

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2022

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Иванчура Владимир Иванович

Официальные оппоненты: **Кузнецов Сергей Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный
университет путей сообщения», кафедра
технологии, организации и экономики
строительства, профессор

Лосев Василий Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный
университет науки и технологии имени
академика М.Ф. Решетнева», кафедра
автоматизации производственных процессов,
доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Защита состоится «20» мая 2022 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.403.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу: 660037 г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М.Ф. Решетнева» и на сайте <https://www.sibsau.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сроки службы асфальтобетонных (АБ) покрытий автомобильных дорог (АД) в России не соответствуют нормативным требованиям и значительно меньше, чем в странах с развитой рыночной экономикой. Срок службы АБ покрытий в основном зависит от качества АБ смесей и уплотнения слоев дорожных покрытий. По данным дорожной статистики из-за низкого качества уплотнения АБ смесей образуются до 50 % от всех дефектов и разрушений покрытий. Уплотнение АБ смеси традиционно выполняют асфальтоукладчик (АУ) и звено дорожных катков легкого, среднего, тяжелого типов. При оптимальной настройке режимных параметров уплотняющих рабочих органов современные АУ могут обеспечить уплотнение АБ смеси с коэффициентом 0,96 и выше, уменьшить стоимость дорожного строительства за счет сокращения типов и количества дорожных катков. Автоматических систем, позволяющих в реальном времени определять коэффициент уплотнения АБ смеси асфальтоукладчиками, и систем автоматического управления (САУ) процессом уплотнения для АУ не производят. Разработка таких систем позволит повысить уровень автоматизации АУ и создать условия для применения в дорожном строительстве ряда цифровых технологий (BIM, Big Data, IoT и другие). В настоящее время в нашей стране по уровню цифровизации и автоматизации строительство имеет самый низкий рейтинг среди промышленных отраслей.

Степень проработанности темы. 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 АБ 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.

Предмет 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 контроля 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 непрерывного анализа уплотнения асфальтобетонных смесей позволяет определять коэффициент уплотнения в процессе укладки.

– 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: «CYBERPHU», 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.; «CYBERPHU», г. Казань, 2020 г. «APITECH» г. Красноярск, 2020; «CYBERPHU», 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 АБ смесей асфальтоукладчиками [1, 2]. Разработаны модели систем нейросетевого непрерывного контроля уплотнения для прогнозирования коэффициента уплотнения [4–8, 14]. Разработана модель системы нейросетевого управления уплотнением в процессе укладки [3, 9, 12, 13]. Разработано программное обеспечение для математического моделирования процесса уплотнения и нейросетевой системы управления уплотнением [10, 11].

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 144 страницах печатного текста, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. В работе представлено 62 рисунков, 10 таблиц и 49 формул.

Благодарности. Автор глубоко признателен 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 соискателя, за поддержку и внимание к диссертационной работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ методов, моделей и информационных технологий неразрушающего контроля уплотнения при строительстве асфальтобетонных дорожных покрытий.

Технологический процесс строительства АБ покрытий выполняется АУ (рисунок 1) и дорожными катками. Уплотняющие рабочие органы АУ производят уплотнение при максимальной температуре АБ смеси. Основное влияние на степень уплотнения покрытия оказывает трамбуемый брус, что подтверждается работами А.В. Ушкова, Н.П. Воцинина и др. Вибрационная плита практически не оказывает влияния на увеличение плотности АБ смеси, но способствует улучшению качества поверхности уплотненного покрытия.

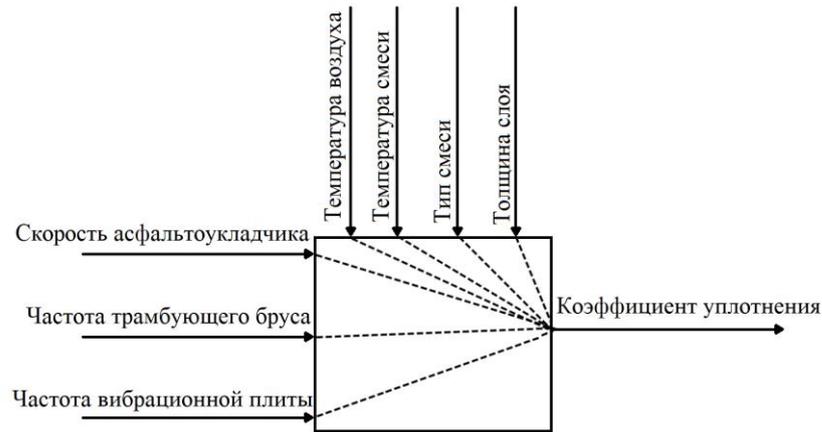


Рисунок 1. Технологический процесс уплотнения АБ покрытий асфальтоукладчиком

Ведущие зарубежные производители дорожных катков имеют адаптированные для своих моделей машин системы автоматического контроля уплотнения дорожных материалов, функционирующие на базе сигналов акселерометров. Исходными параметрами в системах непрерывного контроля уплотнения для расчета показателей являются сигналы ускорения валцов.

В Российской Федерации ведутся исследования, посвященные разработке систем непрерывного контроля уплотнения для вибрационных катков, также рассмотрены задачи моделирования процессов уплотнения и создания системы контроля коэффициента уплотнения для асфальтоукладчиков.

По результатам научных исследований в предметной области неразрушающих технологий непрерывного контроля уплотнения дорожных материалов можно сделать выводы, что требуется разработка новых и модифицированных моделей рабочих процессов, методов контроля и управления уплотнением в режиме реального времени для асфальтоукладчиков.

Во второй главе разработана модифицированная имитационная модель технологического процесса уплотнения дорожных материалов для асфальтоукладчиков. В общую структуру имитационной модели включена модель вязко-упругого тела Фойгта-Кельвина, состоящая из соединенных параллельно моделей Гука и Ньютона. Основные цели имитационного моделирования – получение параметров рабочих органов асфальтоукладчика для разработки метода нейросетевого контроля K_u в режиме реального времени.

Расчетная схема модели уплотняющего рабочего органа асфальтоукладчика представлена на рисунке 2. 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.

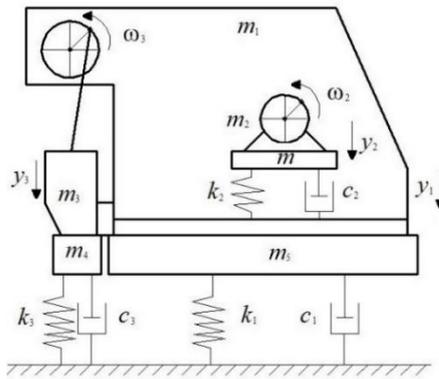


Рисунок 2. Расчетная схема модели процесса уплотнения смеси асфальтоукладчика

Математическая модель отражает одновременно и динамику колебаний элементов конструкции и реологические свойства уплотняемой среды:

дифференциальное уравнение движения выглаживающей плиты

$$(m_1 + m_5) \cdot \ddot{y}_1 + (c_1 + c_2) \cdot \dot{y}_1 - c_2 \cdot \dot{y}_2 + (k_1 + k_2) \cdot y_1 - k_1 \cdot y_2 = -F_3 + (m_1 + m_5) \cdot g \quad (1)$$

дифференциальное уравнение движения трамбующего бруса

$$(m_3 + m_4) \cdot \ddot{y}_3 + c_3 \cdot \dot{y}_3 + k_3 \cdot y_3 = F_3 + m_4 \cdot g \quad (2)$$

дифференциальное уравнение колебаний вибратора

$$m_2 \cdot \ddot{y}_2 - c_2 \cdot \dot{y}_1 + c_2 \cdot \dot{y}_2 - k_2 \cdot y_1 + k_2 \cdot y_2 = m \cdot r \cdot \omega_2^2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) \quad (3)$$

В программной среде MATLAB/Simulink представлена разработанная модифицированная имитационная модель с учетом математической модели (рисунок 3).

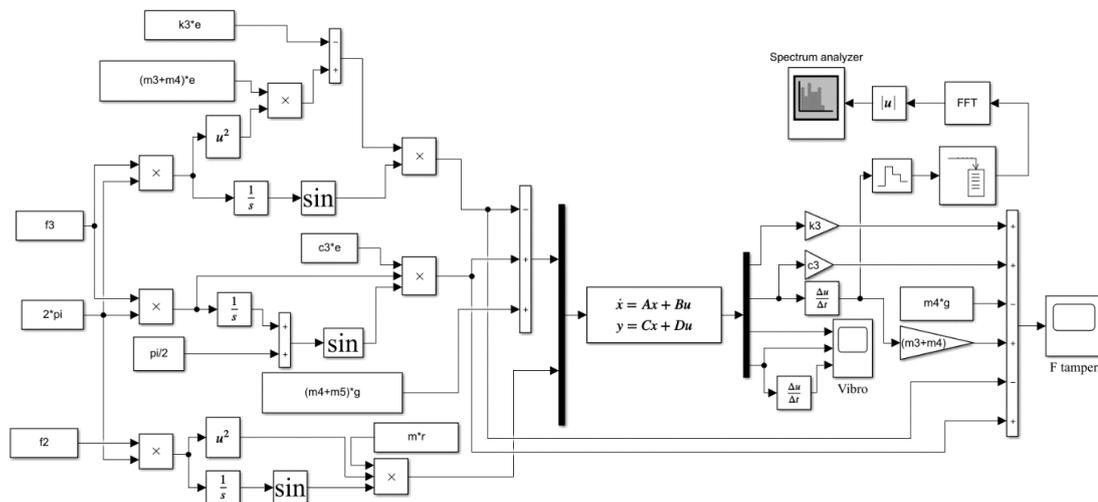


Рисунок 3. Имитационная модель на языке MATLAB/Simulink

Спектральный анализ данных временных рядов вертикального ускорения колебаний вибрационной плиты проводится на основе метода БПФ. Преобразованные сигналы поступают в блок анализатора спектра, который отображает частотные характеристики сигналов.

В результате получены численные значения параметров процесса уплотнения смеси АУ: ускорение вибрационной плиты, усилие толкателя трамбующего бруса и частотные характеристики сигналов ускорения вибрационной плиты. Полученные временные зависимости соответствуют колебательному процессу, причем наблюдаются признаки устойчивости динамической системы (рисунок 4).

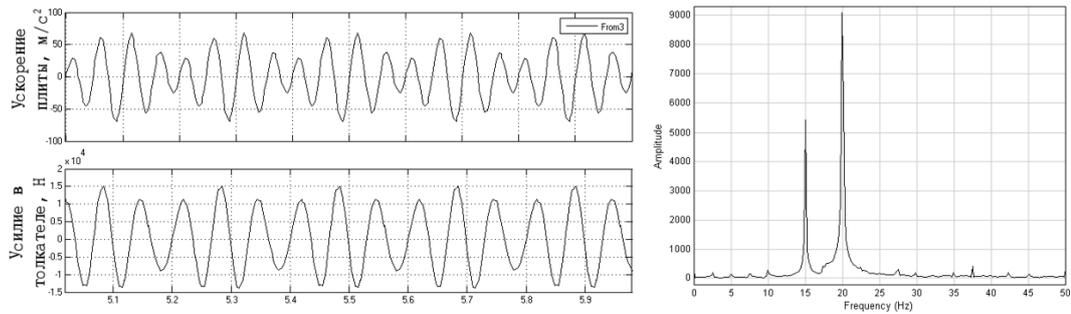
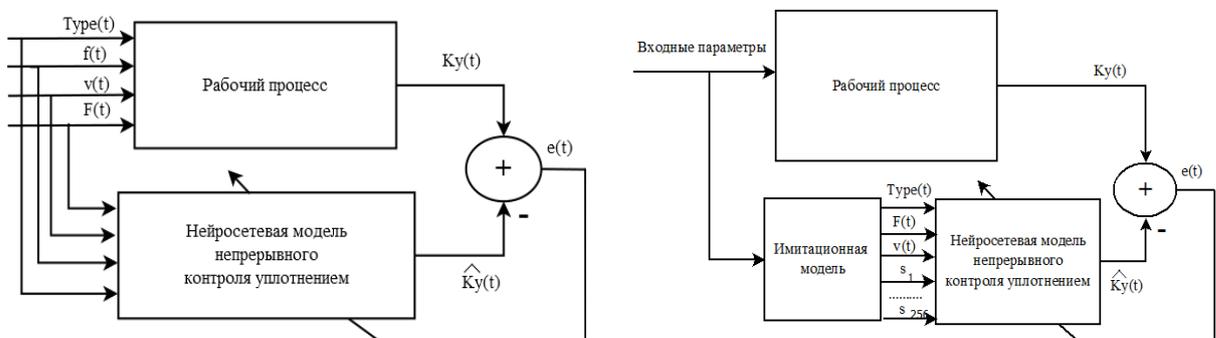


Рисунок 4. Результаты моделирования при скорости движения 1 м/мин для смеси типа А

В третьей главе описаны новые методы непрерывного контроля и управления процессом уплотнения дорожных покрытий и структура интеллектуальной АСУ, функционирующей при различных значениях заданного K_y .

Имитационные модели дают наглядное представление о структуре рабочих процессов, но нелинейные зависимости между показателями рабочих процессов затрудняют дальнейшее использование моделей для проектирования регуляторов и автоматизации контроля технологического процесса. Проблемы автоматизации сложных технологических объектов, которыми являются АУ, заставляют искать более эффективные методы математического моделирования их рабочих процессов и синтеза систем управления. Одним из таких методов является использование нейросетевых технологий. В этом случае идентификация рабочего процесса заключается в разработке нейросетевой модели на основе входных и выходных экспериментальных данных.

Разработаны метод непрерывного анализа уплотнения и система прогнозирования качества уплотнения смесей для АУ на основе ИНС, которые позволяют находить и воспроизводить нелинейные зависимости между экспериментально измеренными показателями рабочего процесса уплотнения АБ смесей. Система прогнозирования базируется на разработанной имитационной модели, где входными параметрами ИНС служат тип смеси ($Type$), скорость движения укладчика (v), усилие в толкателе трамбуемого бруса (F) и частотные характеристики сигналов ускорений вибрационной выглаживающей плиты (s_1 - s_{256}). Метод непрерывного анализа построен на основе значений информационных сигналов, полученных в полевых условиях, таких как частота колебания трамбуемого бруса (f), тип смеси ($Type$), скорость движения АУ (v) и максимальное усилие в толкателе трамбуемого бруса (F). Выходным параметром разработанных методов является значение коэффициента уплотнения (K_y) (рисунок 5).



а) $K_y = f(Type, f_t, v, F)$

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

Рисунок 5. Схема методов непрерывного контроля уплотнения в процессе укладки асфальтобетонных смесей: а) непрерывный анализ; б) система прогнозирования

Проведена статистическая обработка информационных сигналов, фильтрация исходных данных и формирование обучающей выборки для ИНС. Целью непрерывного контроля является определение K_u в режиме реального времени.

Для системы прогнозирования на входной слой ИНС подается 259 информационных сигналов. Необходимое количество нейронов в скрытых слоях можно определить по формуле, являющейся следствием из теорем В.И. Арнольда, А.Н. Колмогорова и Х. Нильсена.

Поиск необходимого количества синаптических связей N_w , определяется по формуле:

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y \quad (4)$$

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 данного метода использованы два скрытых слоя. Количество нейронов для двух скрытых слоев рассчитывается по формуле:

для первого скрытого слоя:

$$\sqrt{(N_y + 2)Q} + 2\sqrt{Q/(N_y + 2)}; \quad (5)$$

для второго скрытого слоя:

$$N_y \sqrt{Q/(N_y + 2)}. \quad (6)$$

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.

В результате компьютерного моделирования (рисунок 6) оценена точность определения K_u путем сравнения полученных результатов с результатами лабораторных исследований. Средняя относительная ошибка составляет 3%.

На основании предварительных испытаний и характеристик АУ были выявлены основные параметры технологического процесса, на основе которых была разработана система прогнозирования. Полученные данные были обработаны с помощью методов математической статистики для обоснования и извлечения зависимости параметров. При низких и средних частотах колебаний рост скорости движения укладки, приводит к снижению K_u . Увеличение частоты колебаний трамбующего бруса до определенного значения (в зависимости от температуры смеси) K_u возрастает. Зависимость K_u от максимального усилия происходит постепенно и достигает максимальную величину после 4-5 воздействий трамбующим брусом. После определения количества синаптических связей с помощью формулы (4), определено оптимальное количество нейронов на скрытом слое согласно теореме А.Н. Колмогорова:

$$N_w / (N_x + N_y). \quad (7)$$

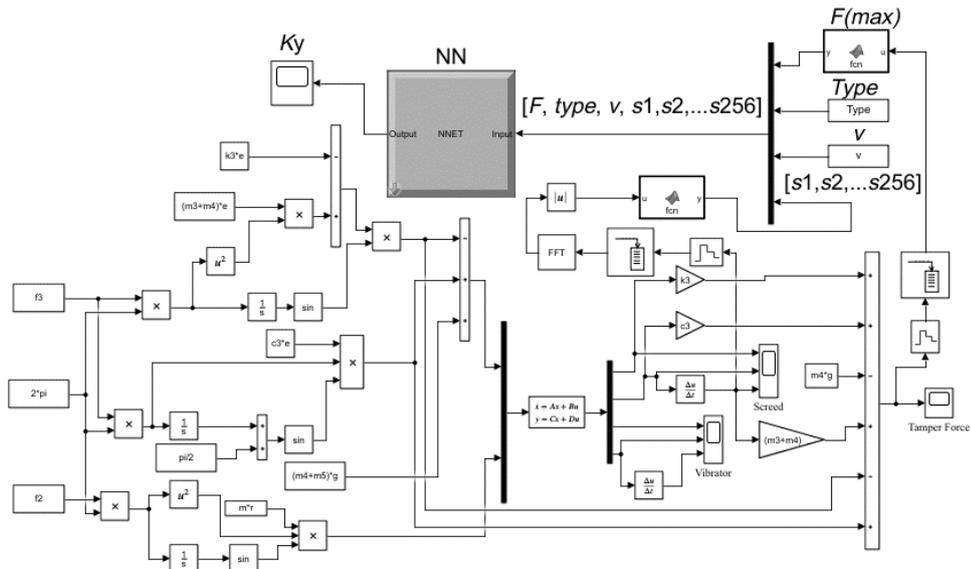


Рисунок 6. Имитационная модель системы непрерывного контроля уплотнения

Структура нейросетевой модели представляет собой многослойную нейронную сеть с 10 нейронами в скрытом слое (рисунок 7). В качестве функции активации на выходе скрытого слоя использован гиперболический тангенс, а на выходном слое линейная функция. Сеть обучена методом Левенберга-Марквардта.

Обученная нейронная сеть показывает хорошее согласие с экспериментальными результатами и результатами полученными в полевых условиях.

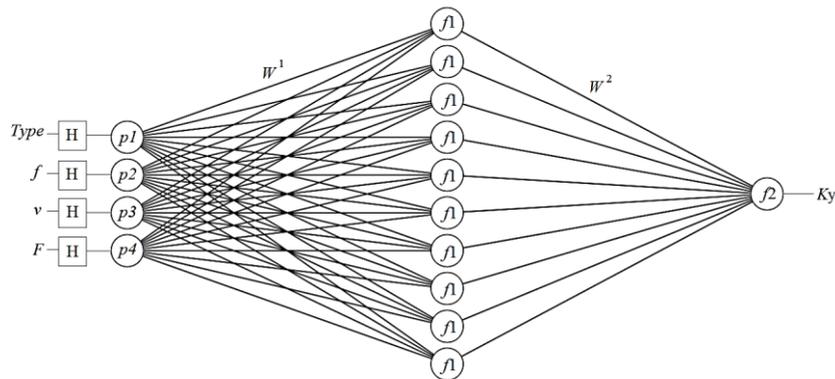


Рисунок 7. Архитектура нейронов для второго варианта

Оценена точность прогнозирования значения коэффициента уплотнения K_u (таблица 1) путем сравнения полученных результатов, где средняя относительная ошибка для системы прогнозирования составляет 5 %, а для метода непрерывного анализа – 3 %.

Таблица 1. 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

Динамические свойства машины, а также статистические характеристики информационных сигналов изменяются в процессе уплотнения в широком диапазоне. Фиксированные и заранее заданные значения параметров рабочего процесса уплотнения при укладке АБ смесей не могут обеспечить требуемого значения коэффициента уплотнения смеси на всем участке дорожного покрытия. Для этого необходимо автоматизированное управление процессом уплотнения с учетом заданного значения K_u .

Предложена нейросетевая система управления процессом уплотнения при укладке асфальтобетонных смесей. Идентификацию рабочего процесса в реальном времени обеспечивает нейросетевая модель контроля уплотнения дорожного покрытия и параметров процесса.

Предложена функциональная схема нейросетевой САУ (рисунок 8). Здесь y – регулируемый параметр K_u ; g – заданное значение K_u ; y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 – переменные на входе нейросетевой системы непрерывного контроля, называемой «Система автоматического контроля уплотнения – САКУ» (тип смеси, скорость АУ, усилие в толкателе трамбуемого бруса, частота трамбуемого бруса, толщина слоя, соответственно); v_1, v_2, v_3 – переменные на входе нейросетевого регулятора (НСР) (тип смеси, скорость движения АУ, толщина слоя соответственно).

В исследовании использована схема инверсного нейроруления, в которой для обучения НС принята ошибка выхода системы, а входным сигналом может быть случайное воздействие (рисунок 9).

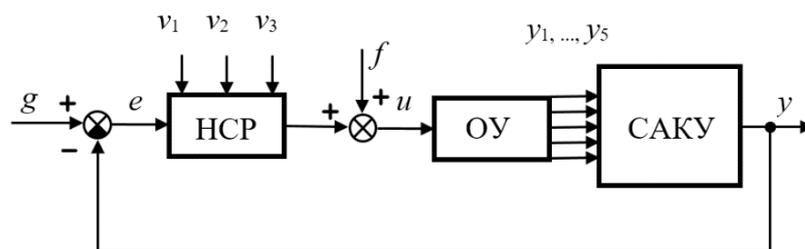


Рисунок 8. Функциональная схема нейросетевой САУ

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

$$W(s) = \frac{0,0125 \cdot s^3 + 0,08642 \cdot s^2 + 425,1 \cdot s}{s^4 + 29,41 \cdot s^3 + 1,716 \cdot 10^5 \cdot s^2 + 1,164 \cdot 10^6 \cdot s + 2,99 \cdot 10^9}. \quad (8)$$

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

$$Y = \{y(k), y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n)\}. \quad (9)$$

После обработки и масштабирования обучающей выборки определена архитектура ИНС, функцией активации в которой между входным и скрытым слоями является тангенциальная, а на выходе – линейная. ИНС обучена методом Левенберга-Марквардта. Данные параметры подобраны экспериментальным путем и показали наилучшие результаты.

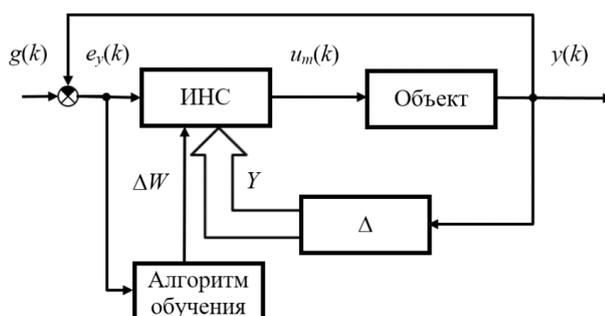


Рисунок 9. Функциональная схема обучения инверсной модели ИНС по ошибке выхода: Δ – набор элементов задержки, количество которых должно быть не меньше, чем порядок объекта; ΔW – изменение вектора весов ИНС; $u_m(k)$ – выход инверсной модели; $e_y(k)$ – ошибка выхода системы; Y – выходы объекта управления

После обучения нейроконтроллер ПИД-типа включается на входе объекта управления (рисунок 10).

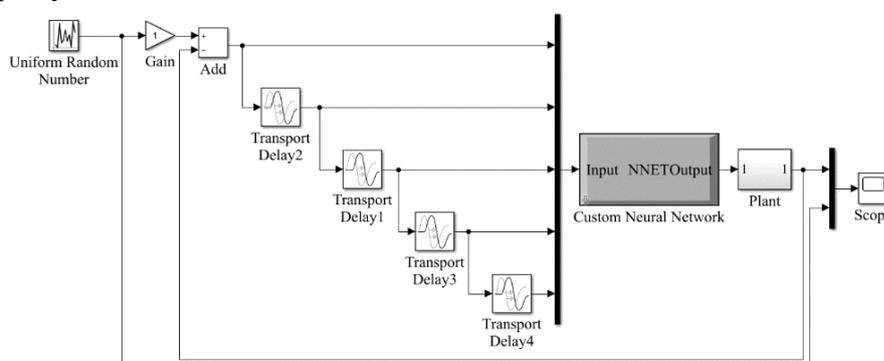


Рисунок 10. Модель системы управления с нейроконтроллером ПИД-типа

Получен график переходного процесса разработанной системы управления с нейросетевым регулятором при ступенчатом изменении заданного значения K_u (рисунок 11).

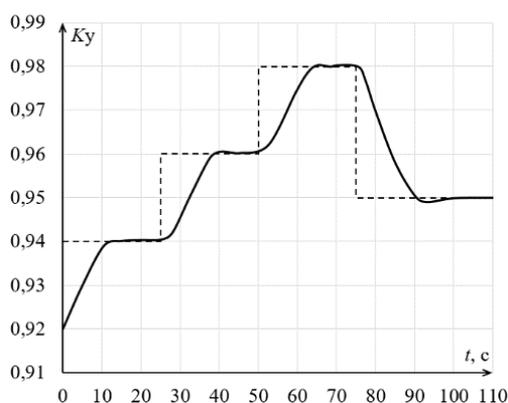


Рисунок 11. Переходный процесс системы управления с нейросетевым регулятором

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.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритмического и аппаратно-программного комплекса нейросетевой системы непрерывного контроля и управления уплотнением в процессе укладки асфальтобетонных смесей, а также о полевых исследованиях компонентов автоматизации.

Нейросетевая система управления уплотнением реализована аппаратно-программными средствами (рисунок 12).

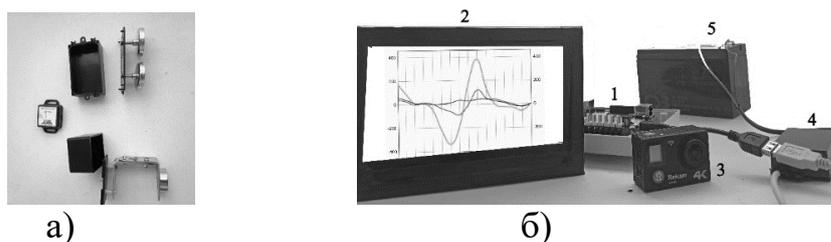


Рисунок 12. Аппаратно-программный комплекс: а) акселерометр с корпусом и магнитом; б) 1 – миникомпьютер с программируемым контроллером; 2 – дисплей с тач-панелью; 3 – фото/видео экшн-камера; 4 – преобразователь напряжения и тока; 5 – аккумулятор

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. 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 °С – 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.

Результаты полевых и лабораторных исследований процесса уплотнения при укладке смеси приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты полевых и лабораторных исследований процесса уплотнения асфальтобетонной смеси при укладке

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) обеспечивает повышение производительности и улучшение качества уплотнения асфальтобетонной смеси асфальтоукладчиком в режиме реального времени за счет автоматического регулирования коэффициента уплотнения изменением частоты колебания трамбующего бруса (подтверждено актом внедрения).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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 АУ, 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 НС, 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 КУ в режиме реального времени. Средняя относительная ошибка точности прогнозирования КУ составляет менее 5 %.

Разработан новый метод нейросетевого управления уплотнением АБ смесей асфальтоукладчиками на основе инверсной нейросетевой модели с учетом заданного значения КУ, дающий возможность автоматизировать управление Ку путем изменения частоты колебания трамбуемого бруса рабочего органа АУ. Система управления позволяет изменять режимы работы АУ для получения Ку с учетом заданного значения Ку, улучшает организацию управления технологическими процессами при строительстве АБ 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 АБ 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Набижанов, Ж.И. 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.

2. Набижанов, Ж.И. 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

3. Набижанов, Ж.И. Нейросетевая система управления процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками / А.П. Прокопьев, Ж.И. Набижанов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – №10. – 10 с.

Публикации в изданиях, индексируемых в SCOPUS и Web of Science:

4. Nabizhanov, Z.I. Real-time neural network system for non-destructive control of asphalt mixtures compaction / Z.I. Nabizhanov, A.P. Prokopev, R.T. Emelyanov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – № 1181. – 6 p.

5. Nabizhanov, Z.I. Model of object non-destructive technology of road surfaces compaction control / A.P. Prokopev, Z.I. Nabizhanov, R.T. Emelyanov, V.I. Ivanchura // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – № 1889. – 7 p.

6. Nabizhanov, Z.I. On the task of designing an object of cyber-physical quality control system for asphalt mixtures compaction / A.P. Prokopev, Z.I. Nabizhanov, R.T. Emelyanov, V.L. Sabinin // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – № 1889(2). – 7 p.

7. Nabizhanov, Z.I. Modeling the highly effective object for continuous compaction control of the cyber-physical road-construction system compaction / A.P. Prokopev, Z.I. Nabizhanov, R.T. Emelyanov, V.I. Ivanchura // Studies in Systems, Decision and Control. Springer Nature Switzerland AG. – 2021. – P. 179-190.

8. Nabizhanov, Z.I. To the question of determining indicators for evaluating quality compaction and efficiency for pavers / A.P. Prokopev, Z.I. Nabizhanov, R.T. Emelyanov, V.L. Sabinin // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – № 1181(1). – 6 p.

9. Nabizhanov, Z.I. Model of intelligent control system of road-building material compaction by pavers / A.P. Prokopev, Z.I. Nabizhanov, V.I. Ivanchura, V.L. Sabinin // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – № 1181(1). – 7 p.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021661469. Программный модуль – симулятор взаимодействия рабочего органа укладчика с асфальтобетонной смесью / Ж.И. Набижанов, А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура, Р.Т. Емельянов. – 1 июля 2021 г.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021661554. Программный модуль нейросетевого прогнозирования коэффициента уплотнения дорожных материалов для укладчика / Ж.И. Набижанов, А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура, Р.Т. Емельянов. – 2 июля 2021 г.

Заявка на регистрацию полезной модели:

12. Набижанов, Ж.И. Система автоматического управления рабочим органом асфальтоукладчика с нейросетевым контролем уплотнения / Ж.И. Набижанов, А.П. Прокопьев и др. // Уведомление о приеме и регистрации заявки на полезную модель №2021119587 от 02.07.2021 г.

13. Набижанов, Ж.И. Нейросетевая система автоматического управления уплотнением дорожных материалов асфальтоукладчиками / Ж.И. Набижанов, А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура, Р.Т. Емельянов // Уведомление о приеме и регистрации заявки на полезную модель №2021119588 от 02.07.2021 г.

Публикации в других изданиях:

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