

Учёт возмущений при прогнозировании в автоматизированной системе управления составом асфальтобетонной смеси

Д.Н. Суворов¹, А.В. Илюхин¹, С.В. Нгуен¹, Д. Т. Зыонг²

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

²Университет Винь, Вьетнам

Аннотация: Качество асфальтобетонной смеси на выходе асфальтобетонного завода (АБЗ) нестабильно из-за возмущений, которые мы не можем контролировать или контролируем со значительной задержкой. К возмущениям можно отнести такие факторы, как: неточность имеющихся связей между свойствами компонентов асфальтобетонной смеси и параметрами технологического процесса с качеством готовой продукции. К возмущениям можно отнести наше незнание о наличии связей между отдельными показателями и качеством смеси. Прогнозирование этих возмущений для определения фактического качества на выходе становится ключевой задачей. Ранее определение оптимальной длины ряда данных для прогнозирования было сложной задачей. На сегодняшний день с использованием современных технологий эта проблема успешно решена. В данной статье авторы предлагают метод прогнозирования с адаптацией для определения оптимальной длины ряда данных. Результаты исследования включают значения ошибок прогнозирования без адаптации и с адаптацией. Метод прогнозирования с адаптацией продемонстрировал меньшие значения средней абсолютной ошибки (MAE) чем метод прогнозирования без адаптации (где длина временного ряда всегда равна 100). Это позволяет более эффективно и точно предсказывать суммарные возмущения, что критически важно для обеспечения высокого и стабильного качества асфальтобетонной смеси.

Ключевые слова: асфальтобетон, асфальтобетонная смесь, возмущение, система управления, модель авторегрессии, прогнозирование, метод прогнозирования с адаптацией, оптимальная длина ряда, точность прогноза, средняя абсолютная ошибка.

Введение

Асфальтобетон - строительный материал, получаемый путём укладки и уплотнения тщательно подобранной смеси крупных заполнителей (таких как щебень или гравий), песка, минерального порошка и битума. При необходимости могут быть введены дополнительные добавки, такие как поверхностно-активные вещества и активаторы.

Качество и долговечность асфальтобетонных покрытий зависят от ряда факторов, таких как оптимальное проектирование состава, эффективные технологии производства, а также правильные способы транспортировки, укладки и уплотнения смеси [1, 2]. В работах [3, 4] отмечено, что срок службы асфальтобетонных покрытий во Вьетнаме существенно ниже, чем в

других странах. Согласно данным [5], Вьетнам занимает 31-е место из 37 в Азии и 104-е место из 141 в мире по рейтингу качества дорожных покрытий.

Нестабильное качество асфальтобетона снижает долговечность асфальтобетонных покрытий. На качество асфальтобетонного покрытия влияют вариация свойств компонентов смеси и режимов технологического процесса, вариация параметров доставки смеси, её укладки и уплотнения.

Решением данной проблемы является разработка систем управления, которые компенсируют нестабильность характеристик и стабилизируют качество готовой асфальтобетонной смеси.

Материалы и методы исследования

На технологический процесс производства асфальтобетона оказывают влияние следующие факторы:

- Свойства компонентов смеси;
- Параметры технологического процесса;
- Транспортировка асфальтобетонной смеси от завода до места её укладки;
- Параметры укладки и уплотнения смеси;
- Возмущение, которое отражает совокупное влияние неточностей в связях вышеизложенных факторов и качества готового покрытия. К возмущению относятся также наше незнание о влиянии параметров на свойства покрытия.

Система оперативного управления должна эффективно компенсировать влияния вышеуказанных факторов, обеспечивая стабильное качество продукции в процессе производства асфальтобетонной смеси.

Для производства асфальтобетонной смеси применяют следующие материалы:

- Щебень (Щ);
-

- Песок (П);
- Минеральный порошок (МП);
- Битум (Б);
- Добавки (Д).

Эти компоненты, имеющиеся на предприятии, могут быть представлены в виде матриц.

$$\begin{matrix} \left. \begin{matrix} \text{Щ}_1 \\ \text{Щ}_2 \\ \dots \\ \text{Щ}_a \end{matrix} \right\} \\ \left. \begin{matrix} \text{П}_1 \\ \text{П}_2 \\ \dots \\ \text{П}_b \end{matrix} \right\} \\ \left. \begin{matrix} \text{МП}_1 \\ \text{МП}_2 \\ \dots \\ \text{МП}_c \end{matrix} \right\} \\ \left. \begin{matrix} \text{Б}_1 \\ \text{Б}_2 \\ \dots \\ \text{Б}_d \end{matrix} \right\} \\ \left. \begin{matrix} \text{Д}_1 \\ \text{Д}_2 \\ \dots \\ \text{Д}_e \end{matrix} \right\} \end{matrix}, \quad (1)$$

где a, b, c, d, e – количество различных видов этих материалов на складе предприятия.

Исходя из (1), можно ввести обобщённую матрицу для свойств компонентов асфальтобетонной смеси.

$$M = \begin{matrix} \left. \begin{matrix} M_{1,1} & M_{1,2} & \dots & M_{1,j} \\ M_{2,1} & M_{2,2} & \dots & M_{2,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{i,1} & M_{i,2} & \dots & M_{i,j} \end{matrix} \right\}, \quad (2)$$

где $M_{i,j}$ – вектор совокупности свойств i -ого вида материала j -ого сорта.

Аналогично, мы можем ввести матрицу свойств и параметров технологического процесса.

$$ТП = \begin{matrix} \left. \begin{matrix} \text{ТП}_{1,1} & \text{ТП}_{1,2} & \dots & \text{ТП}_{1,j} \\ \text{ТП}_{2,1} & \text{ТП}_{2,2} & \dots & \text{ТП}_{2,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{ТП}_{i,1} & \text{ТП}_{i,2} & \dots & \text{ТП}_{i,j} \end{matrix} \right\}, \quad (3)$$

где $ТП_{i,j}$ – j -ый показатель для i -ой технологической операции.

Для представления свойств асфальтобетонной смеси мы можем воспользоваться следующим множеством:

$$ABC = \{ABC_1, ABC_2, \dots, ABC_i\}, \quad (4)$$

где ABC_i – i -ый показатель качества асфальтобетонной смеси.

При этом характеристики асфальтобетонной смеси, полученной на выходе асфальтобетонного завода, имеют вид:

$$ABC = \varphi(M, TP, F_\Sigma), \quad (5)$$

где F_Σ – совокупное возмущение на выходе асфальтобетонного завода.

В процессе транспортировки асфальтобетонной смеси от асфальтобетонного завода (АБЗ) до объекта её характеристики могут подвергаться изменениям:

$$ABC_{TP} = \psi(ABC, TP, F_{TP}), \quad (6)$$

где TP – совокупность показателей качества транспортировки смеси; F_{TP} – возмущение, действующее на процесс транспортировки.

Аналогично, свойства готового асфальтобетонного покрытия после укладки и уплотнения смеси модифицируются:

$$AB = \Phi(ABC_{TP}, PL, F_{PL}), \quad (7)$$

где PL – совокупность показателей качества укладки и уплотнения смеси; F_{PL} – возмущение, действующее на процесс укладки и уплотнения.

На базе уравнений (2-7) можно построить схему процесса формирования качества асфальтобетонной смеси на выходе из асфальтобетонного завода, а также после процессов транспортировки, укладки и уплотнения (Рис. 1) [6].

Большинство параметров компонентов асфальтобетонной смеси и режимов технологического процесса в условиях производства либо не контролируются вообще, либо контролируются со значительным запаздыванием, из-за чего невозможно использовать результаты контроля непосредственно для оперативного управления технологическим процессом.

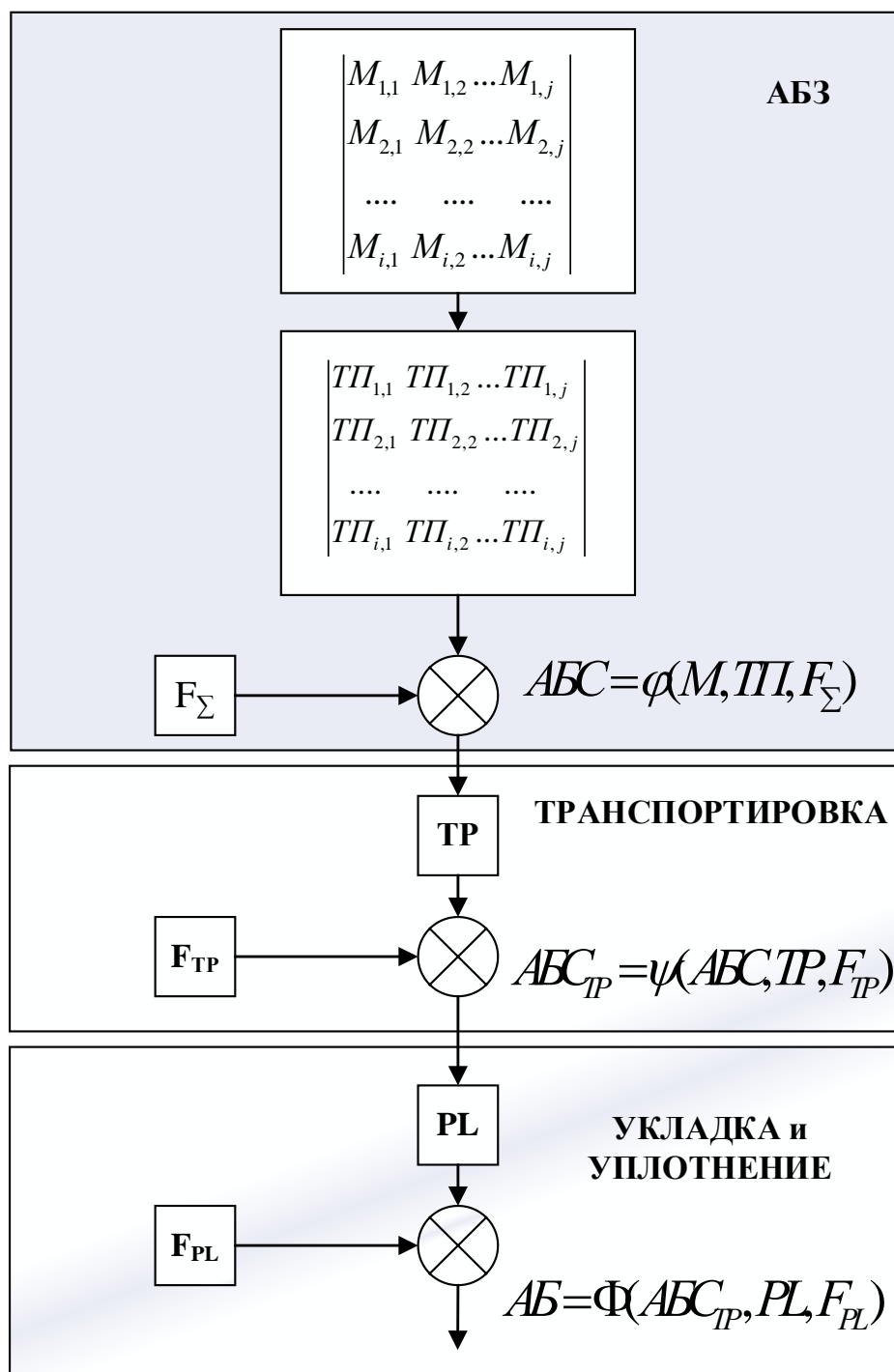


Рис. 1. – Схема обобщённого процесса формирования качества асфальтобетонной смеси

Исходя из известных взаимосвязей между параметрами и качеством продукции, мы можем провести расчёт качества асфальтобетонной смеси (расчётное качество). Однако, из-за возмущений, качество на выходе асфальтобетонного завода изменяется (реальное качество) (Рис. 2).

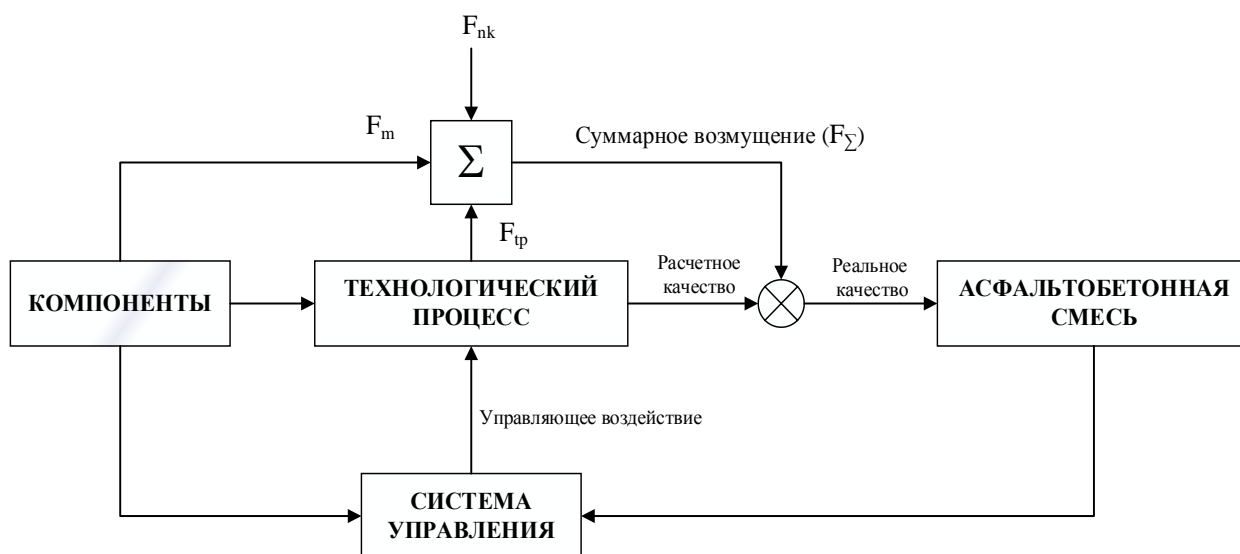


Рис. 2. – Структура системы управления качеством асфальтобетонной смеси на выходе асфальтобетонного завода

- F_m – возмущения связанные с компонентами асфальтобетонной смеси;
- F_{tp} – возмущения связанные с технологическим процессом производства асфальтобетонной смеси;
- F_{nk} – возмущения связанные с отсутствием контроля параметров и их неизвестным влиянием на свойства асфальтобетонной смеси;
- F_{Σ} – совокупное возмущение $F_{\Sigma} = F_m + F_{tp} + F_{nk}$.

В соответствии с рисунком (Рис. 3) для решения задач управления свойствами готовой продукции необходимо прогнозировать на шаг управления совокупное возмущение F_{Σ} .

Исследования многих авторов [7-9] подтверждают, что почти все характеристики компонентов асфальтобетонной смеси и параметры технологического процесса могут быть рассмотрены как случайные процессы. Эти исследования показывают, что адекватной моделью является авторегрессионная модель.

Модель авторегрессии (Autoregressive model), часто обозначаемая как $AR(p)$, где p - порядок модели, представляет собой статистическую модель, применяемую для анализа временных рядов данных. В данной модели значение временного ряда в конкретный момент времени зависит от его

предыдущих значений [10, 11]. Модель AP(p) предполагает, что текущее значение временного ряда может быть объяснено как линейная комбинация p предыдущих значений ряда, плюс случайная ошибка. Уравнение AP(p) выглядит следующим образом:

$$X(t) = c + \alpha_1 X(t-1) + \alpha_2 X(t-2) + \dots + \alpha_p X(t-p) + \varepsilon(t), \quad (8)$$

где: $X(t)$ – текущее значение временного ряда; $X(t-1)$, $X(t-2)$, $X(t-p)$ – предыдущие значения ряда в течение p лагов времени; c – константа; α_1 , α_2 , α_p – коэффициенты авторегрессии; $\varepsilon(t)$ – случайная ошибка.

Адекватность модели в значительной степени определяется значениями её коэффициентов α_1 , α_2 , α_p . Эти коэффициенты могут быть вычислены путём решения системы уравнений Юла-Уоркера [11]. Форма системы уравнений Юла-Уоркера представлена ниже:

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \varphi_1 & \dots & \varphi_{p-1} \\ \varphi_1 & 1 & \dots & \varphi_{p-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{p-1} & \varphi_{p-2} & \dots & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_p \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где: φ_p – автокорреляционная функция.

Наше собственное исследование [12], а также другие исследования [7-9], проведённые на реальных данных о показателях качества компонентов смеси, готовой асфальтобетонной смеси и параметрах технологического процесса, указывают на возможность свести эти данные к модели авторегрессии второго порядка (AP(2)).

$$X(t) = \alpha_1 X(t-1) + \alpha_2 X(t-2), \quad (10)$$

Так, например, для модели AP(2) уравнение (9) можно представить в виде системы:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \varphi_1 \\ \varphi_2 = \alpha_1 \varphi_1 + \alpha_2 \end{cases}, \quad (11)$$

На основе результатов измерений свойств качества компонентов смеси, готовой смеси и параметров технологического процесса проводится идентификация случайного процесса. Затем вычисляются параметры фильтра, и с их использованием прогнозируется возмущение на период управления. Это позволяет определить управление таким образом, чтобы компенсировать негативное воздействие возмущения. Ранее задача определения оптимальной длины ряда данных для прогнозирования была трудно решаемой. Однако, с использованием современных технологий, эта проблема успешно решена, и метод определения оптимальной длины ряда данных для прогнозирования получил название "метод прогнозирования с адаптацией".

Цель настоящего исследования заключается в поиске наилучшего способа прогнозирования суммарного возмущения. Для достижения этой цели мы предлагаем два подхода:

- Прогнозирование без адаптации (традиционный способ прогнозирования)
- Прогнозирование с адаптацией.

Данные для анализа включают в себя два набора (Стабильность по Маршаллу и проходки щебня (10x16) через сито 4,75мм). Каждый набор состоит из 140 наблюдений, где первые 100 используются для обучения моделей, а оставшиеся 40 - для проверки точности прогноза. Рассмотрим каждый метод более подробно:

1. Прогнозирование без адаптации (традиционный способ)

- Для прогнозирования без адаптации мы выбираем значения в диапазоне от 1 до 100 для построения модели авторегрессии второго порядка.
 - Затем мы прогнозируем значение 101, используя данную модель.
-

- После этого мы выбираем значения от 2 до 101 для построения новой модели авторегрессии второго порядка и прогнозируем значение 102, и так далее до последнего значения.
- Далее мы рассчитываем разницу между прогнозами и фактическими значениями, а также вычисляем ошибку прогноза. Длина ряда данных всегда равна 100 наблюдениям, и модель для прогнозирования - это модель авторегрессии второго порядка.

2. Прогнозирование с адаптацией

- Для прогнозирования с адаптацией мы выбираем значения в диапазоне от 91 до 100 для построения моделей авторегрессии первого, второго и третьего порядка.
- Затем мы прогнозируем значение 101, используя эти модели.
- После этого мы берём значения от 90 до 100 для построения новых моделей авторегрессии первого, второго и третьего порядка и прогнозируем значение 101, и так далее до первого значения.
- Для каждой длины ряда мы вычисляем ошибки прогноза и выбираем результат с минимальной ошибкой, а также соответствующую модель.
- Для прогноза значения 102 мы выбираем длину ряда с минимальной ошибкой прогноза и соответствующую модель.
- Этот процесс повторяется для остальных значений, что обеспечивает адаптацию прогноза.

Таким образом, мы осуществляем адаптацию прогноза в зависимости от минимальной ошибки для каждого значения, что может повысить точность прогноза.

Для оценки точности прогноза существует несколько показателей, которые могут использоваться в зависимости от конкретной задачи и типа данных. Например, средняя абсолютная масштабированная ошибка (Mean

Absolute Scaled Error – MASE), корень из средней квадратичной ошибки (Root Mean Squared Error – RMSE), средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error – MAE), средняя абсолютная процентная ошибка (Mean Absolute Percentage Error – MAPE) и другие [13].

В данном случае мы используем среднюю абсолютную ошибку (MAE) для оценки точности прогноза. Формула для средней абсолютной ошибки представлена ниже:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X(i) - \hat{X}(i)|, \quad (12)$$

где: $X(i)$ – фактическое значение для i -го наблюдения; $\hat{X}(i)$ – прогнозируемое значение для i -го наблюдения; N – общее количество наблюдений.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследования были получены значения средней абсолютной ошибки (MAE) при прогнозировании без адаптации и с применением адаптации. На рисунках 3 и 4 представлены сравнения эффективности между методом прогнозирования без адаптации и методом с адаптацией. Очевидно, что метод с адаптацией демонстрирует меньшие ошибки прогнозирования. Например, при прогнозировании значений стабильности по Маршаллу, средняя абсолютная ошибка с адаптацией (MAE = 0,75) оказывается ниже, чем средняя абсолютная ошибка без адаптации (MAE = 0,88). Аналогично, при прогнозировании значений проходки через сито 4,75мм, средняя абсолютная ошибка с адаптацией (MAE = 0,69) существенно меньше, чем средняя абсолютная ошибка без адаптации (MAE = 1,19).

Результаты прогноза для оценки стабильности по Маршаллу без адаптации и с адаптацией отображены на рисунке 5. Аналогично, результаты прогнозирования значения проходки через сито с отверстием 4,75 мм без адаптации и с адаптацией представлены на рисунке 6.

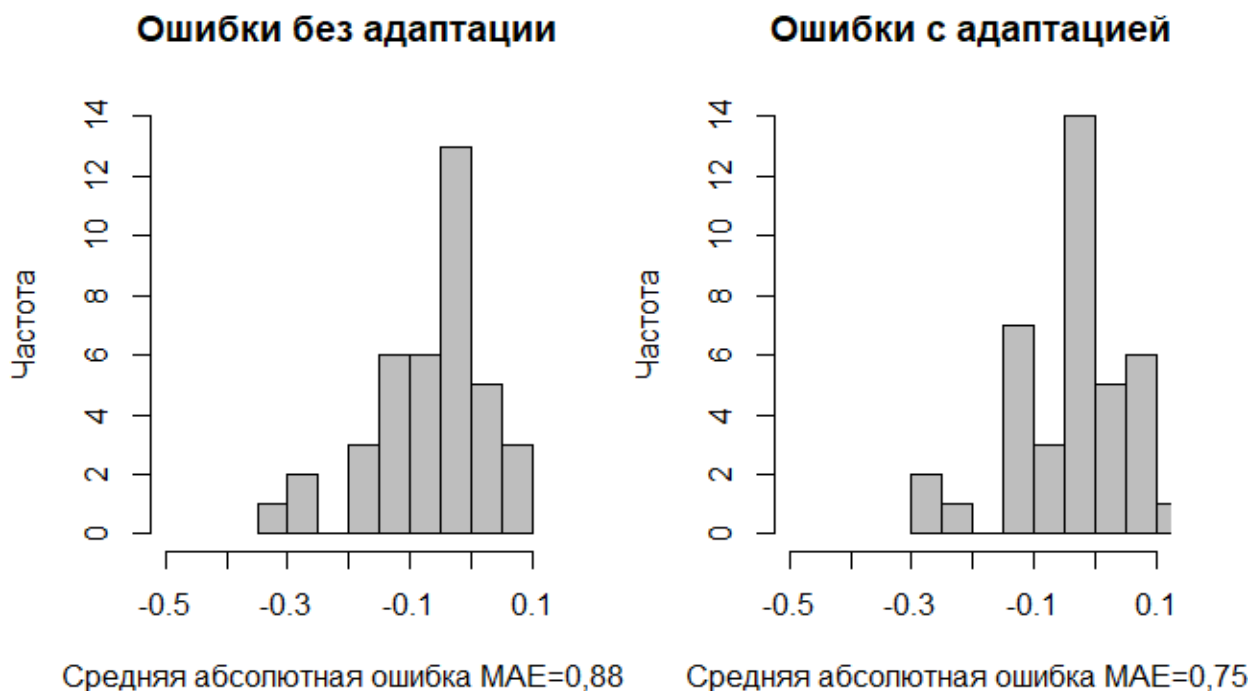


Рис. 3. – Гистограммы ошибок прогнозирования для значений стабильности по Маршаллу без адаптации и с адаптацией

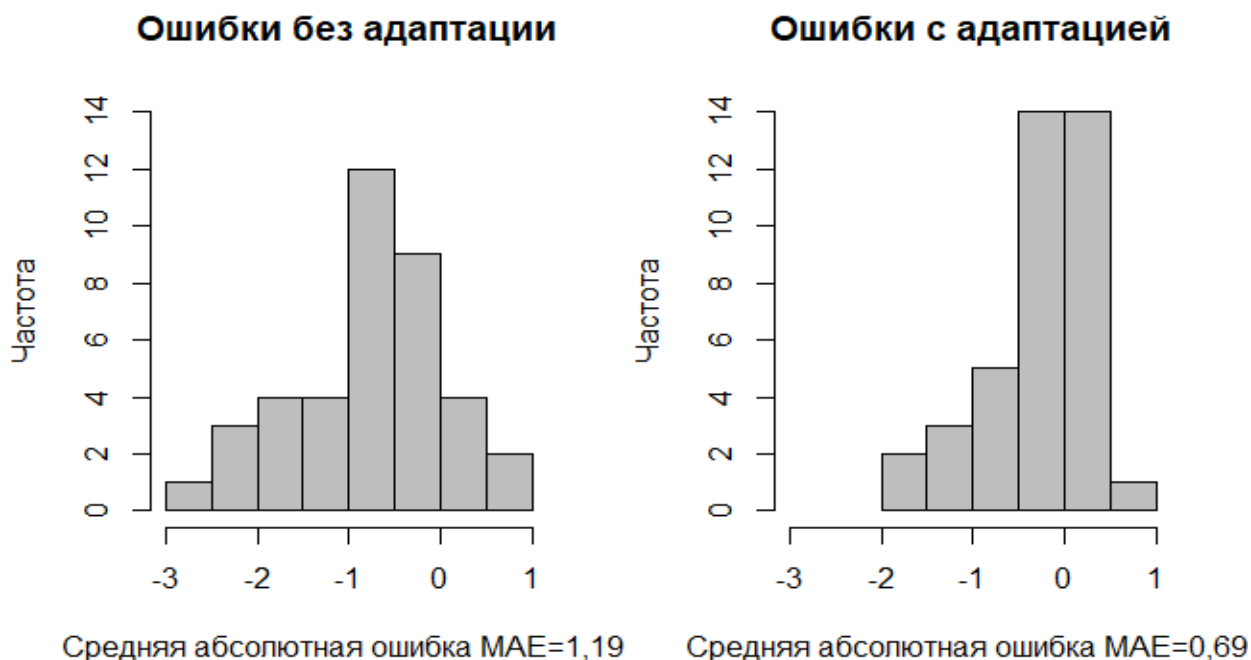


Рис. 4. – Гистограммы ошибок прогнозирования для значений проходки через сито 4,75мм без адаптации и с адаптацией



Рис. 5. – Фактические и прогнозные значения стабильности без адаптации и с адаптацией



Рис. 6. – Фактические и прогнозные значения проходки через сито 4,75мм без адаптации и с адаптацией

Выводы

В заключении важно подчеркнуть, что использование метода с адаптацией для прогнозирования свойств асфальтобетонной смеси и компонентов асфальтобетонной смеси, таких как стабильность по Маршаллу и проходка щебня, продемонстрировало лучшие результаты по сравнению с методом без адаптации. Например, при прогнозировании значений стабильности по Маршаллу с адаптацией, средняя абсолютная ошибка (MAE) составила 0,75, что ниже, чем без адаптации (MAE = 0,88). Аналогично, при прогнозировании значений проходки через сито 4,75 мм, средняя абсолютная ошибка с адаптацией (MAE = 0,69) существенно уменьшилась по сравнению с методом без адаптации (MAE = 1,19). Это позволяет более эффективно и точно предсказывать суммарное возмущение и корректировать состав асфальтобетонной смеси, что критически важно для обеспечения высокого качества дорожных покрытий и их долговечности.

Литература

1. Перебейнос Д.И. Моделирование системы «вибрационный валец - уплотняемый асфальтобетон» // Инженерный вестник Дона, 2022, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/%20n9y2022/7903.
2. Николенко М.А., Бессчетнов М.А. Повышение длительной трещиностойкости асфальтобетона дорожных покрытий // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856.
3. Буй Нгок Хынг Исследование некоторых факторов, влияющих на колееобразование с учётом усталостных характеристик асфальтобетонного покрытия в качестве дорожного покрытия во Вьетнаме: дис. ... канд. техн. наук. Ханой, 2016. 147 с.
4. Суворов Д.Н., Нгуен Суан Виет, Зыонг Динь Ту Автоматизация контроля гранулометрического состава и расхода битума при производстве

асфальтобетонной смеси // Современные наукоемкие технологии. 2023. №8. С. 64-70.

5. World Economic Forum, The Global Competitiveness Report 2019. URL: [nonews.co/wp-content/uploads/2019/12/GEF2019.pdf](https://www.weforum.org/publications/global-competitiveness-report-2019/)

6. Доценко А. И. Комплексная автоматизация производства асфальтобетонной смеси с учётом влияния факторов её транспортировки, укладки и уплотнения: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06. М., 2005. 436 с.

7. Бунькин И.Ф. Автоматизация управления производством асфальтобетона: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06. М., 2002. 247 с.

8. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Попов В.П. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Книга 1. Теоретические основы. М.: РИА, 2008. 297 с.

9. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Котлярский Э.В., Доценко А.И., Попов В.П. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Книга 2. Практические разработки. М.: РИА, 2009. 608 с.

10. Ramanjineyulu B., Balasiddamuni Pagadala, Mokesh Rayalu G. Statistical inference in autoregressive models: Estimation of autoregressive models, 2013. 206 p.

11. George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel Time series analysis. Forecast and control, 1974. 579 p.

12. Суворов Д. Н., Илюхин А. В., Нгуен С. В., Зыонг Д. Т. Сравнение методов прогнозирования для решения задач управления стабильностью // Инженерный вестник Дона, 2023, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8768.

13. Игнатов С.В., Редько М.Ю., Лоскутов Д.И., Исследование критериев оценки качества прогнозирования интегрального показателя риска в системах топливного энергетического комплекса // XLVI Международная

молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2020». М., 2020. С. 423-425.

References

1. Perebeynos D.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/%20n9y2022/7903.

2. Nikolenko M.A., Besschetnov M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856.

3. Buj Ngok Hyng Issledovanie nekotoryh faktorov, vliyayushchih na koleeobrazovanie s uchetom ustalostnyh harakteristik asfal'tobetonogo pokrytiya v kachestve dorozhnogo pokrytiya vo V'etname (Study of some factors influencing rutting taking into account the fatigue characteristics of asphalt concrete pavement as a road surface in Vietnam): dis. ... kand. tekhn. nauk. Hanoj, 2016. 147p.

4. Suvorov D.N., Nguen Suan Viet, Zyong Din' Tu Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2023. №8. pp. 64-70.

5. World Economic Forum, The Global Competitiveness Report 2019. URL: nonews.co/wp-content/uploads/2019/12/GEF2019.pdf

6. Docenko A. I. Kompleksnaya avtomatizaciya proizvodstva asfal'tobetonnoj smesi s uchyotom vliyaniya faktorov eyo transportirovki, ukladki i uplotneniya (Integrated automation of the production of asphalt concrete mixture, taking into account the influence of factors of its transportation, laying and compaction): dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.13.06. M., 2005. 436 p.

7. Bun'kin I.F. Avtomatizaciya upravleniya proizvodstvom asfal'tobetona (Automation of asphalt concrete production management): dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.13.06. M., 2002. 247 p.

8. Vorob'ev V.A, Suvorov D.N., Popov V.P. Komp'yuternoe modelirovanie v avtomatizacii proizvodstva asfal'tobetonnoj smesi. Kniga 1. Teoreticheskie osnovy [Computer modeling in the automation of asphalt concrete mixture production. Book 1. Theoretical foundations]. M.: RIA, 2008. 297 p.



9. Vorob'ev V.A., Suvorov D.N., Kotljarskij Je.V., Docenko A.I., Popov V.P. Komp'yuternoe modelirovanie v avtomatizacii proizvodstva asfal'tobetonnoj smesi [Computer modeling in the automation of asphalt concrete mixture production. Book 2. Practical developments]. Kniga 2. Prakticheskie razrabotki. M.: RIA, 2009. 608 p.
10. Ramanjineyulu B., Balasiddamuni Pagadala, Mokesh Rayalu G. Statistical inference in autoregressive models: Estimation of autoregressive models, 2013. 206 p.
11. George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel Time series analysis. Forecast and control, 1974. 579 p.
12. Suvorov D. N., Ilyuhin A. V., Nguen S. V., Zyong D. T. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8768.
13. Ignatov S.V., Red'ko M.YU., Loskutov D.I. XLVI Mezhdunarodnaya molodyozhnaya nauchnaya konferenciya «Gagarinskie chteniya – 2020» (XLVI International Youth Scientific Conference “Gagarin Readings – 2020”). Moskva, 2020. pp. 423-425.

Дата поступления: 10.02.2024

Дата публикации: 14.03.2024