных процессов системы нейросетевого непрерывного контроля и управления уплотнением дорожных материалов для асфальтоукладчиков требуется подробная процедура (правила) калибровки. Это необходимо для уменьшения погрешности между ожидаемой и полученной плотностью смеси. Процедура должна предусматривать калибровку в дорожных условиях с использованием точечных приборных измерений плотности покрытия. После ввода измеренных данных процесс калибровки должен быть автоматическим и обеспечивать получение требуемых текущих данных процесса уплотнения смеси асфальтоукладчиком.

Требования к пользовательскому дисплею и записи данных. Дисплей модели информационных процессов системы нейросетевого непрерывного контроля и управления уплотнением дорожных материалов для асфальтоукладчиков должен отображать информацию в режиме реального времени о расположении асфальтоукладчика на строительном участке. Информация о степени уплотнения должна быть в цифровом формате. Данные о результатах уплотнения смеси, включая время, широту, долготу, температуру, должны храниться в виде текстовой информации (файла) для последующей обработки и анализа.

Учебная и пользовательская документация. В данном требовании разрабатывается руководство пользователя модели информационных процессов системы нейросетевого непрерывного контроля и управления уплотнением дорожных материалов для асфальтоукладчиков.

САУ рабочим органом асфальтоукладчика с нейроконтроллером уплотнения выглядит следующим образом: сигнал ошибки, который пропорционален величине отклонения рабочего органа асфальтоукладчика от гравитационной вертикали измеряется датчиком углового положения. С выхода датчика углового положения

сигнал ошибки попадает на первый вход блока управления. Сигнал ошибки, который пропорционален уровню отклонения рабочего органа от положения, установленного копиром, измеряется датчиком высотного положения. С выхода датчика высотного положения сигнал ошибки попадает на второй вход блока управления. Тензометрический датчик измеряет сигнал, который пропорционален усилию в металлоконструкции трамбуемого бруса, поступающий с выхода тензометрического преобразователя (датчика) на третий вход блока управления и вход блока анализатора уплотнения. Колебания вибрационной плиты преобразуются акселерометром в выходной сигнал, поступающий на вход блока спектрального преобразователя. Сигналы управления дискретными гидравлическими приводами вырабатываются блоком управления для сведения текущих ошибок к нулю. Показатели частоты и длительности управляющих сигналов напрямую связаны с величиной ошибки. Блок анализатора уплотнения на основе выходных сигналов с тензометрического датчика, датчика ускорения после спектрального преобразования Фурье в блоке, сигнала тахогенератора, определяет текущее значение коэффициента уплотнения дорожных материалов.

Нейросетевая система автоматического управления уплотнением дорожных материалов асфальтоукладчиками работает следующим образом: сигнал ошибки, который пропорционален величине отклонения рабочего органа асфальтоукладчика от гравитационной вертикали измеряется датчиком углового положения. С выхода датчика углового положения сигнал ошибки передается на первый вход блока управления. Сигнал ошибки, который пропорционален величине отклонения рабочего органа от положения, установленного копиром, измеряется датчиком высотного положения. С выхода датчика высотного положения сигнал ошибки передается на второй вход блока управления. Тензометрический преобразователь измеряет сигнал, который пропорционален усилию в металлоконструкции трамбуемого бруса, поступающий с выхода тензометрического преобразователя на третий вход блока управления и вход блока анализатора уплотнения. Колебания вибрационной плиты преобразуются акселерометром в выходной сигнал, поступающий на вход блока спектрального

преобразователя. Сигналы управления дискретными гидравлическими приводами вырабатываются блоком управления для сведения текущих ошибок к нулю. Показатели частоты и длительности управляющих сигналов напрямую связаны с величиной ошибки. Блок управления вырабатывает сигналы управления дискретными гидравлическими приводами для сведения текущих ошибок к нулю. Длительность и частота управляющих сигналов зависит от величины ошибки. Блок анализатора уплотнения на основе выходных сигналов с тензометрического датчика, датчика ускорения после спектрального преобразования Фурье в блоке, сигнала тахогенератора, определяет текущее значение коэффициента уплотнения дорожных материалов. Блок управляющего устройства на основе искусственной нейронной сети получает на вход выходной сигнал блока анализатора уплотнения, тахогенератора, и определяет оптимальные режимные параметры уплотняющего рабочего органа асфальтоукладчика – частоту трамбуемого бруса, частоту вибрационной плиты, для автоматического их изменения за счет использования дискретных гидравлических приводов.

С целью проверки адекватности разработанной имитационной модели нейросетевой системы управления уплотнением и работоспособности аппаратно-программного комплекса выполнено экспериментальное исследование в полевых условиях строительства автомобильной дороги в пригороде г. Красноярска (рисунок 62). Укладывалась крупнозернистая асфальтобетонная смесь, верхний слой, толщиной 50 мм, шириной покрытия 3,6 м, рабочим органом укладчика Vogele Super 1600-2. Температура смеси за рабочим органом укладчика 130 – 135 С. Определялись временные зависимости ускорения вибрационной плиты рабочего органа укладчика при уплотнении асфальтобетонной смеси верхнего слоя дороги. По полученным данным средствами аппаратно-программного комплекса прогнозировался коэффициент уплотнения смеси.



Рисунок 62. Полевые работы

Результаты полевых и лабораторных исследований процесса уплотнения при укладке смеси приведены в таблице 10.

Таблица 10. Результаты процесса уплотнения дорожного покрытия в ДНТ «Элита»

Режимные параметры укладчика		Степень уплотнения, %		
Частота трамб. бруса, Гц	Частота вибр. плиты, Гц	Метод непрерывного анализа	Система прогнозирования	Лабораторные данные
18	40	93,1	95,3	97,9
15	35	92,4	93,6	95,4
12	30	90	96,3	93,3

Аппаратно-программный комплекс, использованный в производственной деятельности ООО «ЦИЕС» (г. Красноярск), позволил повысить производительность и улучшить качество уплотнения АБ смеси асфальтоукладчиком в режиме реального времени за счет автоматического регулирования КУ изменением частоты колебания трамбуемого бруса (подтверждено актом внедрения).

4.1 Выводы

Важной задачей эффективного управления процессом строительства автомобильной дороги является установление и поддержание динамического взаимодействия строительных машин с дорожными материалами. Развитие информационных технологий, компьютерных сетей способствует повышению технического уровня строительных отраслей. Обеспечение требований к качеству асфальтобетонных покрытий возможно за счет внедрения цифровизации и интеллектуализации дорожно-строительной отрасли, развития САУ.

У заявляемого технического решения преимущество состоит в повышении производительности и эффективности дорожно-строительных работ, а также в увеличении эффективности автоматического управления асфальтоукладчика. Чтобы этого добиться, осуществляется непрерывное автоматическое управление процессом уплотнения с помощью акселерометра, который установлен на виброплите рабочего органа, спектрального преобразователя для анализа спектров ускорения вибрационной плиты, датчика скорости (тахогенератор) асфальтоукладчика, анализатора уплотнения на основе искусственной нейронной сети прогнозирующий коэффициент уплотнения дорожных материалов, управляющего устройства на основе искусственной нейронной сети, автоматически изменяющего режимные параметры – частоту трамбуемого бруса и частоту вибрационной плиты, через гидравлические приводы без участия в управлении процессом уплотнения машиниста.

Программный продукт будет иметь удобный и интуитивно понятный интерфейс взаимодействия с машинистом асфальтоукладчика, позволит повысить качество обработки информационных сигналов, их обработки и безопасности хранения. Также, возможность дистанционного мониторинга процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками и дорожными катками. В системе будет возможность формирования отчетов о результатах строительства и визуальное представление объекта с помощью систем GPS/ГЛОНАСС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы является повышение производительности процесса уплотнения асфальтобетонных смесей при укладке дорожных покрытий за счет автоматизации регулирования коэффициентом уплотнения на основе обученной нейронной сети.

По результатам анализа технологического процесса строительства дорожных асфальтобетонных покрытий, методов, моделей и технологий неразрушающего контроля уплотнения дорожных материалов, предложен новый метод контроля и управления уплотнением в процессе укладки асфальтобетонных смесей.

Основные итоги выполненного исследования заключаются в следующем:

Получена модифицированная имитационная модель процесса уплотнения дорожных материалов рабочим органом асфальтоукладчика, позволяющая определять максимальное усилие трамбуемого бруса, перемещение, скорость и ускорение вибрационной плиты, а также выполнять спектральный анализ сигналов вертикального ускорения вибрационной плиты на основе БПФ.

Разработан метод непрерывного анализа уплотнения асфальтобетонных смесей на основе нейронных сетей, отличающийся учетом усилия в толкателе трамбуемого бруса, и система прогнозирования качества уплотнения при укладке АБ смесей, отличающаяся от известных учетом усилия в толкателе трамбуемого бруса и вертикального ускорения колебаний вибрационной плиты укладчика. В результате реализации метода определяется коэффициент уплотнения в режиме реального времени. Средняя относительная ошибка точности прогнозирования составляет менее 5 %.

Разработан новый метод нейросетевого управления уплотнением АБ смесей асфальтоукладчиками на основе инверсной нейросетевой модели с учетом заданного значения, дающий возможность автоматизировать управление

коэффициентом уплотнения путем изменения частоты колебания трамбуемого бруса рабочего органа асфальтоукладчика. Система управления позволяет изменять режимы работы машины для получения коэффициента уплотнения с учетом заданного значения, улучшает организацию управления технологическими процессами при строительстве дорожных покрытий.

На основе результатов исследования предложено алгоритмическое и аппаратно-программное обеспечение автоматизации для создания прибора непрерывного нейросетевого контроля уплотнения и нейросетевого контроллера системы управления коэффициентом уплотнения в процессе укладки асфальтобетонных смесей. Использование этих средств позволит сэкономить 10 - 30 % финансовых затрат на строительство автомобильных дорог за счет оптимизации технологических процессов, повышения производительности и качества дорожных покрытий.

Список сокращений и условных обозначений

IC – intelligent compaction – интеллектуальное уплотнение.

ССС – continues compaction control – непрерывный контроль уплотнением.

СМV – compaction measurement value (значение измерения уплотнения) – показатель степени уплотнения.

ССV – continuous compaction value (контрольное значение уплотнения) – показатель степени уплотнения.

IACA – Intelligent Asphalt Compaction Analyzer – интеллектуальный анализатор уплотнения асфальта.

АСЕ – Amman Compaction Expert – электронная измерительная и управляющая система для вибрационных катков и плит.

ICMV – Intelligent Compaction Measurement Value – показатель измерения интеллектуального уплотнения.

DCP – Dynamic Cone Penetration – динамический конусный плотномер.

NDG – Nuclear density gauge – Радиоизотопный плотномер.

RMV – резонансный показатель уплотнения.

ИНС – искусственная нейронная сеть.

ЭВМ – электронно-вычислительная машина.

СФУ – Сибирский федеральный университет.

САУ – система автоматического управления.

ОУ – объект управления.

ПФ – передаточная функция.

САКУ – система автоматического контроля уплотнением.

НСР – нейросетевой регулятор.

БПФ – быстрое преобразование Фурье.

ЭВМ – электронно-вычислительная машина.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Adam, D. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control: State of the art overview and recent developments / D. Adam, J. Pistol // Austria: Institute of Geotechnics. – 2016. – P. 1-41.
2. An, Z. Dynamic optimization of compaction process for rockfill materials / Z. An, T. Liu, Z. Zhang et al. // Automation in Construction. – 2020. – Vol. 110. – 20 p.
3. Anderegg, R. Compaction monitoring using intelligent soil compactors / R. Anderegg, D. A. von Felten, K. Kaufmann // Atlanta: in Proceedings of the GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. – 2006.
4. Anderegg, R. Intelligent compaction with vibratory rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control / R. Anderegg, K. Kaufmann // Journal of the Transportation Research Board. – 2004. – Vol. 1868. – P. 124-134.
5. Anderl, R. Smart Engineering – Interdisziplinäre Produktentstehung / R. Anderl, M. Eigner, U. Sandler, R. Stark, // Acatech Diskussion. Springer. – 2012. – 58 p.
6. Barman, M. Quality control of subgrade soil using intelligent compaction / M. Nazari, S. A. Imran, S. Commuri, M. Zaman, F. Beainy, D. Singh // Innovative infrastructure solutions. – 2016. – №23. – P. 23.
7. Barman, M. Use of intelligent compaction in detecting and remediating under-compacted spots during compaction of asphalt layers et al / M. Barman, S. A. Imran // Problems with innovative and cutting-edge technologies. – 2018. – № 978. – P. 131-141.
8. Bian, Y. Automatic rolling control for unmanned vibratory roller based on fuzzy algorithm / Y. Bian, X. Fang, M. Yang, Z. Zhao // Journal of Tongji University. – 2017. – № 45. – P. 1831–1838.
9. Bretreger, A. Field density testing by using a nuclear density gauge / A. Bretreger // Technical Guide L-G-002. – 2015. – P. 21.
10. Burakov, M.V. Synthesis of neural regulator / M.V. Burakov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 1999. – Т. 38. № 3. – С. 469-474.

11. Chang, G. K. Leveraging intelligent compaction and thermal profiling technologies to improve asphalt pavement construction quality / G. K. Chang, K. Mohanraj, et al // A case study. Transportation research record journal of the transportation research board. – 2018. – № 2672. – P. 48-56.
12. Commuri, S. Advances in Intelligent Compaction of AC Pavements / S. Commuri, M. Zaman // University of Oklahoma. – 2007. – P. 40.
13. Commuri, S. Calibration procedures for the intelligent asphalt compaction analyzer / S. Commuri // Patent Application, USPTO, № 20100172696, 2009.
14. Commuri, S. Method and apparatus for predicting the density of asphalt / S. Commuri, M. Zaman // Journal of the Acoustical Society of America. – 2010. – № 128.
15. Darekar, R. V. Emotion recognition from Marathi speech database using adaptive artificial neural network / R. V. Darekar, A. P. Dhande // Biologically Inspired Cognitive Architectures. – 2018. – Vol. 23. – P. 35-42.
16. Demuth, H. Neural Network Toolbox User's Guide / H. Demuth, M. Bale, M. Hagan // The Mathworks. – 2006. – 209 p.
17. Devriendt, C. Operational modal analysis in the presence of harmonic excitations by the use of transmissibility measurements / C. Devriendt, G. De Sitter, S. Vanlanduit, P. Guillaume // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – Vol. 23. – P. 621-635.
18. Dighe, P. Sparse modeling of neural network posterior probabilities for exemplar-based speech recognition / P. Dighe, A. Asaei, and H. Bourlard // Speech Communication. – 2016. – Vol. 76. – P. 230-244.
19. Fang, X. Development of a path following control model for an unmanned vibratory roller in vibration compaction / X. Fang, Y. Bian at al // Advances in mechanical engineering. – 2018. – № 10 (5). – P. 1-16.
20. Goodfellow, I. Deep Learning [Электронный ресурс] / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville // MIT press. – 2016. – P. 13-15 – Режим доступа: <https://mitpress.mit.edu/books/deep-learning>.
21. Hagan, M.T. Neural networks for control / M.T. Hagan, H.B. Demuth // San Diego: proceedings of the 1999 American Control Conference. – 1999. – P. 1642-1656.

22. Hecht-Nielsen, R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem / R. Hecht-Nielsen // San Diego: IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks. – 1987. – Vol. 3. – P. 11-13.
23. Heinz, F. T. Continuous compaction control, European workshop compaction of soils and granular materials / F. T. Heinz, A. Sandstrom // European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials. – Paris, may 19th 2000. – P. 237-246.
24. Hsieh, K. H. Overview of vibrational structural health monitoring with representative case studies / K. H. Hsieh, M. W. Halling, P. J. Barr // Journal of Bridge Engineering. – 2006. – Vol. 11. – P. 707-715.
25. Hu, W. Field investigation of intelligent compaction for hot mix asphalt resurfacing / W. Hu, X. Shu, B. Huang, M. Woods // Frontiers of structural and civil engineering. – 2017. – №1 – P. 47-55.
26. Hu, W. Field investigation of intelligent compaction for hot mix asphalt resurfacing frontiers of structural and civil engineering / X. Shu, B. Huang, M. Woods // Frontiers of Structural and Civil Engineering. – 2017. – T. 11. – P. 47-55.
27. Imran, S. A. Artificial neural network–based intelligent compaction analyzer for real-time estimation of subgrade quality / S. A. Imran, M. Barman, S. Commuri et al. // International Journal of Geomechanics. – 2018. – Vol. 18. – 6 p.
28. Jian, Sun. Dynamics modeling and analysis of paver screed based on computer simulation / Sun Jian, Xu Guiyun // Journal of Applied Sciences. – 2013. – № 13. – P. 1059-1065.
29. Kenneally, B. Finite element analysis of vibratory roller response on layered soil systems / O. M. Musimbi, J. Wang // Computers and geotechnics. –2015. – № 67. – P. 73-82.
30. Kizryakov, A. N. Determination of parameters of vibration compacting bodies of asphalt pavers / A. N. Kizryakov, V. V. Kabanov, P. A. Fruit // Trudy Vniistroydormash. – 1986. – Vol. 107. – P. 63-68.

31. Kizryakov, A. N. Research of compacting working bodies of pavers / A. N. Kizryakov, V. V. Kabanov, P. A. Fruit // *Trudy Vniistroydormash.* – 1985. – Vol. 102. – P. 3-7.
32. Kolmogorov, A. N. On the Representation of Continuous Functions of Many Variables by Superposition of Continuous Functions of One Variable and Addition / A. N. Kolmogorov // *Soc. Transl.* – 1963. – №28. – P. 55-63.
33. Kustarev, G. V. High-Performance complexes for high-speed construction of asphalt concrete coatings: monograph / G. V. Kustarev, S. A. Pavlov, A. V. Ushkov. – Moscow: MADI, 2019. – 140 p.
34. Kyung-Joon, P. Cyber-physical systems: milestones and research challenges / P. Kyung-Joon, R. Zheng, X. Liu // *Computer Communications.* – 2012. – № 36. – P. 1-7.
35. Li, B. Operational modal identification using variational Bayes / B. Li, A. Der // *Kiureghian Mechanical Systems and Signal Processing.* – 2017. – Vol. 88. – P. 377-398.
36. Li, J. Dynamic characteristics of the vibratory roller test-bed vibration isolation system: simulation and experiment / Z. Zhang, H. J. Xu // *Terramechanics* – 2014. – № 56. – P. 139-156.
37. Li, Sh. Study on dynamic model of vibratory roller – soil system / Sh. Li, Ch. Hu // *IOP conf. series: earth and environmental science.* – 2018. – № 113. – P. 2-4.
38. Liu, D. H. Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller integrated compaction monitoring technology / Z. L. Li, Z. H. Lian // *Journal Automation in construction.* – 2014. – № 44. – P. 234-246.
39. Liu, D. Intelligent compaction practice and development: a bibliometric analysis / D. Liu, Y. Wang, J. Chen, Y. Zhang // *Engineering, Construction and Architectural Management.* – 2019. – Vol. 27 (5). – 1213p.
40. Liu, G. Simulation of dynamic character of compacting mechanism of paver / G. Liu // *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery.* – 2005. – № 11. – P. 34-37.
41. Maksimychev, O. I. Automated control system of road construction works / M. Y. Karelina, A. V. Ostroukh, S. V. Zhankaziev, D. A. Pastukhov, Y. E. Nuruev //

International journal of applied engineering research. – 2016. – Vol. 11 (9). – P. 6441-6446.

42. Maksimych, O. I. Automated control system of road construction works / O. I. Maksimych, M. Y. Karelina // International journal of applied engineering research. – 2016. – Vol. 11. – P. 6441-6446.

43. Mazari, M. Variability of intelligent compaction data on embankment and subgrade geomaterials / M. Mazari, J. Beltran, R. Aldouri, S. Nazarian // Orlando: in Proceedings of the Geotechnical Frontiers. – 2017.

44. Mikheyev, V. V. Modelling of deformation process for the layer of elastoviscoplastic media under surface action of periodic force of arbitrary type / V. V. Mikheyev, S. V. Saveliev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – №944. – P. 2-10.

45. Mirsamadi, S. Multi-domain adversarial training of neural network acoustic models for distant speech recognition / S. Mirsamadi, J. H. L. Hansen // Speech Communication. – 2019. – Vol. 106. – P. 21-30.

46. Mitrea, C. A. A comparison between neural networks and traditional forecasting methods / C. A. Mitrea, K. M. Carman Lee, Z. Wu // International journal of engineering business management. – 2009. – Vol. 6. – P. 67-72.

47. Moller, M. F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning / M. F. Moller // Neural Networks. – 1993. – Vol. 6. – P. 525-533.

48. Moller, M.F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised / M.F. Moller // Neural Networks. – 1993. – V. 6. – P. 525-533.

49. Mooney, M. A. Field monitoring of roller vibration during compaction of subgrade soil / M. A. Mooney, R. V. Rinehart // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2007. – Vol. 133. – P. 257-265.

50. Mooney, M. A. In situ soil response to vibratory loading and its relationship to roller-measured soil stiffness / M. A. Mooney, R. V. Rinehart // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2009. – Vol. 135. – P. 1022-1031.

51. Mooney, M. Vibratory roller integrated measurement of earthwork compaction: an overview / M. Mooney, D. Adam // Boston: in Proceedings of the 7th International

Symposium on Field Measurements in Geomechanics. – 2007.

52. Muller, B. Neural Networks / B. Muller, J. Reinhart // Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990.
53. Nabizhanov, Z. I. Real-time neural network system for non-destructive control of asphalt mixtures compaction / Z. I. Nabizhanov, A. P. Prokopev // IOP Conference Series: Materias Science and Engineering. – 2021. – № 1181. – P. 1-7.
54. Nordfelt, I. Soil compaction by vibratory roller with variable frequency / I. Nordfelt, S. Larsson // Geotechnique. – 2017. – Vol. 67. – P. 272-278.
55. Nosov, S. V. Generalized dynamic model of the interaction of compactors with road construction materials / S. V. Nosov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2017. – Vol. 2(34) . – P. 35-44.
56. Omatu, S. Neuro-Control and its applications / S. Omatu, M. Khalid, R. Yusof // London: Springer-Verlag. – 1995. – 255 p.
57. Omidvar, O. Neural systems for control / O. Omidvar, D. L. Elliott // New York: Academic Press. – 1997. – 272 p.
58. Palaz, D. End-to-end acoustic modeling using convolutional neural networks for HMM-based automatic speech recognition / D. Palaz, M. Magimai-Doss, R. Collobert // Speech Communication. – 2019. – Vol. 108. – P. 15-32.
59. Pistol, J. Continuous Compaction Control (CCC) with Oscillating Rollers / J. Pistol, S. Villwock, W. Völkel, F. Kopf, D. Adam // Procedia Engineering. – 2016. – № 143. – P. 14-21.
60. Pistol, J. Fundamentals of roller integrated compaction control for oscillatory rollers and comparison with conventional testing methods / J. Pistol, D. Adam // Transportation Geotechnics. – 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.010>
61. Prokopev, A. P. Automation of the process of compaction of the paver / A. P. Prokopev, R. T. Emelyanov // News of higher institutions. Construction. – 2004. – Vol. 7 (547). – P. 82-84.
62. Prokopev, A. P. Concept of a new method for continuous non-destructive control of asphalt road pavements compaction / A. P. Prokopev , Zh. I. Nabizhanov, R.

T. Emelyanov, V. I. Ivanchura // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1515. – P. 1-5.

63. Prokopev, A. P. Model of intelligent control system of road-building material compaction by pavers / A. P. Prokopev, Z. I. Nabizhanov, et al // IOP Conference Series: Materias Science and Engineering. – 2021. – № 1181(1).

64. Prokopev, A. P. Model of object non-destructive technology of road surfaces compaction control / A. P. Prokopev, Z. I. Nabizhanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1889 (2). – P. 1-7.

65. Prokopev, A. P. Model-based approach to the design of a continuous soil compaction control facility / A. P. Prokopev, Z. I. Nabizhanov, et al // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – № 1679 (4).

66. Prokopev, A. P. Modeling the highly effective object for continuous compaction control of the cyber-physical road-construction system compaction / A. P. Prokopev, Z. I. Nabizhanov, et al // Cyber-physical systems: modelling and intelligent control. Studies in systems, decision and control. Springer nature Switzerland AG. – 2021. – № 338. – P. 179-190.

67. Prokopev, A. P. Modelling cyber-physical system object in state space (on the efample of paver) / A. P. Prokopev, Z. I. Nabizhanov, et al // Cyber-physical systems: advances in design & modelling. Springer. – 2020. – № 259. – P. 313-323.

68. Prokopev, A. P. On the task of designing an object of cyber-physical quality control system for asphalt mixtures compaction / A.P. Prokopev, Z.I. Nabizhanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1889(2).

69. Prokopev, A. P. Parametric synthesis of PID controllers for high-order control systems / A. P. Prokopev, Z. I. Nabizhanov, et al // Studies in systems, decision and control. Springer. – 2020. – Vol. 260. – P. 91-102.

70. Prokopev, A. P. The method of PID controllers synthesis for sixth-order systems / A. P. Prokopev, Z. I. Nabizhanov, et al // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – № 1515 (2).

71. Prokopev, A. P. The object model for cyber-physical system's in state space (on the example of the pavement compaction process) / A. P. Prokopev, Z. I. Nabizhanov,

et al // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Science (SIBIRCON). – Novosibirsk, 2019. – P. 85-89.

72. Prokopev, A. P. To the question of determining indicators for evaluating quality compaction and efficiency for pavers / A. P. Prokopev, Z. I. Nabizhanov, et al // IOP Conference Series: Materias Science and Engineering. – 2021. – № 1181(1).

73. Prokopev, A.P. Design of controllers for higher order systems / A.P. Prokopev, Z.I. Nabizhanov, et al // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Science (SIBIRCON). – Novosibirsk, 2019. – P. 607-611.

74. Prokopev, A.P. Modeling the non-destructive control of road surfaces compaction / A.P. Prokopev, Z.I. Nabizhanov, et al // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – № 1399.

75. Reynders, E. System identification methods for (operational) modal analysis: review and comparison / E. Reynders // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2012. – Vol. 19. – P. 51-124.

76. Rinehart, R. V. Instrumentation of a roller compactor to monitor vibration behavior during earthwork compaction / R. V. Rinehart // Automation in construction. – 2008. – № 17. – P. 144-150.

77. Serpanos, D. Internet-of-Things (IoT) Systems. Architectures, Algorithms, Methodologies / D. Serpanos, M. Wolf // Springer International Publishing. – 2018. – 95 p.

78. Sirca Jr., G. F. System identification in structural engineering / G. F. Sirca Jr., H. Adeli // Scientia Iranica. – 2012. – Vol. 19. – P. 1355-1364.

79. Weidong, C. Real-Time Evaluation of Compaction Quality by Using Artificial Neural Networks / C. Weidong, L. Shutang, G. Xuechi, R. Fei // Advances in Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2020. – 10 p.

80. White, D. J. Field assessment and specification review for roller-integrated compaction monitoring technologies / D. J. White, P. K. R. Vennapusa, H. H. Gieselman // Advances in Civil Engineering. – 2011. – Vol. 2011. – 15 p.

81. Widrow, B. 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation / M. A. Lehr, B. Widrow // Proceedings of the IEEE. – 1990. – Vol. 78

(9). – P. 1415-1442.

82. Xu, Q. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction / Q. Xu, G. K. Chang // *Automation in Construction*. – 2016. – № 62. – P. 78-88.

83. Zhan, M. Neural networks for radar waveform recognition / M. Zhan, M. Diao, L. Gao // *Symmetry*. – 2017. – Vol. 9. – 75 p.

84. Zhang, Q. Compaction quality assessment of rockfill materials using roller-integrated acoustic wave detection technique / Q. Zhang, T. Liu, Z. Zhang, Z. Huangfu, Q. Li, Z. An // *Automation in Construction*. – 2019. – Vol. 97. – P. 110-121.

85. Zhu, S. Development of an automated remote asphalt paving quality control system / Li X., Wang H., Yu D: *Transportation Research Record*. 2018. – № 2672 (1). – P. 28-39.

86. Zhu, X. Assessment of compaction quality of multi-layer pavement structure based on intelligent compaction technology / X. Zhu, S. Bai, G. Xue, J. Yang, Y. Cai, W. Hu, X. Jia, B. Huang // *Construction and Building Materials*. – 2018. – № 161. – P. 316-329.

87. Айвазян, С. А. Прикладная статистика. Основы эконометрики / С. А. Айвазян. – М.: ЮНИТИ, 2001. – 432 с.

88. Апарцев, А. З. Технологические схемы и правила укладки и уплотнения горячих многощебенистых асфальтобетонных смесей при устройстве покрытий автомобильных дорог / А. З. Апарцев. – Павловск, 1996. – 51 с.

89. Апарцев, А. З. Уплотнение и укладка дорожных материалов. Теория и практика / А. З. Апарцев. – Санкт-Петербург: Тест-Принт, 1995. – 85 с.

90. Галушкин, А. И. Нейронные сети: основы теории. / А. И. Галушкин // Москва: Горячая линия-Телеком, 2014. – 496 с.

91. Гафаров, Ф. М. Искусственные нейронные сети и их приложения / Ф. М. Гафаров, А. Ф. Галимянов. – Казань: Казанский университет, 2018. – 121 с.

92. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – С. 479.

93. Головкин, В. А. Нейросетевые технологии обработки данных: учебное пособие / В. А. Головкин, В. В. Краснопрошин. – Минск: БГУ, 2017. – 263 с.
94. Деруссо, П. М. Пространство состояний в теории управления / П. М. Деруссо. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
95. Добров, Э. М. Методические рекомендации по укладке и уплотнению асфальтобетонных смесей различного типа при использовании высокопроизводительных асфальтоукладчиков и катков / Э. М. Добров. – Москва: Транспорт, 1984. – С. 7.
96. Дорогие дороги. Дорожное хозяйство в рублях и километрах [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/3636374>.
97. Захаренко, А. В. Дорожные катки: теория, расчет, применение: монография / А. В. Захаренко, В. Б. Пермяков, Л. В. Молокова – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 328 с.
98. Захаренко, А. В. Дорожные катки: теория, расчет, применение: монография / А. В. Захаренко, В. Б. Пермяков, Л. В. Молокова М.: Лань, 2018. – 328 с.
99. Захаренко, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей / А. В. Захаренко. – Омск: Сиб. автомобил.-дорож. акад. (СИБАДИ). – 2005. – 320 с.
100. Колмогоров, А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения / А. Н. Колмогоров // Докл. АН СССР. – 1957. – Т. 114. – С. 953-956.
101. Костельов, М. П. До какого уровня (китайского, европейского или американского?) следует России поднимать качество строительства и сроки службы своих новых автомобильных дорог / М. П. Костельов, В. П. Первалов, Д. В. Пахаренко // Каталог-справочник «Дорожная техника 2011». – 2011. – С. 13-26.
102. Костельов, М. П. Способна ли Россия быстро и резко повысить качество и сроки службы своих автомобильных дорог до китайского, европейского или американского уровня? / М. П. Костельов, В. П. Первалов, Д. В. Пахаренко //

Второй всероссийский дорожный конгресс: сб. науч. тр. / МАДИ, МОО «Дорож. Конгресс». – М., 2010. – С. 44-50.

103. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.

104. Кустарев, Г. В. «Мозги» для катков – панацея или помощник? / Г. В. Кустарев // Автомобильные дороги. – 2009. – № 9 (934). – С. 118-121.

105. Кустарев, Г. В. Высокоэффективные комплексы для скоростного строительства асфальтобетонных покрытий: монография / Г. В. Кустарев, С. А. Павлов, А. В. Ушков. – М.: МАДИ, 2019. – 140 с.

106. Лещинский, А. В. Асфальтоукладчики / А. В. Лещинский, С. Н. Иванченко // Конструкция и расчет. – С.102.

107. Максимычев, О. И. Концепция автоматизированной системы управления дорожно-строительными работами / О. И. Максимычев // Автоматизация и управление в технических системах. – 2015. – № 1. – С. 80-91.

108. Максимычев, О. И. Концепция автоматизированной системы управления дорожно-строительными работами / О. И. Максимычев // Автоматизация и управление в технических системах. – 2015. – № 1 (13). – С. 80-91.

109. Максимычев, О. И. Новые направления в автоматизации технологий дорожного строительства / О. И. Максимычев, А. М. Васьковский // Вестник МАДИ. – 2012. – Вып. 3 (30). – С. 53-57.

110. Максимычев, О. И. Новые направления в автоматизации технологий дорожного строительства / А. М. Васьковский, О. И. Максимычев // Вестник МАДИ. Вып. 3. – 2012. – № 3 (30). – С. 53-57.

111. Марьина, О. А. Методы обучения многослойного персептрона. Попытки оптимизации задачи поиска глобального минимума функции энергии / О. А. Марьина, Д. А. Ладяев. – Саранск: Мордовский государственный университет, 2009. – 12 с.

112. Медведев, В. С. Нейронные Сети. Matlab 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин // М.: Диалог-МИФИ. – 2002. – 496 с.

113. Набижанов, Ж. И. Аналитический синтез модели регулятора для систем высокого порядка с учетом расположения комплексных полюсов / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2019. – Т. 1. – С. 7-10.

114. Набижанов, Ж. И. Интеллектуальная система непрерывного контроля процесса уплотнения асфальтобетонной смеси / Ж. И. Набижанов, В. И. Иванчура // Неделя науки СПбПУ. Материалы научн. конф. с межд. участием. Санкт-Петербург. – 2017. – Ч. 2. – С. 393-395.

115. Набижанов, Ж. И. Метод непрерывного контроля уплотнения асфальтобетонных смесей укладчиками / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // Математические методы в технике и технологиях. – 2021. – Т. 4. – С. 53-56.

116. Набижанов, Ж. И. Моделирование в пространстве состояний объекта контроля уплотнения. Одновальцовые катки. / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2020. – Т. 3. – С. 33-37.

117. Набижанов, Ж. И. Моделирование в пространстве состояний объекта неразрушающих технологий. Тандемные катки. / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2020. – Т. 3. – С. 38-42.

118. Набижанов, Ж. И. Модель нечетко-логической системы управления уплотнением смеси асфальтоукладчиком / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2018. – Т. 3. – С. 82-85.

119. Набижанов, Ж. И. Модель объекта непрерывного неразрушающего контроля уплотнения асфальтобетонных смесей / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2020. – Т. 2. – С. 126-131.

120. Набижанов, Ж. И. Модель системы управления скоростью передвижения укладчика дорожно-строительной смеси на основе нечеткой логики / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2018. – Т. 3. – С. 145-148.

121. Набижанов, Ж. И. Непрерывный контроль процесса уплотнения смеси с применением искусственных нейронных сетей / Ж. И. Набижанов // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2017. – Т. 3. – С. 98-102.

122. Набижанов, Ж. И. О разработке модели интеллектуальной системы непрерывного контроля уплотнения асфальтобетонной смеси / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2018. – Т. 4. – С. 29-31.

123. Набижанов, Ж. И. Применение методов статистического анализа и искусственного интеллекта в системах неразрушающего контроля уплотнения для асфальтоукладчиков / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев // Математические методы в технике и технологиях. – 2021. – Т. 9. – С. 48-51.

124. Набижанов, Ж. И. Прогнозирование показателей качества уплотнения с использованием метода искусственного интеллекта / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2020. – Т. 6. – С. 19-23.

125. Набижанов, Ж. И. Проектирование модели нейросетевой системы непрерывного контроля уплотнения смеси виброкатком / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2019. – Т. 4. – С. 18-21.

126. Набижанов, Ж. И. Проектирование ПИД-регуляторов для систем управления высокого порядка / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2019. – Т. 1. – С. 3-6.

127. Набижанов, Ж. И. Проектирование регуляторов для систем седьмого порядка / Ж. И. Набижанов, А. П. Прокопьев, и др. // ММТТ. Сб. трудов междунар. научн. конф. – 2020. – Т. 2. – С. 74-78.

128. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский // Москва: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

129. Постановление Правительства РФ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201706020012> .

130. Прокопьев, А. П. Автоматизация процесса уплотнения асфальтоукладчика / А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов // Изв. высш. учеб. завед. Строительство. – 2004. – №7 (547). – С. 82-84.

131. Прокопьев, А. П. Интеллектуальное управление уплотнением дорожных материалов вибрационными катками / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов и др. // Математические методы в технике и технологиях. – 2021. – Т. 6. – С. 33-36.

132. Прокопьев, А. П. Комплексная автоматизация технологических процессов устройства дорожных покрытий: монография / А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 152 с.

133. Прокопьев, А. П. Моделирование объекта кибер-физической системы для укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов и др. // Математические методы в технике и технологиях. – 2021. – Т. 7. – С. 31-36.

134. Прокопьев, А. П. Нейросетевая система управления процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 10. – С. 120-129.

135. Прокопьев, А. П. Некоторые аспекты проектирования ПИД-регуляторов для систем высокого порядка / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов и др. // Математические методы в технике и технологиях. – 2021. – Т. 8. – С. 11-15.

136. Прокопьев, А. П. Новый метод нейросетевой системы контроля уплотнения асфальтобетонных смесей / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов, Р. Т. Емельянов, В. И. Иванчура // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки. – 2021. – № 9. – С. 65-69

137. Прокопьев, А. П. Реализация концепции автоматизации и интеллектуализации управления дорожно-строительными процессами / В. И. Иванчура, Р. Т. Емельянов, П. А. Пальчиков // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13(№1). – С. 61-70.

138. Прокопьев, А. П. Управление процессом уплотнения асфальтобетонных покрытий укладчиком с применением нечеткой логики / А. П.

Прокопьев, Ж. И. Набижанов и др. // Математические методы в технике и технологиях. – 2021. – Т. 6. – С. 28-32.

139. 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. – № 12(8). – С. 413-419.

140. Регионы с наиболее и наименее безопасными дорогами. Индекс безопасности [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zadorogi.ru>.

141. Рейтинг стран по качеству дорог [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://nonews.co/directory/lists/countries/quality-roads>.

142. Справочник по асфальтоукладчикам Vögele: Советы и указания по укладке асфальтобетона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sinref.ru/000_uchebniki/04600_raznie_11.

143. Технология укладки асфальта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iso-altair.ru/info/tehnologiya-ukladki-asfalta>.

144. Типы асфальтоукладчиков [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.stroyteh.ru>.

145. Транспорт и транспортные проблемы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.levada.ru/2017/09/27/transport-i-transportnye-problemy>.

146. Тюремнов, И. С. «Интеллектуальные» катки – «интеллектуальное» уплотнение / И. С. Тюремнов, Е. К. Чабуткин, Р. Д. Окулов // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 8. – С. 8-13.

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

148. Ферстер, Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц; перевод с нем. В. М. Ивановой. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 304 с.

149. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор // М: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.

Утверждаю:
 Директор ООО «ЦИЭС»
 Сабинин В.Л.
 «  2021 г.

А К Т

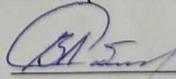
о внедрении результатов диссертационной работы Набижанова Жасурбека Ильхомовича «Разработка методов непрерывного контроля и управления уплотнением для асфальтоукладчиков на основе искусственных нейронных сетей»

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., канд. техн. наук, доцент Прокопьев А.П., кафедра "Строительные материалы и технологии строительства" Сибирского федерального университета, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Набижанова Ж.И. использованы в проектно-конструкторской и инновационной деятельности ООО «ЦИЭС» в следующих направлениях:

1. подготовка программно-технических средств для измерений динамических параметров рабочих органов асфальтоукладчиков и вибрационных катков;
2. применение неразрушающей технологии контроля качества уплотнения для асфальтоукладчиков в режиме реального времени;
3. подготовка программно-технических средств автоматизации для нейросетевого микропроцессорного блока управления коэффициентом уплотнения дорожных материалов для асфальтоукладчиков.

Использование указанных результатов направлено на повышение производительности и улучшения качества уплотнения дорожных материалов за счет автоматического регулирования коэффициента уплотнения изменением частоты колебаний трамбующего бруса в режиме реального времени. Предполагается снижение стоимости строительства автомобильных дорог, за счет сокращения типов и количества дорожных катков, обеспечивая оптимальные температурные условия уплотнения асфальтобетонных смесей.

Председатель комиссии:

 Сабинин В.Л.

Члены комиссии:

 Назаренко А.А.
 Емельянов Р.Т.
 Прокопьев А.П.



УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по научной работе
 ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
 университет»

Барышев Р.А.

2021 г.

**Акт внедрения результата интеллектуальной деятельности и установления срока
 полезного использования**

Настоящий акт составлен комиссией в составе:

- 1) заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии строительства»,
 канд. техн. наук, доц. Енджиевская И.Г.;
- 2) руководитель научно-исследовательской части СФУ Рубанов К.А.;
- 3) начальник отдела правовой охраны и защиты интеллектуальной собственности
 Арыкова В.С.

Комиссия, оценив сущность, назначение, описание, технические и иные характеристики результата интеллектуальной деятельности

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU №2021661554 от 02.07.2021 «Программный модуль нейросетевого прогнозирования коэффициента уплотнения дорожных материалов для укладчика», полученного в ходе выполнения работ следующими авторами: Набижанов Ж.И., Прокопьев А.П., приняла заключение о его внедрении и будущем использовании в деятельности Кафедры строительных материалов и технологии строительства ИСИ СФУ.

Областью использования (внедрения) вышеназванного результата является:

Научно-исследовательская деятельность студентов, в частности исследование влияния динамических и режимных параметров асфальтоукладчиков на физико-механические свойства дорожных материалов.

Началом использования следует считать 01 июля 2021 г.

Срок полезного использования составляет 5 лет.

Исключительное право на вышеназванный результат интеллектуальной деятельности принадлежит ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Заведующий кафедрой
 «Строительные материалы и технологии строительства»,
 канд. техн. наук, доц.

И.Г. Енджиевская

Руководитель НИЧ

К.А. Рубанов

Начальник ОПОиЗИС

Арыкова В.С.



УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по научной работе
 ФГАОУ ВО Сибирский федеральный
 университет

Барышев Р.А.

» _____ 2021_ г.

Акт внедрения результата интеллектуальной деятельности и установления срока полезного использования

Настоящий акт составлен комиссией в составе:

- 1) заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии строительства»,
 канд. техн. наук, доц. Енджиевская И.Г.;
- 2) руководитель научно-исследовательской части СФУ Рубанов К.А.;
- 3) начальник отдела правовой охраны и защиты интеллектуальной собственности
 Арыкова В.С.

Комиссия, оценив сущность, назначение, описание, технические и иные характеристики результата интеллектуальной деятельности

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU №2021661469 от 01.07.2021 «Программный модуль – симулятор взаимодействия рабочего органа укладчика с асфальтобетонной смесью»,

полученного в ходе выполнения работ следующими авторами: Набижанов Ж.И., Прокопьев А.П., приняла заключение о его внедрении и будущем использовании в деятельности Кафедры строительных материалов и технологии строительства ИСИ СФУ.

Областью использования (внедрения) вышеназванного результата является:

Научно-исследовательская деятельность студентов, в частности исследование влияния динамических и режимных параметров асфальтоукладчиков на физико-механические свойства дорожных материалов.

Началом использования следует считать 01 июля 2021 г.

Срок полезного использования составляет 5 лет.

Исключительное право на вышеназванный результат интеллектуальной деятельности принадлежит ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Заведующий кафедрой
 «Строительные материалы и технологии строительства»,
 канд. техн. наук, доц.

И.Г. Енджиевская

Руководитель НИЧ

К.А. Рубанов

Начальник ОПОиЗИС

Арыкова В.С.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
ФГАОУ ВО Сибирский федеральный
университет



_____ Гуц Д.С.

_____ 2021_ г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка методов непрерывного контроля и управления уплотнением для асфальтоукладчиков на основе искусственных нейронных сетей» Набижанова Жасурбека Ильхомовича в учебный процесс инженерно-строительного института Сибирского федерального университета

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Набижанова Ж.И. на тему: «Разработка методов непрерывного контроля и управления уплотнением для асфальтоукладчиков на основе искусственных нейронных сетей» актуальны и обладают теоретической, и практической ценностью. Математическая и компьютерная модель динамической системы «рабочий орган укладчика – асфальтобетонная смесь», результаты синтеза системы автоматического контроля и управления процессом уплотнения смеси укладчиком, используются в учебном процессе по направлению 08.04.01 "Строительство", профиль магистерской подготовки 08.04.01.07 «Комплексная механизация и автоматизация строительства».

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

Зав. кафедрой "Строительные материалы
и технологии строительства", канд. техн. наук, доц. _____ И.Г. Енджиевская

Руководитель магистерской подготовки
д-р техн. наук, профессор

_____ Р.Т. Емельянов

Приложение Д**Программа для ЭВМ: «Программный модуль нейросетевого прогнозирования коэффициента уплотнения дорожных материалов для укладчика»**

Программа для ЭВМ «Программный модуль нейросетевого прогнозирования коэффициента уплотнения дорожных материалов для укладчика» предназначена для обучения нейронной сети на основе полученных данных из уравнений зависимости параметров процесса уплотнения и коэффициента уплотнения. В данной программе предлагается увеличить количество входных данных, используемых для обучения нейронной сети и прогнозирования коэффициента уплотнения.

Данная программа позволяет прогнозировать коэффициент уплотнения в режиме реального времени.

Программа предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, разработкой и созданием систем управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-37-90052.

Тип ЭВМ: Intel® Pentium 4 2 ГГц, не менее 256 МБ ОЗУ, минимум 100 Мб свободного пространства на жестком диске

Язык программирования: Matlab

Операционная система: Windows XP/Vista/7/8/10

```

MainData; % запуск команд с обработкой данных
a=0;
b=1;
pr_kmin=pr_k(1);
pr_kmax=pr_k(1);
for i = 1:length(pr_k)
    if pr_k(i)>pr_kmax
        pr_kmax=pr_k(i);
    end
    if pr_k(i)<pr_kmin
        pr_kmin=pr_k(i);
    end
end
prk_norm=pr_normalization(pr_k,a,b,pr_kmin,pr_kmax);
smin=s(1);
smax=s(1);
for i = 1:length(s)
    if s(i)>smax
        smax=s(i);
    end
    if s(i)<smin
        smin=s(i);
    end
end
s_norm=s_normalization(s,a,b,smin,smax);
pmin=p(1);
pmax=p(1);
for i = 1:length(p)
    if p(i)>pmax
        pmax=p(i);
    end
    if p(i)<pmin
        pmin=p(i);
    end
end
p_norm=p_normalization(p,a,b,pmin,pmax); v_kmin=v_k(1);
v_kmax=v_k(1);
for i = 1:length(v_k)
    if v_k(i)>v_kmax
        v_kmax=v_k(i);
    end
    if v_k(i)<v_kmin
        v_kmin=v_k(i);
    end
end
v_knorm=v_k_normalization(v_k,a,b,v_kmin,v_kmax);
E_defmin=E_def(1);
E_defmax=E_def(1);
for i = 1:length(E_def)
    if E_def(i)>E_defmax
        E_defmax=E_def(i);
    end
end

```

```

    if E_def(i)<E_defmin
        E_defmin=E_def(i);
    end
end
E_defnorm=E_defnormalization(E_def,a,b,E_defmin,E_defmax);
nhmin=nh(1); nhmax=nh(1);
for i = 1:length(nh)
    if nh(i)>nhmax
        nhmax=nh(i);
    end
    if nh(i)<nhmin
        nhmin=nh(i);
    end
end
nh_norm=nh_normalization(nh,a,b,nhmin,nhmax);
tmin=t(1);
tmax=t(1);
for i = 1:length(t)
    if t(i)>tmax
        tmax=t(i);
    end
    if t(i)<tmin
        tmin=t(i);
    end
end
t_norm=t_normalization(t,a,b,tmin,tmax); e0min=e0(1);
e0max=e0(1);
for i = 1:length(e0)
    if e0(i)>e0max
        e0max=e0(i);
    end
    if e0(i)<e0min
        e0min=e0(i);
    end
end
e0_norm=m_def_norm(e0,a,b,e0min,e0max);
inputNN=[prk_norm;t_norm;e0_norm;s_norm;E_defnorm;v_knorm;p_norm;nh_norm]'; % ВХОД
нейронной сети
outputNN=k'; %
newff_f_train;
fileID = fopen('t1.dat','r');
formatSpec = '%f';
t = fscanf(fileID,formatSpec);
fclose(fileID);
% импорт температуры
Q=35; % QB, kN *
P01=77; %P0, kN *
D=1.2; % D, m *
B=1.7; % B, m *
h0=0.08; % h0, m *
f1=40; % частота f, Hz
f2=55; % частота f, Hz
pr_k=pass(t);

```

```

fx=Fx(Q,P01);
e0=m_deformation(t);
s=sigma0(D,B,h0,fx,e0);
p=pressure(D,B,fx,pr_k);
v_k=speed(pr_k);
E_def=full_deformation(e0, h0, p);
k=compaction(t, e0);
nh=number_hit(f1,f2,v_k);
grafic(k,s,t,e0);
function p=pass(t)
for i=1:length(t)
    if t(i)>115
        p(i)=1;
    elseif t(i)>105 && t(i)<=115
        p(i)=2;
    elseif t(i)>95 && t(i)<=105
        p(i)=3;
    elseif t(i)>90 && t(i)<=95
        p(i)=4;
    elseif t(i)>85 && t(i)<=90
        p(i)=5;
    elseif t(i)>82 && t(i)<=85
        p(i)=6;
    elseif t(i)>80 && t(i)<=82
        p(i)=7;
    elseif t(i)<=80
        p(i)=8;
    end
end
return
function p_n=p_normalization(p,a,b,pmin,pmax)
for j = 1:length(p)
    p_n(j)=((p(j)-pmin)*(b-a))/((pmax-pmin)+a);
end
return

function E_def_n=E_defnormalization(E_def,a,b,E_defmin,E_defmax)
for j = 1:length(E_def)
    E_def_n(j)=((E_def(j)-E_defmin)*(b-a))/((E_defmax-E_defmin)+a);
end
return

function pr_kn=pr_normalization(pr_k,a,b,pr_kmin,pr_kmax)
for j = 1:length(pr_k)
    pr_kn(j)=((pr_k(j)-pr_kmin)*(b-a))/((pr_kmax-pr_kmin)+a);
end
return

function s_n=s_normalization(s,a,b,smin,smax)
for j = 1:length(s)
    s_n(j)=((s(j)-smin)*(b-a))/((smax-smin)+a);
end
return

function v_k_n=v_k_normalization(v_k,a,b,v_kmin,v_kmax)
for j = 1:length(v_k)
    v_k_n(j)=((v_k(j)-v_kmin)*(b-a))/((v_kmax-v_kmin)+a);
end

```

```

return

function nh_n=nh_normalization(nh,a,b,nhmin,nhmax)
for j = 1:length(nh)
    nh_n(j)=(nh(j)-nhmin)*(b-a)/((nhmax-nhmin)+a);
end
return

function e0_n=m_def_norm(e0,a,b,e0min,e0max)
for j = 1:length(e0)
    e0_n(j)=(e0(j)-e0min)*(b-a)/((e0max-e0min)+a);
end
return

function F = Fx(Q, P01)
F=[];
F(1)=Q+0.4*P01;
F(2)=Q+0.55*P01;
F(3)=Q+0.7*P01;
return
function E = m_deformation(t)
E=691.13*(exp(t.*(-0.03)));
return
function s=sigma0(D, B, h0,fx,e0)
for n=1:length(e0)
    if e0(n)<29
        s(n)=(3/2)*(((fx(1)/1000)^2)*(e0(n)/((B^2)*D*h0)))^(1/3);
    elseif e0(n)>=29 && e0(n)<39.98
        s(n)=(3/2)*(((fx(2)/1000)^2)*(e0(n)/((B^2)*D*h0)))^(1/3);
    elseif e0(n)>=39.98
        s(n)=(3/2)*(((fx(3)/1000)^2)*(e0(n)/((B^2)*D*h0)))^(1/3);
    end
end
return
function p = pressure(D, B, fx, pr_k)
for n=1:length(pr_k)
    if pr_k(n)<3
        p(n)=(((fx(1)/1000)^2)*1/((B^2)*D*1))^(1/3);
    elseif pr_k(n)>=3 && pr_k(n)<=4
        p(n)=(((fx(2)/1000)^2)*1/((B^2)*D*1))^(1/3);
    elseif pr_k(n)>4
        p(n)=(((fx(3)/1000)^2)*1/((B^2)*D*1))^(1/3);
    end
end
return
% скорость движения катка
function v=speed(pr_k)
for n=1:length(pr_k)
    if pr_k(n)<3
        v(n)=3;
    elseif pr_k(n)>=3 && pr_k(n)<6
        v(n)=4;
    elseif pr_k(n)>=6
        v(n)=5;
    end
end
return
% число ударов

```

```
function n_h=number_hit(f1, f2, v_k)
for n=1:length(v_k)
    if v_k(n)<5
        n_h(n)=((v_k(n)/3.6)/f1)^-1;
    else
        n_h(n)=((v_k(n)/3.6)/f2)^-1;
    end
end
return
function grafic(k,s,t,e0)
figure(1);
plot(k)
grid on
title ('график изменения коэф уплотнения')
xlabel('кол-во значений')
ylabel('коэф уплотнения')
figure(2);
plot(t,e0)
grid on
title ('зависимость температуры и модуля деформации')
xlabel('температура, С')
ylabel('модуль деформации, МПа')
return
```

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2021661554

**Программный модуль нейросетевого прогнозирования
коэффициента уплотнения дорожных материалов для
укладчика**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Авторы: *Набижанов Жасурбек Ильхомович (RU), Прокотьев
Андрей Петрович (RU), Иванчура Владимир Иванович
(RU), Емельянов Рюрик Тимофеевич (RU)*

Заявка № 2021660497

Дата поступления 02 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 13 июля 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г. П. Ивлиев

Приложение Е

Программа для ЭВМ: «Программный модуль – симулятор взаимодействия рабочего органа укладчика с асфальтобетонной смесью»

Программа для ЭВМ «Программный модуль – симулятор взаимодействия рабочего органа укладчика с асфальтобетонной смесью» предназначена для моделирования рабочего процесса укладчика с учетом параметров рабочего органа и свойств дорожных материалов и может быть использована для научных исследований, а также учебного процесса в магистратуре. Моделирование процесса выполняется на основе параметров уплотняющего рабочего органа асфальтоукладчика и характеристик дорожного материала. Обеспечивается удобство настройки исходных данных и отображения результатов моделирования. Данная программа позволяет определять временные зависимости динамических параметров системы с учетом заданных исходных данных.

Программа предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, разработкой и созданием систем управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-37-90052.

Тип ЭВМ: Intel® Pentium 4 2 ГГц, не менее 256 МБ ОЗУ, минимум 100 Мб свободного пространства на жестком диске

Язык программирования: Matlab

Операционная система: Windows XP/Vista/7/8/10

```

#include <math.h>
#include "PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3.h"
#include "PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3_private.h"
#include "PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3_dt.h"
/* user code (top of parameter file) */
extern "C" {
    const int_T gblNumToFiles = 0;
    const int_T gblNumFrFiles = 0;
    const int_T gblNumFrWksBlocks = 0;
    const char *gblSlvrJacPatternFileName =
"PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3_rsim_rtw\\PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3_Jpa
ttern.mat";
    /* Root inports information */
    const int_T gblNumRootInportBlks = 0;
    const int_T gblNumModelInputs = 0;
    extern rtInportTutable *gblInportTutable;
    extern const char *gblInportFileName;
    const int_T gblInportDataTypeIdx[] = { -1 };
    const int_T gblInportDims[] = { -1 };
    const int_T gblInportComplex[] = { -1 };
    const int_T gblInportInterpoFlag[] = { -1 };
    const int_T gblInportContinuous[] = { -1 };
}
#include "simstruc.h"
#include "fixedpoint.h"
/* Block signals (auto storage) */
B rtB;
/* Continuous states */
X rtX;
/* Block states (auto storage) */
DW rtDW;
/* Parent Simstruct */
static SimStruct model_S;
SimStruct *const rtS = &model_S;
/* Initial conditions for root system: '<Root>' */
extern "C" void MdlInitialize(void)
{
    /* InitializeConditions for StateSpace: '<Root>/State-Space' */
    rtX.StateSpace_CSTATE[0] = rtP.StateSpace_X0;
    rtX.StateSpace_CSTATE[1] = rtP.StateSpace_X0;
    rtX.StateSpace_CSTATE[2] = rtP.StateSpace_X0;
    rtX.StateSpace_CSTATE[3] = rtP.StateSpace_X0;
    /* InitializeConditions for Derivative: '<Root>/Derivative1' */
    rtDW.Derivative1_RWORK.TimeStampA = rtInf;
    rtDW.Derivative1_RWORK.TimeStampB = rtInf;
    /* InitializeConditions for Derivative: '<Root>/Derivative' */
    rtDW.Derivative_RWORK.TimeStampA = rtInf;
    rtDW.Derivative_RWORK.TimeStampB = rtInf;
}
/* Start for root system: '<Root>' */
extern "C" void MdlStart(void)
{

```

```

MdlInitialize();
}
/* Outputs for root system: '<Root>' */
extern "C" void MdlOutputs(int_T tid)
{
    /* local block i/o variables */
    real_T rtb_Derivative1;
    real_T rtb_Derivative;
    real_T rtb_SineWave3;
    real_T rtb_Sum2;
    real_T rtb_SineWave2;
    /* StateSpace: '<Root>/State-Space' */
    rtB.StateSpace[0] = 0.0;
    rtB.StateSpace[1] = 0.0;
    rtB.StateSpace[2] = 0.0;
    rtB.StateSpace[3] = 0.0;
    rtB.StateSpace[0U] += rtP.StateSpace_C[0] * rtX.StateSpace_CSTATE[0];
    rtB.StateSpace[1U] += rtP.StateSpace_C[1] * rtX.StateSpace_CSTATE[1];
    rtB.StateSpace[2U] += rtP.StateSpace_C[2] * rtX.StateSpace_CSTATE[2];
    rtB.StateSpace[3U] += rtP.StateSpace_C[3] * rtX.StateSpace_CSTATE[3];
    /* Derivative: '<Root>/Derivative1' */
    {
        real_T t = ssGetTaskTime(rtS,0);
        real_T timeStampA = rtDW.Derivative1_RWORK.TimeStampA;
        real_T timeStampB = rtDW.Derivative1_RWORK.TimeStampB;
        real_T *lastU = &rtDW.Derivative1_RWORK.LastUAtTimeA;
        if (timeStampA >= t && timeStampB >= t) {
            rtb_Derivative1 = 0.0;
        } else {
            real_T deltaT;
            real_T lastTime = timeStampA;
            if (timeStampA < timeStampB) {
                if (timeStampB < t) {
                    lastTime = timeStampB;
                    lastU = &rtDW.Derivative1_RWORK.LastUAtTimeB;
                }
            } else if (timeStampA >= t) {
                lastTime = timeStampB;
                lastU = &rtDW.Derivative1_RWORK.LastUAtTimeB;
            }
            deltaT = t - lastTime;
            rtb_Derivative1 = (rtB.StateSpace[1] - *lastU++) / deltaT;
        }
    }
}
/* Derivative: '<Root>/Derivative' */
{
    real_T t = ssGetTaskTime(rtS,0);
    real_T timeStampA = rtDW.Derivative_RWORK.TimeStampA;
    real_T timeStampB = rtDW.Derivative_RWORK.TimeStampB;
    real_T *lastU = &rtDW.Derivative_RWORK.LastUAtTimeA;
    if (timeStampA >= t && timeStampB >= t) {
        rtb_Derivative = 0.0;
    }
}

```

```

} else {
    real_T deltaT;
    real_T lastTime = timeStampA;
    if (timeStampA < timeStampB) {
        if (timeStampB < t) {
            lastTime = timeStampB;
            lastU = &rtDW.Derivative_RWORK.LastUAtTimeB;
        }
        } else if (timeStampA >= t) {
            lastTime = timeStampB;
            lastU = &rtDW.Derivative_RWORK.LastUAtTimeB;
        }
        deltaT = t - lastTime;
        rtb_Derivative = (rtB.StateSpace[3] - *lastU++) / deltaT;
    }
}
/* Sin: '<Root>/Sine Wave1' */
rtb_Sum2 = sin(rtP.SineWave1_Freq * ssGetTaskTime(rtS,0) + rtP.SineWave1_Phase)
    * rtP.SineWave1_Amp + rtP.SineWave1_Bias;
/* Sin: '<Root>/Sine Wave2' */
rtb_SineWave2 = sin(rtP.SineWave2_Freq * ssGetTaskTime(rtS,0) +
    rtP.SineWave2_Phase) * rtP.SineWave2_Amp +
    rtP.SineWave2_Bias;
/* Sum: '<Root>/Sum1' incorporates:
 * Constant: '<Root>/Constant1'
 * Gain: '<Root>/Gain'
 * Gain: '<Root>/Gain3'
 * Gain: '<Root>/Gain4'
 */
rtb_SineWave3 = (((rtP.Gain4_Gain * rtB.StateSpace[0] + rtP.Gain3_Gain *
    rtB.StateSpace[1]) - rtP.Constant1_Value) + rtP.Gain_Gain *
    rtb_Derivative1) - rtb_Sum2) + rtb_SineWave2;
/* Sin: '<Root>/Sine Wave3' */
rtb_SineWave3 = sin(rtP.SineWave3_Freq * ssGetTaskTime(rtS,0) +
    rtP.SineWave3_Phase) * rtP.SineWave3_Amp +
    rtP.SineWave3_Bias;

/* Sum: '<Root>/Sum2' incorporates:
 * Constant: '<Root>/Constant'
 */
rtb_Sum2 = (rtb_SineWave2 - rtb_Sum2) + rtP.Constant_Value;
/* SignalConversion: '<Root>/TmpSignal ConversionAtState-SpaceInport1' */
rtB.TmpSignalConversionAtStateSpace[0] = rtb_Sum2;
rtB.TmpSignalConversionAtStateSpace[1] = rtb_SineWave3;
UNUSED_PARAMETER(tid);
}
/* Update for root system: '<Root>' */
extern "C" void MdlUpdate(int_T tid)
{
    {
        real_T timeStampA = rtDW.Derivative1_RWORK.TimeStampA;
        real_T timeStampB = rtDW.Derivative1_RWORK.TimeStampB;

```

```

real_T* lastTime = &rtDW.Derivative1_RWORK.TimeStampA;
real_T* lastU = &rtDW.Derivative1_RWORK.LastUAtTimeA;
if (timeStampA != rtInf) {
    if (timeStampB == rtInf) {
        lastTime = &rtDW.Derivative1_RWORK.TimeStampB;
        lastU = &rtDW.Derivative1_RWORK.LastUAtTimeB;
    } else if (timeStampA >= timeStampB) {
        lastTime = &rtDW.Derivative1_RWORK.TimeStampB;
        lastU = &rtDW.Derivative1_RWORK.LastUAtTimeB;
    }
}
*lastTime = ssGetTaskTime(rtS,0);
*lastU++ = rtB.StateSpace[1];
}

/* Update for Derivative: '<Root>/Derivative' */
{
    real_T timeStampA = rtDW.Derivative_RWORK.TimeStampA;
    real_T timeStampB = rtDW.Derivative_RWORK.TimeStampB;
    real_T* lastTime = &rtDW.Derivative_RWORK.TimeStampA;
    real_T* lastU = &rtDW.Derivative_RWORK.LastUAtTimeA;
    if (timeStampA != rtInf) {
        if (timeStampB == rtInf) {
            lastTime = &rtDW.Derivative_RWORK.TimeStampB;
            lastU = &rtDW.Derivative_RWORK.LastUAtTimeB;
        } else if (timeStampA >= timeStampB) {
            lastTime = &rtDW.Derivative_RWORK.TimeStampB;
            lastU = &rtDW.Derivative_RWORK.LastUAtTimeB;
        }
    }
}
*lastTime = ssGetTaskTime(rtS,0);
*lastU++ = rtB.StateSpace[3];
}
UNUSED_PARAMETER(tid);
}
extern "C" void MdlDerivatives(void)
{
    XDot *_rtXdot;
    _rtXdot = ((XDot *) ssGetdX(rtS));
    /* Derivatives for StateSpace: '<Root>/State-Space' */
    _rtXdot->StateSpace_CSTATE[0] = 0.0;
    _rtXdot->StateSpace_CSTATE[1] = 0.0;
    _rtXdot->StateSpace_CSTATE[2] = 0.0;
    _rtXdot->StateSpace_CSTATE[3] = 0.0;
    _rtXdot->StateSpace_CSTATE[0U] += rtP.StateSpace_A[0] * rtX.StateSpace_CSTATE
    [1];
    _rtXdot->StateSpace_CSTATE[1U] += rtP.StateSpace_A[1] * rtX.StateSpace_CSTATE
    [0];
    _rtXdot->StateSpace_CSTATE[1U] += rtP.StateSpace_A[2] * rtX.StateSpace_CSTATE
    [1];
    _rtXdot->StateSpace_CSTATE[1U] += rtP.StateSpace_A[3] * rtX.StateSpace_CSTATE
    [2];
}

```

```

_rtXdot->StateSpace_CSTATE[1U] += rtP.StateSpace_A[4] * rtX.StateSpace_CSTATE
[3];
_rtXdot->StateSpace_CSTATE[2U] += rtP.StateSpace_A[5] * rtX.StateSpace_CSTATE
[3];
_rtXdot->StateSpace_CSTATE[3U] += rtP.StateSpace_A[6] * rtX.StateSpace_CSTATE
[0];
_rtXdot->StateSpace_CSTATE[3U] += rtP.StateSpace_A[7] * rtX.StateSpace_CSTATE
[1];
_rtXdot->StateSpace_CSTATE[3U] += rtP.StateSpace_A[8] * rtX.StateSpace_CSTATE
[2];
_rtXdot->StateSpace_CSTATE[3U] += rtP.StateSpace_A[9] * rtX.StateSpace_CSTATE
[3];
_rtXdot->StateSpace_CSTATE[1U] += rtP.StateSpace_B[0] *
    rtB.TmpSignalConversionAtStateSpace[0];
_rtXdot->StateSpace_CSTATE[3U] += rtP.StateSpace_B[1] *
    rtB.TmpSignalConversionAtStateSpace[1];
}
extern "C" void MdlProjection(void)
{
}
extern "C" void MdlTerminate(void)
{
}
extern "C" void MdlInitializeSizes(void)
{
    ssSetNumContStates(rtS, 4);           /* Number of continuous states */
    ssSetNumY(rtS, 0);                   /* Number of model outputs */
    ssSetNumU(rtS, 0);                   /* Number of model inputs */
    ssSetDirectFeedThrough(rtS, 0);     /* The model is not direct feedthrough */
    ssSetNumSampleTimes(rtS, 2);        /* Number of sample times */
    ssSetNumBlocks(rtS, 18);            /* Number of blocks */
    ssSetNumBlockIO(rtS, 2);            /* Number of block outputs */
    ssSetNumBlockParams(rtS, 34);       /* Sum of parameter "widths" */
}

/* Function to initialize sample times. */
extern "C" void MdlInitializeSampleTimes(void)
{
    /* task periods */
    ssSetSampleTime(rtS, 0, 0.0);
    ssSetSampleTime(rtS, 1, 0.0);
    /* task offsets */
    ssSetOffsetTime(rtS, 0, 0.0);
    ssSetOffsetTime(rtS, 1, 1.0);
}

/* Function to register the model */
extern "C" SimStruct * PAVERTnBrusVibroplitaMMTT32222ZF3(void)
{
    static struct _ssMdlInfo mdlInfo;
    (void) memset((char *)rtS, 0,
                 sizeof(SimStruct));
    (void) memset((char *)&mdlInfo, 0,

```

```

        sizeof(struct _ssMdlInfo));
ssSetMdlInfoPtr(rtS, &mdlInfo);
{
    static time_T mdlPeriod[NSAMPLE_TIMES];
    static time_T mdlOffset[NSAMPLE_TIMES];
    static time_T mdlTaskTimes[NSAMPLE_TIMES];
    static int_T mdlTsMap[NSAMPLE_TIMES];
    static int_T mdlSampleHits[NSAMPLE_TIMES];
    static boolean_T mdlTNextWasAdjustedPtr[NSAMPLE_TIMES];
    static int_T mdlPerTaskSampleHits[NSAMPLE_TIMES * NSAMPLE_TIMES];
    static time_T mdlTimeOfNextSampleHit[NSAMPLE_TIMES];
    {
        int_T i;
        for (i = 0; i < NSAMPLE_TIMES; i++) {
            mdlPeriod[i] = 0.0;
            mdlOffset[i] = 0.0;
            mdlTaskTimes[i] = 0.0;
            mdlTsMap[i] = i;
            mdlSampleHits[i] = 1;
        }
    }
    ssSetSampleTimePtr(rtS, &mdlPeriod[0]);
    ssSetOffsetTimePtr(rtS, &mdlOffset[0]);
    ssSetSampleTimeTaskIDPtr(rtS, &mdlTsMap[0]);
    ssSetTPtr(rtS, &mdlTaskTimes[0]);
    ssSetSampleHitPtr(rtS, &mdlSampleHits[0]);
    ssSetTNextWasAdjustedPtr(rtS, &mdlTNextWasAdjustedPtr[0]);
    ssSetPerTaskSampleHitsPtr(rtS, &mdlPerTaskSampleHits[0]);
    ssSetTimeOfNextSampleHitPtr(rtS, &mdlTimeOfNextSampleHit[0]);
}
ssSetSolverMode(rtS, SOLVER_MODE_SINGLETASKING);
{
    ssSetBlockIO(rtS, ((void *) &rtB));
    (void) memset(((void *) &rtB), 0,
        sizeof(B));
}
/* parameters */
ssSetDefaultParam(rtS, (real_T *) &rtP);
/* states (continuous)*/
{
    real_T *x = (real_T *) &rtX;
    ssSetContStates(rtS, x);
    (void) memset((void *)x, 0,
        sizeof(X));
}
/* states (dwork) */
{
    void *dwork = (void *) &rtDW;
    ssSetRootDWork(rtS, dwork);
    (void) memset(dwork, 0,
        sizeof(DW));
}

```

```

/* data type transition information */
{
    static DataTypeTransInfo dtInfo;
    (void) memset((char_T *) &dtInfo, 0,
                  sizeof(dtInfo));
    ssSetModelMappingInfo(rtS, &dtInfo);
    dtInfo.numDataTypes = 14;
    dtInfo.dataTypeSizes = &rtDataTypeSizes[0];
    dtInfo.dataTypeNames = &rtDataTypeNames[0];
    /* Block I/O transition table */
    dtInfo.B = &rtBTransTable;
    /* Parameters transition table */
    dtInfo.P = &rtPTransTable;
}
/* Model specific registration */
ssSetRootSS(rtS, rtS);
ssSetVersion(rtS, SIMSTRUCT_VERSION_LEVEL2);
ssSetModelName(rtS, "PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3");
ssSetPath(rtS, "PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3");
ssSetTStart(rtS, 0.0);
ssSetTFinal(rtS, 3.0);
/* Setup for data logging */
{
    static RTWLogInfo rt_DataLoggingInfo;
    ssSetRTWLogInfo(rtS, &rt_DataLoggingInfo);
}
/* Setup for data logging */
{
    rtliSetLogXSignalInfo(ssGetRTWLogInfo(rtS), (NULL));
    rtliSetLogXSignalPtrs(ssGetRTWLogInfo(rtS), (NULL));
    rtliSetLogT(ssGetRTWLogInfo(rtS), "tout");
    rtliSetLogX(ssGetRTWLogInfo(rtS), "");
    rtliSetLogXFinal(ssGetRTWLogInfo(rtS), "");
    rtliSetSigLog(ssGetRTWLogInfo(rtS), "");
    rtliSetLogVarNameModifier(ssGetRTWLogInfo(rtS), "rt_");
    rtliSetLogFormat(ssGetRTWLogInfo(rtS), 0);
    rtliSetLogMaxRows(ssGetRTWLogInfo(rtS), 1000);
    rtliSetLogDecimation(ssGetRTWLogInfo(rtS), 1);
    rtliSetLogY(ssGetRTWLogInfo(rtS), "");
    rtliSetLogYSignalInfo(ssGetRTWLogInfo(rtS), (NULL));
    rtliSetLogYSignalPtrs(ssGetRTWLogInfo(rtS), (NULL));
}
{
    static struct _ssStatesInfo2 statesInfo2;
    ssSetStatesInfo2(rtS, &statesInfo2);
}
{
    static ssSolverInfo slvrInfo;
    static boolean_T contStatesDisabled[4];
    static real_T absTol[4] = { 1.0E-6, 1.0E-6, 1.0E-6, 1.0E-6 };
    static uint8_T absTolControl[4] = { 0U, 0U, 0U, 0U };
    ssSetSolverRelTol(rtS, 0.001);
}

```

```

ssSetStepSize(rtS, 0.0);
ssSetMinStepSize(rtS, 0.0);
ssSetMaxNumMinSteps(rtS, -1);
ssSetMinStepViolatedError(rtS, 0);
ssSetMaxStepSize(rtS, 0.2);
ssSetSolverMaxOrder(rtS, -1);
ssSetSolverRefineFactor(rtS, 1);
ssSetOutputTimes(rtS, (NULL));
ssSetNumOutputTimes(rtS, 0);
ssSetOutputTimesOnly(rtS, 0);
ssSetOutputTimesIndex(rtS, 0);
ssSetZCCacheNeedsReset(rtS, 0);
ssSetDerivCacheNeedsReset(rtS, 0);
ssSetNumNonContDerivSigInfos(rtS, 0);
ssSetNonContDerivSigInfos(rtS, (NULL));
ssSetSolverInfo(rtS, &slvrInfo);
ssSetSolverName(rtS, "ode45");
ssSetVariableStepSolver(rtS, 1);
ssSetSolverConsistencyChecking(rtS, 0);
ssSetSolverAdaptiveZcDetection(rtS, 0);
ssSetSolverRobustResetMethod(rtS, 0);
ssSetAbsTolVector(rtS, absTol);
ssSetAbsTolControlVector(rtS, absTolControl);
ssSetSolverAbsTol_Obsolete(rtS, absTol);
ssSetSolverAbsTolControl_Obsolete(rtS, absTolControl);
ssSetSolverStateProjection(rtS, 0);
ssSetSolverMassMatrixType(rtS, (ssMatrixType)0);
ssSetSolverMassMatrixNzMax(rtS, 0);
ssSetModelOutputs(rtS, MdlOutputs);
ssSetModelLogData(rtS, rt_UpdateTXYLogVars);
ssSetModelUpdate(rtS, MdlUpdate);
ssSetModelDerivatives(rtS, MdlDerivatives);
ssSetSolverMaxConsecutiveMinStep(rtS, 1);
ssSetSolverShapePreserveControl(rtS, 2);
ssSetTNextTid(rtS, INT_MIN);
ssSetTNext(rtS, rtMinusInf);
ssSetSolverNeedsReset(rtS);
ssSetNumNonsampledZCs(rtS, 0);
ssSetContStateDisabled(rtS, contStatesDisabled);
ssSetSolverMaxConsecutiveMinStep(rtS, 1);
}
ssSetChecksumVal(rtS, 0, 1090586066U);
ssSetChecksumVal(rtS, 1, 1721561101U);
ssSetChecksumVal(rtS, 2, 4152265002U);
ssSetChecksumVal(rtS, 3, 1654864621U);
return rtS;
}
/*file.h*/
#ifndef RTW_HEADER_PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3_h_
#define RTW_HEADER_PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3_h_
#ifndef PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3_COMMON_INCLUDES_
# define PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3_COMMON_INCLUDES_

```

```

#include <stdlib.h>
#include <stddef.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include "rtwtypes.h"
#include "builtin_typeid_types.h"
#include "multiword_types.h"
#include "simstruc.h"
#include "fixedpoint.h"
#include "rsim.h"
#include "rt_logging.h"
#include "dt_info.h"
#include "rt_defines.h"
#include "rt_nonfinite.h"
#endif
/*
PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3_COMMON_INCLUDES_ */
#include "PAVERTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3_types.h"
#define MODEL_NAME                PAVERTTrBrusVibroplitaMMTT3222ZF3
#define NSAMPLE_TIMES              (2)                /* Number of
sample times */
#define NINPUTS                   (0)                /* Number of
model inputs */
#define NOUTPUTS                  (0)                /* Number of
model outputs */
#define NBLOCKIO                  (2)                /* Number of data
output port signals */
#define NUM_ZC_EVENTS              (0)                /* Number of
zero-crossing events */
#ifndef NCSTATES
# define NCSTATES                  (4)                /* Number of
continuous states */
#elif NCSTATES != 4
# error Invalid specification of NCSTATES defined in compiler command
#endif
#ifndef rtmGetDataMapInfo
# define rtmGetDataMapInfo(rtm)    (NULL)
#endif
#ifndef rtmSetDataMapInfo
# define rtmSetDataMapInfo(rtm, val)
#endif
/* Block signals (auto storage) */
typedef struct {
    real_T StateSpace[4];          /* '<Root>/State-Space' */
    real_T TmpSignalConversionAtStateSpace[2];
} B;
/* Block states (auto storage) for system '<Root>' */
typedef struct {
    struct {
        real_T TimeStampA;
        real_T LastUAtTimeA;
        real_T TimeStampB;
        real_T LastUAtTimeB;
    }

```

```

} Derivative1_RWORK;          /* '<Root>/Derivative1' */
struct {
    real_T TimeStampA;
    real_T LastUAtTimeA;
    real_T TimeStampB;
    real_T LastUAtTimeB;
} Derivative_RWORK;          /* '<Root>/Derivative' */
struct {
    void *LoggedData;
} Acceleration_PWORK;       /* '<Root>/Acceleration ' */
struct {
    void *LoggedData;
} Ftamper_PWORK;            /* '<Root>/F tamper' */
struct {
    void *LoggedData;
} Screed_PWORK;             /* '<Root>/Screed' */

struct {
    void *LoggedData;
} Vibrator_PWORK;           /* '<Root>/Vibrator' */
} DW;
/* Continuous states (auto storage) */
typedef struct {
    real_T StateSpace_CSTATE[4];    /* '<Root>/State-Space' */
} X;
/* State derivatives (auto storage) */
typedef struct {
    real_T StateSpace_CSTATE[4];    /* '<Root>/State-Space' */
} XDot;
/* State disabled */
typedef struct {
    boolean_T StateSpace_CSTATE[4]; /* '<Root>/State-Space' */
} XDis;
/* Continuous State Absolute Tolerance */
typedef struct {
    real_T StateSpace_CSTATE[4];    /* '<Root>/State-Space' */
} CStateAbsTol;
/* Parameters (auto storage) */
struct P_ {
    real_T StateSpace_A[10];        /* Computed Parameter: StateSpace_A*/
    real_T StateSpace_B[2];         /* Computed Parameter: StateSpace_B*/
    real_T StateSpace_C[4];         /* Computed Parameter: StateSpace_C*/
    real_T StateSpace_X0;           /* Expression: 0.0*/
    real_T Gain4_Gain;               /* Expression: k3*/
    real_T Gain3_Gain;               /* Expression: c3*/
    real_T Constant1_Value;         /* Expression: m4*g*/
    real_T Gain_Gain;                /* Expression: (m3+m4) */
    real_T SineWave1_Amp;           /* Expression: ((m3+m4)*e*(2*pi*f3)^2-k3*e)
*/
    real_T SineWave1_Bias;           /* Expression: 0*/
    real_T SineWave1_Freq;          /* Expression: 2*pi*f3*/
    real_T SineWave1_Phase;         /* Expression: 0*/

```

```

real_T SineWave2_Amp;          /* Expression: c3*e*(2*pi*f3) */
real_T SineWave2_Bias;        /* Expression: 0*/
real_T SineWave2_Freq;        /* Expression: 2*pi*f3*/
real_T SineWave2_Phase;       /* Expression: pi/2 */
real_T Constant_Value;        /* Expression: (m4+m5)*g */
real_T SineWave3_Amp;         /* Expression: m*r*(2*pi*f2)^2 */
real_T SineWave3_Bias;        /* Expression: 0 */
real_T SineWave3_Freq;        /* Expression: 2*pi*f2*/
real_T SineWave3_Phase;       /* Expression: 0*/
};
extern P rtP;                  /* parameters */
/* External data declarations for dependent source files */
#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif
    extern const char *RT_MEMORY_ALLOCATION_ERROR;
#ifdef __cplusplus
}
#endif

extern B rtB;                  /* block i/o */
extern X rtX;                  /* states (continuous) */
extern DW rtDW;                /* states (dwork) */
/* Simulation Structure */
extern SimStruct *const rtS;
#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif
    extern const int_T gblNumToFiles;
    extern const int_T gblNumFrFiles;
    extern const int_T gblNumFrWksBlocks;
    extern rtInportTUTable *gblInportTUTables;
    extern const char *gblInportFileName;
    extern const int_T gblNumRootInportBlks;
    extern const int_T gblNumModelInputs;
    extern const int_T gblInportDataTypeIdx[];
    extern const int_T gblInportDims[];
    extern const int_T gblInportComplex[];
    extern const int_T gblInportInterpoFlag[];
    extern const int_T gblInportContinuous[];
#ifdef __cplusplus
}

```

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021661469

**Программный модуль – симулятор взаимодействия
рабочего органа укладчика с асфальтобетонной смесью**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Авторы: *Набижанов Жасурбек Ильхомович (RU), Прокопьев
Андрей Петрович (RU), Иванчура Владимир Иванович
(RU), Емельянов Рюрик Тимофеевич (RU)*

Заявка № **2021660501**

Дата поступления **01 июля 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **12 июля 2021 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев