

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОВ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНВЕЙЕРА ДАННЫХ

А. П. Прокопьев✉

*Кафедра «Строительные материалы и технологии строительства»,
prok1@yandex.ru; ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,
Красноярск, Россия*

Ключевые слова: асфальтоукладчик; интеллектуальное уплотнение; конвейер анализа данных; машинное обучение; непрерывный контроль плотности; программно-аппаратные средства.

Аннотация: Непрерывный контроль качества уплотнения асфальтобетонных смесей в процессе строительства автомобильных дорог по технологии интеллектуального уплотнения строится на базе датчиков ускорения, устанавливаемых на вибрационных вальцах дорожных катков. Представлены варианты повышения эффективности управления плотностью при работе звена автоматизированных дорожных машин на основе использования системы непрерывного контроля для асфальтоукладчика, в том числе за счет обеспечения более высокой степени уплотнения, а также оптимизации звена дорожных катков и снижения стоимости дорожных покрытий. Предложено построение аппаратно-программного обеспечения для укладчиков разрабатывать с учетом концепции его жизненного цикла. В системе предусматривается обработка данных переменных на базе подходов, применяемых при разработке конвейеров машинного обучения. Показаны вариант конвейера данных и алгоритм обработки переменных в интеллектуальной системе контроля плотности для укладчиков.

Введение

Значительным резервом повышения эффективности дорожного строительства является автоматическое управление плотностью асфальтобетонной (АБ) смеси укладчиками. В работе [1] представлены результаты испытаний асфальтоукладчика (АУ) с высокоэффективным рабочим органом, который позволяет получить нормативную уплотненность АБ-смеси типа А марки I (ГОСТ 9128–2013) при скорости движения 3 м/мин, а также обеспечить экономию трудовых и энергетических ресурсов при сокращении обычно применяемых в технологическом процессе уплотнения дорожных катков легкого и среднего типов. Аналогом системы автоматического контроля плотности (САКП) для АУ являются программно-аппаратные средства систем интеллектуального уплотнения (*англ.* Intelligent Compaction (IC)) и непрерывного контроля уплотнения (*англ.* Continuous Compaction Control (CCC)) [2]. Большинство полевых исследований дорожных катков с системами IC/CCC разных производителей показали очень слабую корреляцию между показателями IC (*англ.* Intelligent Compaction Measurement Values (ICMV)) и плотностью АБ-смесей [3, 4].

Цель работы – построение новой открытой платформы системы автоматического контроля плотности АБ-смеси для АУ, созданной на базе современных программно-аппаратных средств с конвейером обработки данных.

Усовершенствование технологического процесса

Выполненные в работе исследования позволили сформулировать положения нормативно-технического документа для правильного учета изменений в технологических процессах уплотнения АБ-смесей дорожных машин, оснащенных техническими средствами: системами автоматического контроля (САК)/системами автоматизированного управления (САУ) плотностью. Предложено изменение в форме дополнения в нормативный документ организации КГКУ «КрУДор» (Красноярский край) СТО 01-2020 (с изменением № 2) «Правила разработки и оформления проектов производства работ на капитальный ремонт и ремонт автодорог», представив п. 5.5 СТО 01-2020 в трактовке, позволяющей учитывать использование оснащенных САК/САУ плотностью для АУ и дорожных катков при формировании звеньев дорожных машин в документе «Технологическая схема потока», входящего в состав основного организационно-технологического документа – проекта производства работ на устройство АБ-покрытия автомобильной дороги.

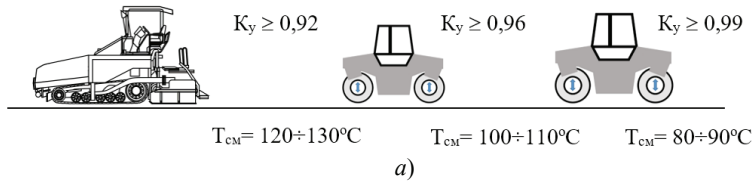
Пункт 5.5 СТО 01-2020 (с изменением № 2) предложено изложить в новой редакции с изменением в форме дополнения: «5.5 Технологическая схема потока – документ, в котором приводят технологическую последовательность строительных работ, указывают составы отрядов, машины и механизмы на все виды периода с разбивкой их по конструктивным элементам, распределением по километрам или пикетам; время выполнения работ; движение специализированных подразделений или отдельных бригад, работающих в составе комплексных или специализированных потоков; сосредоточенные работы»;

дополнение к п. 5.5 «При формировании составов звеньев дорожных машин – асфальтоукладчиков и дорожных катков, оснащенных системами автоматического контроля (управления) плотности АБ-смеси, в целях обеспечения высокого качества дорожного покрытия по всей ширине полосы (автомобильной дороги) и повышения производительности уплотнения, рекомендуется планировать организацию комплектов звеньев на основе установленной максимальной уплотняющей способности АУ. Подбор типов и количества автоматизированных дорожных катков рекомендуется осуществлять с учетом прогноза значений плотности (коэффициента уплотнения) после АУ и наличия дорожных катков на предприятии. Для операционного контроля качества уплотнения АБ-смеси АУ необходимо проводить точечный контроль плотности портативным плотномером».

Варианты технологических схем потока с использованием звеньев автоматизированных дорожных машин приведены на рис. 1. Современный вариант технологического процесса уплотнения с автоматизированными вибрационными катками, оснащенными приборами непрерывного контроля плотности показан на рис. 1, а. Предложен усовершенствованный вариант технологии уплотнения (см. рис. 1, б), предусматривающий использование принципа максимальной уплотняющей эффективности АУ, оснащенных САК / САУ плотностью, и автоматизированных катков тяжелого типа ($11 \div 14$).

Технологический процесс уплотнения верхних слоев АБ-покрытий с учетом предложенного усовершенствования характеризуется следующими действиями звена дорожных машин. Между АУ и дорожными катками обеспечивается информационное взаимодействие мобильными сетями 4G – 5G. Асфальтоукладчики и вибрационные катки создают силовое трамбуемое (трамбуемый брус), вибрационное (вибрационная плита, вибрационный валец катка) и статическое (валец

Асфальтоукладчик без САУ (САК) плотностью АБ-смеси **Каток (средний) 6÷10 т Автоматика IC/ССС** **Каток (тяжелый) 11÷14 т Автоматика IC/ССС**



Асфальтоукладчик с САУ (САК) плотностью АБ-смеси **Каток (тяжелый) 11÷14 т Автоматика IC/ССС**

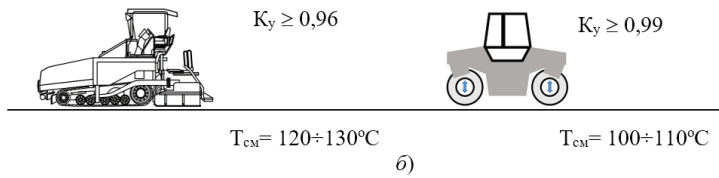


Рис. 1. Варианты звеньев машин для уплотнения АБ-смесей

катка) уплотняющее воздействия на АБ-смесь. Заключительное уплотнение АБ-смеси выполняется тяжелыми катками – 2 ÷ 4 прохода по одному следу с использованием вибрационного и(или) статического режимов, в зависимости от плотности АБ-смеси после АУ.

Предложена структурно-функциональная схема системы управления плотностью АБ-смеси звеном дорожных машин (рис. 2). Автоматизированная система управления отличается от существующих новым модулем САКП АУ, блоком интеллектуального принятия решения и прибором распознавания аномалий в системе управления дорожным катком.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: y^* – задающее воздействие (уставка); e – ошибка регулирования; u^* , y – регулирующий вход и регулируемый

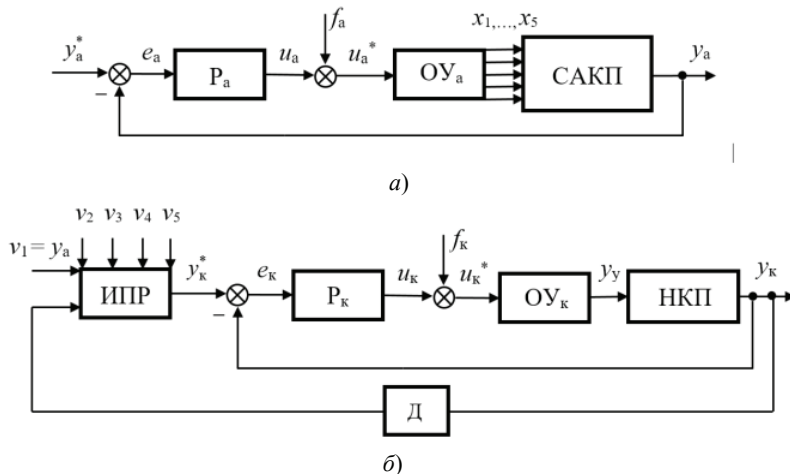


Рис. 2. Структурно-функциональная схема системы автоматизированного управления плотностью АБ-смеси звеном дорожных машин:
 а – асфальтоукладчиком; б – вибрационным катком

выход объекта соответственно; f – внешние возмущения, приложенные ко входу объекта; ОУ – объект управления; Р – регулятор; ИПР, НКП – блоки соответственно интеллектуального принятия решения и непрерывного контроля плотности; Д – прибор распознавания аномалий; y_1, \dots, y_5 – переменные на входе САКП: показатель типа смеси, скорость АУ, усилие трамбуемого бруса, частота трамбуемого бруса и толщина слоя соответственно; v_1, \dots, v_5 – переменные на входе блока ИПР: коэффициент уплотнения K_y , скорость катка, температура смеси, температура воздуха, частота вибрации соответственно; индексы: а – АУ; к – дорожный каток.

Задающее воздействие САУ плотностью АУ y_a^* определяется на этапе подготовки проекта производства работ с учетом наличия дорожных катков, максимальной уплотняющей способности укладчика. Регулирующей переменной является частота ударов трамбуемого бруса. Выходная переменная САУ плотностью (САУП) укладчиком y_a определяется в блоке интеллектуальной САКП и в режиме реального времени передается на вход САУП вибрационных катков. Входные данные САУП вибрационных катков: K_y после прохода АУ; скорость дорожного катка; частота колебаний вибратора вальца; температура поверхности слоя; температура воздуха. Уставка y_k^* определяется в блоке интеллектуального принятия решения. Регулируемая переменная дорожного катка K_y определяется в реальном времени САК плотности после каждого прохода. В главной обратной связи САУ для обнаружения рассогласования параметров сигналов и его преобразования в сигнал, удобный для дальнейшей обработки, используется блок распознавания аномалий.

Построение конвейера обработки данных

Построение САК плотности для АУ выполнено на основе подходов, применяемых при разработке конвейеров машинного обучения [5]. Разработка аппаратно-программного обеспечения платформы САКП проведена с учетом дальнейшего использования в разных моделях АУ на территории Российской Федерации, а также последующей технической поддержки и обновлений. Для обеспечения этих функций предложена архитектура конвейера обработки данных.

Предложенная встроенная платформа САКП собирает необработанные данные из трех потоков данных переменных (рис. 3). Основной поток данных предназначен для сбора данных акселерометра по вертикальному каналу в режиме реального времени. Два других потока данных непрерывно собирают данные о температуре поверхности АБ-смеси и местоположении АУ.

Постоянные данные переменные, включая параметры АУ, такие как частота трамбования брусом f_t , частота колебания вибратора плиты f_{scr} , скорость АУ v_a , эксцентриковый момент m_{er_e} , толщина слоя h_a , которые используются для определения данных входного вектора модели нейро-нечеткой САК плотности, собираются через пользовательский интерфейс перед началом процесса уплотнения. Цикл обработки данных (рис. 3) начинается со сбора данных напряжения из акселерометра со встроенной электроникой стандарта ICP (*англ.* Integrated Circuit Piezoelectric) пьезоэлектрического ИЕРЕ, с устройством регистрации данных DAQ (*англ.* Data Acquisition), пропорциональных значениям канала вертикального ускорения.

Введем обозначения: f_d – частота дискретизации системы ИЕРЕ DAQ; N – количество выборок данных, отобранных для обработки с заданной частотой отбора проб.

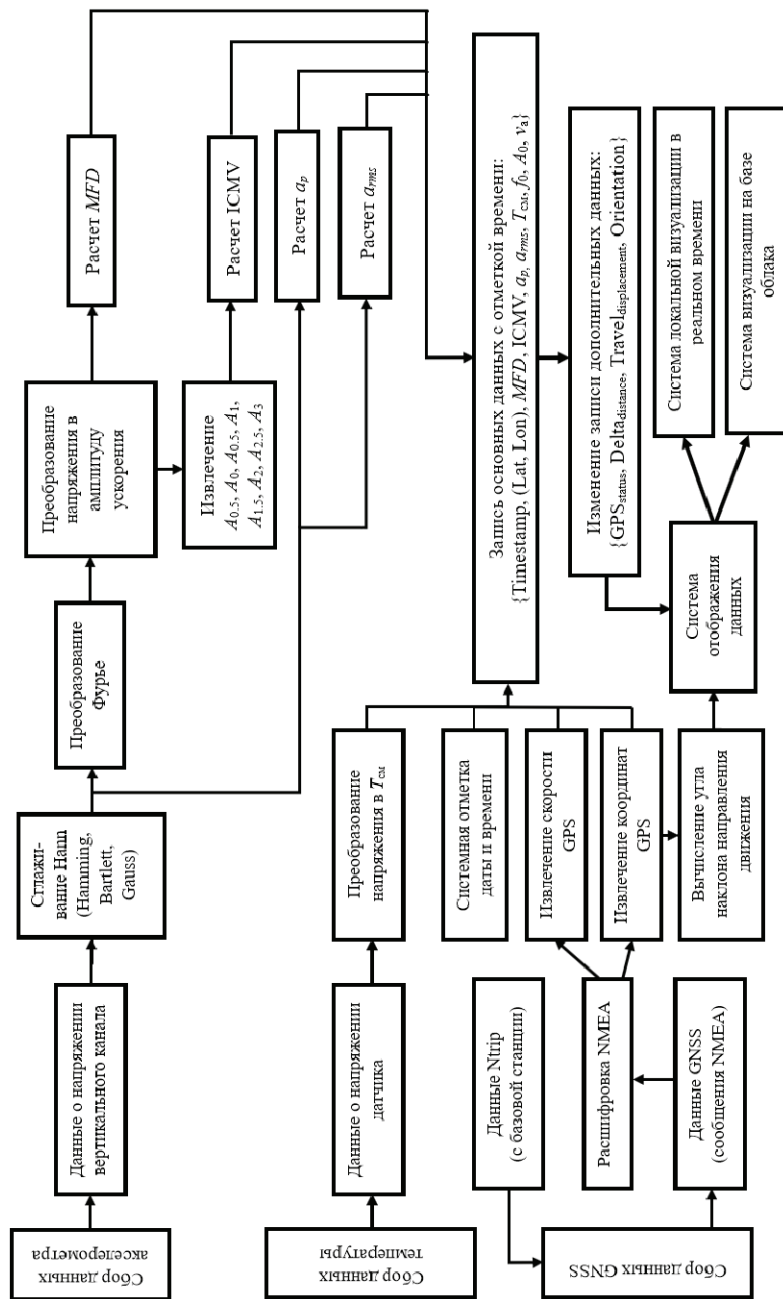


Рис. 3. Конвейер обработки данных

Массивы данных о напряжении, собранные для вертикального канала ускорения, можно представить моделью

$$U(i) = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_i, \dots, u_N\},$$

где $i \in \mathbb{Z}^+$ – вертикальная составляющая ускорения.

В реальных динамических системах в полученных выборках сигналов могут появляться спектральные утечки, что приводит к погрешности измерения переменных. Согласно известной в теории сигналов теореме Котельникова (в зарубежной литературе встречается название «теорема Шеннона» или «теорема Найквиста», «теорема отсчетов»): «непрерывный сигнал с ограниченным спектром можно *абсолютно точно* представить набором его отдельных значений («отсчетов»), следующих с равными интервалами, при условии, что частота следования этих отсчетов, как минимум, вдвое превышает верхнюю границу спектра указанного сигнала» [6]. Для минимизации влияния спектральной утечки в начале и конце окна выборки сигнал сглаживают его плавным уменьшением до нуля. Наиболее часто при решении практических задач используются окна Хэмминга, Ханна, Кайзера, а также комбинированные: Кайзера–Бесселя, Блэкмана–Харриса и др. [7].

Процедура сглаживания к сигналу напряжения акселерометра выполняется перед следующим шагом обработки данных – преобразованием Фурье. Эта процедура уменьшает спектральную утечку, обеспечивая более точную идентификацию фактических частотных составляющих при выполнении преобразования Фурье для полигармонического периодического сигнала. Предложено для сглаживания временной последовательности использовать окна Ханна или Хэмминга, Бартлетта.

Рассмотрим процесс сглаживания на базе функции окна Ханна, выбор которого обусловлен несколькими особенностями:

- для минимизации влияния спектральной утечки в начале и конце окна выборки сводит данные к нулю с обоих концов, что особенно важно для данных акселерометра;
- обеспечивает оптимальный баланс при сборе частотных данных;
- хорошо сглаживает данные временных последовательностей с короткими, внезапными скачками, что характерно для сигналов акселерометров.

Окно Ханна задается выражением

$$\begin{aligned} w(n) &= \sin^2(\pi n) = 0,5(1 - \cos(2\pi n/N)), n \in [0;1], \\ w(n) &= 0, n \in (-\infty; 0) \cup (1; \infty), \\ x(n) &= w(n) \cdot (U(n)/U_{\max}), n \in [0; N], U_{\max} = \max(U(n)). \end{aligned}$$

Прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) можно представить выражением

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-jkn \left(\frac{2\pi}{N}\right)}, k = \overline{0 \dots N-1}, n = \overline{0 \dots N-1},$$

где $X(k)$ – частотный выход ДПФ в k -й точке спектра; k – индекс ДПФ в частотной области; N – количество отсчетов дискретного сигнала; $x(n)$ – отсчет n во временной области; n – временной индекс; j – мнимая единица, $j^2 = -1$.

Коэффициенты ДПФ $X(k)$ – это коэффициенты разложения в ряд Фурье периодического импульсного сигнала, площади импульсов которого равны $x(n)$. Для перехода от номера спектральной составляющей к абсолютному значению частоты воспользуемся формулой

$$f_k = (k f_d) / N,$$

где f_k – частота k -й составляющей спектра сигнала; f_d – частота выборок сигнала; N – количество выборок сигнала, используемых для получения спектра.

Значения $X(k)$ содержат вещественную и мнимую компоненты, соответствующие спектру анализируемого сигнала,

$$X(k) = X_{\text{Re}}(k) + j X_{\text{Im}}(k).$$

Для их преобразования в амплитудный и фазовый спектры используются следующие выражения:

$$A_k = \sqrt{X_{\text{Re}}^2(k) + j X_{\text{Im}}^2(k)};$$

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{X_{\text{Im}}(k)}{X_{\text{Re}}(k)}\right) = \frac{1}{\text{tg}(X_{\text{Im}}(k) / X_{\text{Re}}(k))},$$

где A_k – амплитуда k -й спектральной составляющей спектра; φ_k – фаза k -й спектральной составляющей спектра.

Спектр мощности

$$P(k) = A_k^2 = X_{\text{Re}}^2(k) + j X_{\text{Im}}^2(k).$$

Далее амплитуду необходимо скорректировать, умножив ее на коэффициент компенсации окна Ханна. Амплитуды напряжения преобразуются в значения ускорения умножением их на постоянную акселерометра

$$X_f(k) = 2H_k A_{\text{accel}} V_{\text{max}} \frac{\sqrt{X_{\text{Re}}^2(k) + j X_{\text{Im}}^2(k)}}{N},$$

где H_k – коэффициент компенсации окна Ханна; A_{accel} и V_{max} – постоянные величины.

Параметр A_{accel} является постоянным для данного датчика акселерометра и преобразует значения напряжения в значения ускорения. Индекс основной частоты A_0 определяется по максимальному значению $X_f(k)$

$$A_0 = \max([X_f(k); k = 0, 1, 2, \dots, \max(k)]).$$

Индекс ячейки пиковой частоты δ квадратично интерполируется для точного расчета основной частоты f_0 :

$$\delta = \frac{2(X_f(k_{a_0}) - X_f(k_{a_0} - 1) - X_f(k_{a_0} + 1))}{X_f(k_{a_0} + 1) - X_f(k_{a_0} - 1)},$$

$$f_0 = (k_{a_0} + \delta) f_d / N.$$

где k_{a_0} – индекс частотного диапазона A_0 .

Далее частоты и амплитуды гармоник вычисляются с использованием основной частоты f_0

$$k_i = (i f_0 N) / f_d + 0,5,$$

где $i \in \{0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3\}$; k_i округляется в большую сторону до ближайшего положительного целого числа $k_i \in \mathbf{Z}^+$

$$A_i = X_{f_d}(k_i), f_i = \frac{k_i}{N} f_d,$$

где A_i и f_i – частоты гармоник и амплитуды ускорения соответственно.

В предложенной системе частота дискретизации IEPЕ DAQ равна $R = 1$ кГц, а количество записанных проб $N = 1000$. Параметр N является переменной, вводимой в пользовательском интерфейсе платформы. После обработки исходных значений в значимые данные следующим шагом является вычисление различных показателей ICMVs.

Расчет параметров измерения уплотнения.

В цикле обработки данных первое значение, которое вычисляется на основе обработанных исходных данных ускорения, показатель MFD (*англ.* Modified Fundamental Distortion), учитывающий все доступные частотные диапазоны. Он показывает степень искажения основной частоты (заданной величины возбуждения вибрации плиты рабочего органа АУ) другими вибрациями и гармониками.

Платформа САКП вычисляет показатели ICMVs в частотной области – CCV (*англ.* Compaction Control Value), CMV (*англ.* Compaction Meter Value), THD (*англ.* Total Harmonic Distortion), AICV (*англ.* Acceleration Intelligent Compaction Value), а также во временной области – среднеквадратичное значение ускорения вибрационной плиты a_{rms} , максимальное абсолютное значение ускорения вибрационной плиты a_p .

Определение данных о координатах.

Исходные данные, получаемые из системы GNSS платформы САКП, включают координаты GPS – широту (*англ.* Latitude (**Lat**)), долготу (*англ.* Longitude (**Lon**)) и скорость v_a , м/мин, движения АУ. В перспективе разработки планируется генерирование 2D-массива для отображения измеренных параметров (ICMV, температуры и толщины слоя) на основе их координат широты и долготы, где каждый индекс в массиве соответствует определенному пикселю на карте. Это позволит визуализировать и анализировать данные в конкретных географических координатах. Постоянные высоты и ширины каждой зоны уплотнения определяются граничными координатами области карты.

Оценка пути передвижения, продольного профиля и высоты автомобильной дороги, а также режима передвижения по скорости базируется на их регистрации по сигналам GNSS приемника и последующих математических преобразованиях. Используется соответствие параметра скорости v_a пройденному пути ($\Delta l = v_a \cdot f$) в единицу времени с учетом частоты квантования данных и суммирования их значений из-за более высокой точности этого параметра (0,05 м/с). Собранные данные сохраняются в виде записей с отметками времени и сохраняются в формате файла *.csv при последующем анализе для отображения качества и равномерности уплотнения дорожного материала.

Программное обеспечение САКП.

Программное обеспечение САКП «raver control» разработано с использованием языка программирования Python. Платформа ИПАУ имеет структурированную локальную иерархию сохранения данных в формате *.csv. Каждая запись данных передается в облачную среду в режиме реального времени для резервного копирования и дальнейшего анализа.

Полевое испытание компонентов САКП.

Разработанная инновационная платформа САКП представляет систему, обеспечивающую непрерывный прием, конвейерную обработку, анализ и визуализацию данных переменных. Построен прототип платформы САКП в составе компонентов, измеряющих сигналы ускорения вибрационной плиты рабочего органа АУ, примененный в полевых испытаниях в процессе строительства дорожных АБ-покрытий (рис. 4).

Платформа САКП имеет сенсорный дисплей, который позволяет оператору АУ в режиме реального времени получать информацию о плотности АБ-смеси во время уплотнения. Веб-инструмент используется для удаленного мониторинга качества уплотнения. Датчики подключаются к устройству САКП с использованием коаксиальных разъемов BNC (*англ.* Bayonet Neill Concelman), а платформа одноплатного компьютера обеспечивает порт мультимедийного интерфейса высокой четкости HDMI для внешнего монитора и несколько портов универсальной последовательной шины USB для передачи данных и подключения периферийных устройств. Платформа САКП выполнена в модульной форме, что позволяет дооборудовать ее новыми модулями. Результаты полевых экспериментов отражали изменения показателей в слое уплотняемого материала при различных рабочих режимах АУ, прогнозирование плотности АБ-смеси системой САКП – удовлетворительное, ошибка составила меньше 10 %.

Программное обеспечение САКП сохраняет как исходные, так и обработанные данные для дальнейшего анализа в локальной памяти устройства и передает их в облачный сервер в режиме реального времени для удаленного мониторинга и резервного копирования. Значения ICMV, температуры поверхности и MFD, ускорения, полученные платформой САКП в полевых испытаниях изменялись в зависимости от рабочих режимов АУ. Полученные данные продемонстрировали эффективность платформы САКП при сравнительном анализе показателей ICMV. Полевое испытание компонентов платформы САКП показало удовлетворительные результаты корреляции между изменениями плотности АБ-смеси и данными показателей ICMV.

Следует отметить, что разработанное аппаратное и программное обеспечение и аналитика нуждаются в дальнейшей доработке на основе полевых испытаний, проведенных на различных АБ-смесях и толщинах слоев.

Карты показателей интеллектуального уплотнения ICMVs с цветовой кодировкой зоны уплотнения могут быть использованы для анализа:

– участков неравномерного уплотнения (в случае неравномерного уплотнения слоя материала может потребоваться дополнительное уплотнение дорожными катками для достижения желаемой уплотненности);

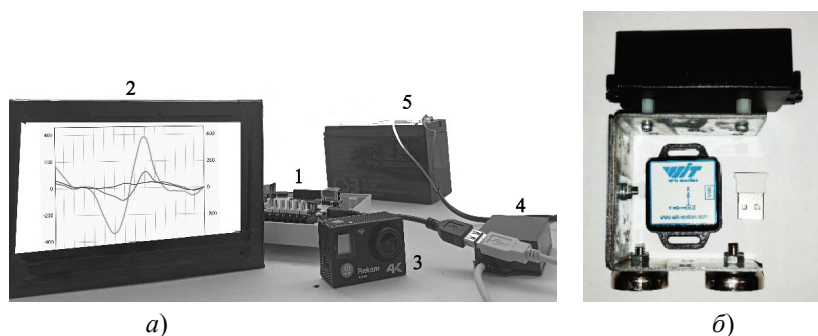


Рис. 4. Технические средства автоматизации САКП:

а – комплект (*1* – одноплатный компьютер; *2* – панель монитор; *3* – камера с защитой; *4* – преобразователь напряжения; *5* – аккумулятор 12 В); *б* – акселерометр Wit Motion и мощные магниты для закрепления на виброплите АУ

- исторических данных, которые можно использовать для сравнения с текущими результатами плотности;
- уплотненности слоя, что позволяет рационально изменять режимные параметры рабочего органа АУ в целях достижения желаемой плотности.

В дальнейшем будет разработана система с расширенной аналитикой для обеспечения контроля плотности с учетом заданной производительности, необходимой для интеллектуального строительства дорожных покрытий в соответствии с концепцией четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0).

Заключение

Предложено изменение в форме дополнения к п. 5.5 стандарта КГКУ «КрУДор» СТО 01-2020 (с изменением № 2), позволяющее при разработке документа «Технологическая схема потока» правильно формировать составы звеньев дорожных машин с учетом наличия АУ и дорожных катков, оснащенных САКП/САУП, в целях улучшения качества дорожных покрытий автомобильных дорог и повышения производительности уплотнения АБ-смесей.

Разработаны программно-аппаратные средства САКП для АУ на базе предложенной архитектуры конвейера обработки данных CI/CD (CI – *англ.* Continuous Integration – непрерывная интеграция, CD – *англ.* Continuous Delivery – непрерывная поставка), обеспечивающей высокую эффективность системы.

Подтверждена работоспособность САКП для АУ с компонентами измерения ускорения вибрационной плиты в полевых условиях строительства АБ-покрытия автомобильной дороги в пригороде г. Красноярска. Результаты полевого испытания удовлетворительные, средняя относительная ошибка вычисленных значений плотности АБ-смеси составила меньше 10 %.

Список литературы

1. 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.
2. Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning / Y. Wang, J. Li, X. Zhang, Y. Yao, Y. Peng // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, No. 9. – P. 2777. doi: 10.3390/s24092777
3. A state-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements / S. Sivagnanasuntharam, A. Sountharajah, J. Ghorbani, D. Bodin, J. Kodikara // *Road Materials and Pavement Design*. – 2023. Vol. 24, No. 1. – P. 1 – 30. doi: 10.1080/14680629.2021.2015423.
4. Правила разработки и оформления проектов производства работ на капитальный ремонт и ремонт автодорог. СТО 01-2020. – Красноярск : КГКУ «КрУДор», 2020. – 13 с. – URL : <https://krudor.ru/upload/iblock/1ab/1abdae424f968e9c7ffc524091c4c9b9.pdf> (дата обращения: 18.03.2025)
5. Napke, H. Building Machine Learning Pipelines / H. Napke, C. Nelson. – Sebastopol, CA : O'Reilly Media, Inc., 2020. – 366 p.
6. Жмудь, В. А. Теорема Котельникова–Найвиста–Шеннона, принцип неопределенности и теория относительности / В. А. Жмудь // *Автоматика и программная инженерия*. – 2014. – № 1(7). – С. 127 – 136.
7. Гришенцев, А. Ю. Цифровые системы широкополосной связи. Часть 2. Оконные и вейвлет-функции и преобразования / А. Ю. Гришенцев, А. Г. Коробейников, С. А. Арустамов. – СПб. : Университет ИТМО, 2019. – 42 с.

On the Question of Constructing an Intelligent System of Density Control for Asphalt Pavers Based on Software and Hardware Using a Data Conveyor

A. P. Prokopyev✉

*Department of Construction Materials and Construction Technologies,
prokl@yandex.ru; Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

Keywords: asphalt paver; intelligent compaction; data analysis pipeline; machine learning; continuous density control; software and hardware.

Abstract: Continuous quality control of asphalt concrete mixture compaction during road construction using intelligent compaction technology is based on acceleration sensors installed on vibratory rollers of road rollers. The paper presents options for increasing the efficiency of density control during operation of a link of automated road machines based on the use of a continuous control system for an asphalt paver, including by ensuring a higher degree of compaction, as well as optimizing the link of road rollers and reducing the cost of road surfaces. It is proposed to develop hardware and software for pavers taking into account the concept of its life cycle. The system provides for processing variable data based on approaches used in the development of machine learning pipelines. A version of a data pipeline and an algorithm for processing variables in an intelligent density control system for pavers are shown.

References

1. Kustarev G.V., Pavlov S.A., Ushkov A.V. *Vysokoeffektivnyye komplekсы dlya skorostnogo stroitel'stva asfal'tobetonnykh pokrytiy: monografiya* [Highly Efficient Complexes for High-Speed Construction of Asphalt Concrete Pavements: monograph], Moscow: MADI, 2019, 140 p. (In Russ.)
2. Wang Y., Li J., Zhang X., Yao Y., Peng Y. Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning, *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 9, 2777. doi: 10.3390/s24092777
3. Sivagnanasuntharam S., Sountharajah A., Ghorbani J., Bodin D., Kodikara J. A state-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements, *Road Materials and Pavement Design*, 2023, vol. 24, no. 1, p. 1-30. doi: 10.1080/14680629.2021.2015423
4. Available at: <https://krudor.ru/upload/iblock/1ab/1abdae424f968e9c7ffc524091c4c9b9.pdf> (accessed 18 March 2025).
5. Hapke H., Nelson C. *Building Machine Learning Pipelines*. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2020. 366 p. ISBN: 9781492053194
6. Zhmud V.A. [Kotelnikov-Nayvist-Shannon theorem, the principle of uncertainty and the theory of relativity], *Avtomatika i programm-naya inzheneriya* [Automation and software engineering], 2014, no. 1(7), pp. 127-136. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Grishentsev A.Yu., Korobeynikov A.G., Arustamov S.A. *Tsifrovyye sistemy shirokopolosnoy svyazi. Chast' 2. Okonnyye i veyvlet-funksii i preobrazovaniya* [Digital broadband communication systems. Part 2. Window and wavelet functions and transformations], St. Petersburg: ITMO University, 2019, 42 p. (In Russ.)

Zum Aufbau eines intelligenten Verdichtungskontrollsystems für Asphaltfertiger auf der Basis von Hardware und Software unter Verwendung einer Datenpipeline

Zusammenfassung: Die kontinuierliche Qualitätskontrolle der Verdichtung von Asphalt-Beton-Gemischen beim Autobahnbau mittels intelligenter Verdichtungstechnik basiert auf Beschleunigungssensoren, die an vibrierenden Walzen von Straßenwalzen installiert sind. Es sind die Varianten zur Erhöhung der Effizienz der Verdichtungskontrolle beim Betrieb einer Kette automatisierter Straßenbaumaschinen auf der Grundlage der Verwendung des kontinuierlichen Steuerungssystems für Asphaltfertiger vorgestellt, u. a. durch die Erzielung eines höheren Verdichtungsgrades sowie die Optimierung einer Kette von Straßenwalzen und die Senkung der Kosten für Straßenbeläge. Es ist die Konstruktion von Hard- und Software für Straßenfertiger vorgeschlagen, wobei das Konzept des Lebenszyklus berücksichtigt wird. Das System sieht eine variable Datenverarbeitung auf der Grundlage von Ansätzen vor, die bei der Entwicklung von Pipelines für maschinelles Lernen verwendet werden. Die Variante der Datenpipeline und der Algorithmus der variablen Datenverarbeitung im intelligenten Dichtesteuerungssystem für Straßenfertiger sind gezeigt.

Sur la question de la construction d'un système intelligent de contrôle de la densité pour les pavés a la base du système logiciel et matériel utilisant un pipeline de données

Résumé: Le contrôle continu de la qualité du compactage des mélanges d'asphalte lors de la construction de routes, la technologie de compactage intelligent sont basés sur des capteurs d'accélération installés sur les rouleaux vibrants des rouleaux de route. Sont présentées des options pour améliorer la gestion de la densité dans le cadre de véhicules routières automatisées grâce à l'utilisation d'un système de contrôle continu pour le finisseur, notamment en améliorant le compactage, en optimisant le compactage des rouleaux et en réduisant le coût des chaussées. Est proposé de construire un matériel et un logiciel pour les empileurs en tenant compte du concept de son cycle de vie. Le système prévoit le traitement des données de l'évolution sur à base des approches utilisées dans la conception des pipelines d'apprentissage automatique. Sont présentés l'option de pipeline de données et l'algorithme de traitement des changements dans le système intelligent de contrôle de la densité pour les empileurs.

Автор: *Прокопьев Андрей Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы и технологии строительства», ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.