

Научная статья
УДК 625.084
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192>
EDN: WLRDCA



ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА УСКОРЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ВАЛЬЦА В ПРОЦЕССЕ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА

Е.А. Шишкин ✉, А.А. Смоляков

Тихоокеанский государственный университет,
г. Хабаровск, Россия

✉ ответственный автор
004655@togudv.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Успешный контроль качества играет важнейшую роль при работах по уплотнению дорожных покрытий. Основным инструментом непрерывного контроля уплотнения является частотный анализ спектра вибрационного ускорения вальца. Существует несколько показателей, для определения которых используют различные гармоники частотного спектра ускорения. Однако эти показатели имеют ряд недостатков, среди которых низкая точность и ограниченная область применения. Цель исследования – разработка универсального показателя уплотнения, исключающего указанные недостатки.

Материалы и методы. В среде Simulink создана одномассовая колебательная модель, описывающая взаимодействие системы «вибрационный валец – грунт». Модель позволяет изменять параметры грунта, такие как жесткость и вязкость, а также рабочие параметры вибрационного катка – амплитуду и частоту вибрации. Для исследования частотного спектра ускорения вальца применялось быстрое преобразование Фурье.

Результаты и обсуждение. В результате моделирования были получены частотные спектры ускорения вибрационного вальца для различных режимов работы катка. Вследствие анализа полученных данных предложен новый показатель степени уплотнения.

Заключение. На основе предложенного показателя разработана методика определения момента времени смены режима периодической потери контакта на режим «двойного прыжка». Внедрение методики в производственную практику позволит повысить эффективность процесса уплотнения грунтов вибрационным катком.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожный каток, вибрационный валец, уплотнение грунта, контактная сила, частота вибрации, амплитуда вибрации, показатель степени уплотнения

Статья поступила в редакцию 27.12.2024; одобрена после рецензирования 17.02.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Исследование спектра ускорения вибрационного вальца в процессе уплотнения грунта // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 2. С. 182-192. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192>

© Шишкин Е.А., Смоляков А.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192>
EDN: WLRDCA

INVESTIGATION OF THE ACCELERATION SPECTRUM OF A VIBRATORY ROLLER IN THE PROCESS OF SOIL COMPACTION

Evgenij A.I. Shishkin ✉, *Alexander A. Smolyakov*
Pacific National University,
Khabarovsk, Russia
✉ corresponding author
004655@togudv.ru

ABSTRACT

Introduction. Successful quality control plays a crucial role in pavement compaction work. The main tool for continuous compaction monitoring is the frequency analysis of the vibratory acceleration spectrum of the roller. There are several indicators that are determined by the different harmonics of the acceleration frequency spectrum use. However, these indicators have a number of disadvantages, among which are low accuracy and limited scope of application. The aim of the study is to develop a universal compaction indicator that eliminates these disadvantages.

Materials and methods. A single-mass oscillatory model describing the interaction of the system “vibratory roller – soil” has been created in Simulink environment. The model allows changing the soil parameters, such as stiffness and viscosity, as well as the operating parameters of the vibratory roller – amplitude and frequency of vibration. Fast Fourier transformation was used to study the frequency spectrum of roller acceleration.

Results. As a result of modeling, frequency spectra of acceleration of the vibrating roller for different modes of roller operation were obtained. Through the analysis of the obtained data, a new indicator of compaction degree was proposed.

Conclusion. On the basis of the proposed indicator the technique of determining the moment of time change from the periodic loss of contact (the partial uplift mode) to “double jump” mode is developed. Implementation of the methodology in operating performance will improve the efficiency of the process of soil compaction by a vibratory roller.

KEYWORDS: road roller, vibratory roller, soil compaction, contact force, vibration frequency, vibration amplitude, compaction index

The article was submitted: December 27, 2024; approved after reviewing: February 17, 2025; accepted for publication: April 17, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Investigation of the acceleration spectrum of a vibratory roller in the process of soil compaction *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 182-192. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192>

© Shishkin E.A., Smolyakov A.A., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Контроль процесса уплотнения грунта в режиме реального времени обеспечивает долговечность дорожных покрытий. Технологии непрерывного контроля уплотнения предоставляют информацию о жесткости грунта в виде показателя степени уплотнения [1], который чаще всего основан на частотном анализе данных об ускорении вибрационного вальца [2, 3].

Типичный и наиболее эффективный режим работы вибрационного катка принято называть периодическим отрывом [4]. В данном режиме происходит потеря контакта вибрационного вальца с грунтом в каждом периоде возбуждения. В результате экспериментальных исследований режима периодического отрыва фирмой Geodynamics и компанией Дунпарас установлена корреляция между жесткостью грунта и отношением амплитуды первой гармоники ускорения вальца к амплитуде основной частоты вибрации [5]. Показатель степени уплотнения CMV (Compaction Meter Value), основанный на указанной корреляции, определяется по формуле

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

где C – коэффициент, устанавливаемый при калибровке в производственных условиях; A_{2f} – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте в 2 раза превышающей частоту возбуждения; A_f – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте возбуждения.

Увеличение жесткости грунта в процессе уплотнения может привести к изменению режима работы катка на нежелательный режим «двойного прыжка», при котором амплитуда колебаний вальца повторяется каждый второй период возбуждения. В этом режиме в спектре ускорения вальца появляется пик на половине частоты возбуждения [5, 6]. Следовательно, показатель CMV не может быть использован в данном режиме.

Работа в режиме «двойного прыжка» может приводить к разрушению уплотняемого материала, а также к повышенному износу вальца [7, 8]. Для режима «двойного прыжка» показатель степени уплотнения RMV (Resonance Meter Value) определяется по формуле

$$RMV = C_1 \frac{A_{0,5f}}{A_f}, \quad (2)$$

где C_1 – коэффициент, устанавливаемый при калибровке в производственных условиях; $A_{0,5f}$ – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте, равной половине частоты возбуждения.

Компанией SAKAI разработан показатель степени уплотнения CCV (Compaction Control Value), определяемый зависимостью [9]:

$$CCV = C_2 \frac{A_{0,5f} + A_{1,5f} + A_{2f} + A_{2,5f} + A_{3f}}{A_{0,5f} + A_f}, \quad (3)$$

где $A_{1,5f}$ – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте в 1,5 раза превышающей частоту возбуждения; $A_{2,5f}$ – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте в 2,5 раза превышающей частоту возбуждения; A_{3f} – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте в 3 раза превышающей частоту возбуждения; C_2 – коэффициент, устанавливаемый при калибровке в производственных условиях.

В ходе экспериментальных исследований [10, 11] установлено, что амплитуды спектра ускорения вальца $A_{1,5f}$, $A_{2,5f}$ имеют сравнительно низкое значение. С учетом окружающих помех это обстоятельство отрицательно сказывается на точности установления момента изменения режима работы катка на «двойной прыжок». В результате может произойти разрушение уплотняемого покрытия [12, 13].

Кроме этого, общим недостатком показателей (1), (2), (3) является отсутствие методики определения экспериментальных коэффициентов C , C_1 , C_2 [14, 15, 16, 17].

Таким образом, решение задачи повышения точности измерения текущей жесткости грунта путем разработки универсального показателя уплотнения позволит избежать перехода вибрационного катка к нежелательному режиму работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование взаимодействия вибрационного вальца дорожного катка с уплотняемым материалом является одним из способов изучения динамики процесса уплотнения [17, 18, 19].

Исследования процесса уплотнения грунта привели к появлению широкого спектра моделей. Если пренебречь динамическими силами упругой подвески рамы катка [20] и рассматривать только статическую массу рамы, то модель колебательной системы «валец – грунт» будет иметь вид, приведенный на рисунке 1, где грунт при уплотнении пред-

ставлен эквивалентной жесткостью c и вязким демпфированием μ . Многочисленные исследования подтверждают, что эта модель достаточно адекватно отражает поведение грунта при уплотнении [21, 22, 23, 24].

Дифференциальное уравнение колебательной системы «ваlec – грунт» (см. рисунок 1) имеет вид [20]

$$m_e \ddot{z}(t) + \mu \dot{z}(t) + cz(t) = m_0 r_0 \omega^2 \cos(\omega t), \quad (4)$$

где m_e – масса вальца катка, кг; $m_0 r_0$ – статический момент дебаланса, кг·м; ω – частота вращения дебаланса, рад/с; z – смещение вальца, м; μ – коэффициент вязкого сопротивления грунта, Н·с/м; c – жесткость грунта, Н/м.

Контактная сила определяется в соответствии с уравнением [20]

$$F_k = (m_e + m_p)g + cz + \mu \dot{z}, \quad (5)$$

где m_p – масса рамы катка, кг; g – ускорение под действием силы тяжести, кг·м/с².

Для исследования закономерностей изменения спектра ускорений была разработана

модель взаимодействия вибрационного вальца с уплотняемым грунтом. Модель, созданная в среде Simulink (рисунок 2) на основе уравнения (4), содержит следующие входные параметры: m_p и m_e – массы рамы и вальца соответственно; $m_0 r_0$ – статический момент дебаланса; ω – угловая частота вращения дебаланса; c и μ – жесткость и вязкость уплотняемого грунта соответственно.

Граничным условием отрыва вальца от грунта является равенство нулю контактной силы

$$F_k = 0. \quad (6)$$

Тогда уравнение модели (4) для движения вальца в отрыве от грунта примет вид

$$m_e \ddot{z}(t) = (m_e + m_p)g + m_0 r_0 \omega^2 \cos(\omega t). \quad (7)$$

Блоки Switch модели (см. рисунок 2) реализуют потерю контакта вальца с грунтом в каждом периоде возбуждения.

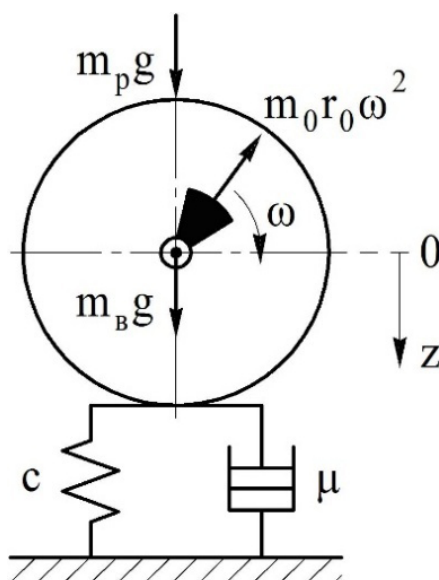


Рисунок 1 – Модель взаимодействия вибрирующего вальца с грунтом
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Vibrating roller–soil interaction model
Source: compiled by the authors.

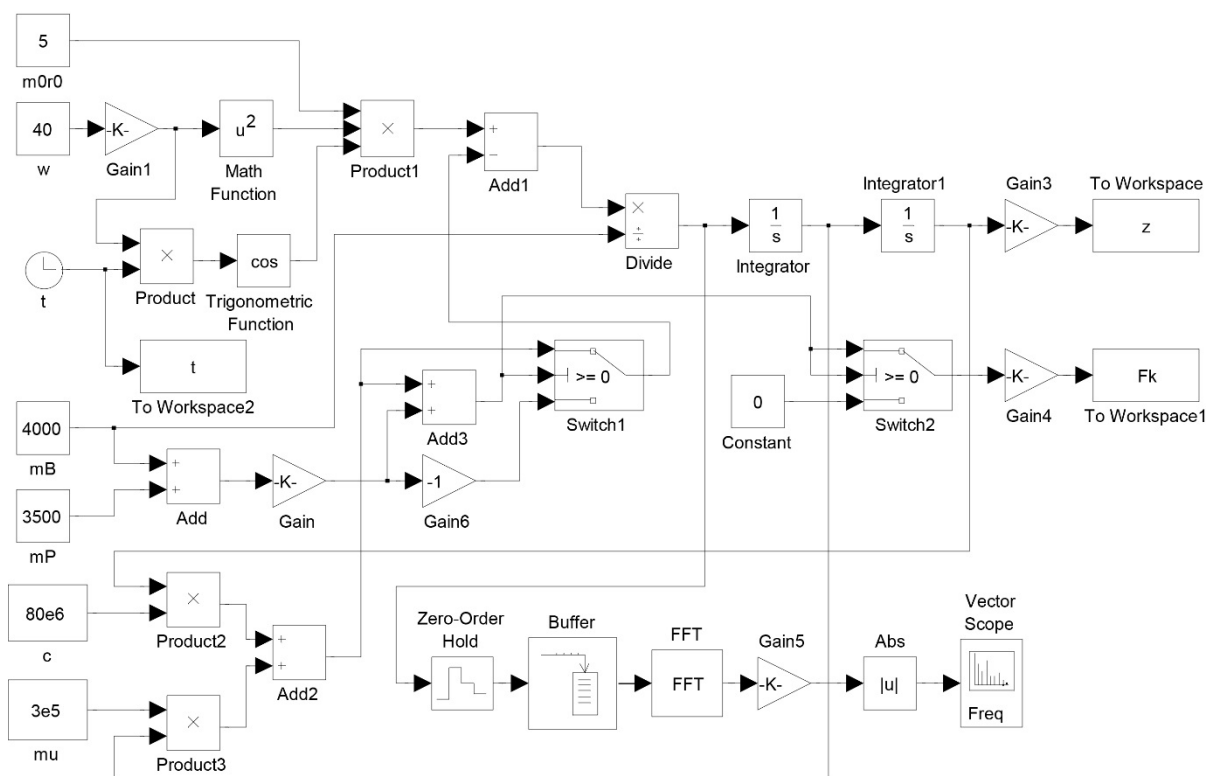


Рисунок 2 – Модель вибрационного уплотнения в среде Simulink
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Model of vibratory compaction made in Simulink environment
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная модель (см. рисунок 2) позволила получить частотные спектры ускорения вибрационного вальца, взаимодействующего с грунтом, при различных режимах работы катка. Для получения частотного спектра к сигналу ускорения применялась процедура быстрого преобразования Фурье (блок FFT на рисунке 2).

В режиме периодического отрыва, который является наиболее эффективным, в частотном спектре наблюдаются гармоники высших порядков на частотах, кратных частоте возбуждения (рисунок 3).

С увеличением жесткости уплотняемого грунта возникают дополнительные гармоники на частотах, кратных $\frac{1}{2}$ частоты возбуждения (рисунок 4), что свидетельствует о работе катка в режиме «двойного прыжка».

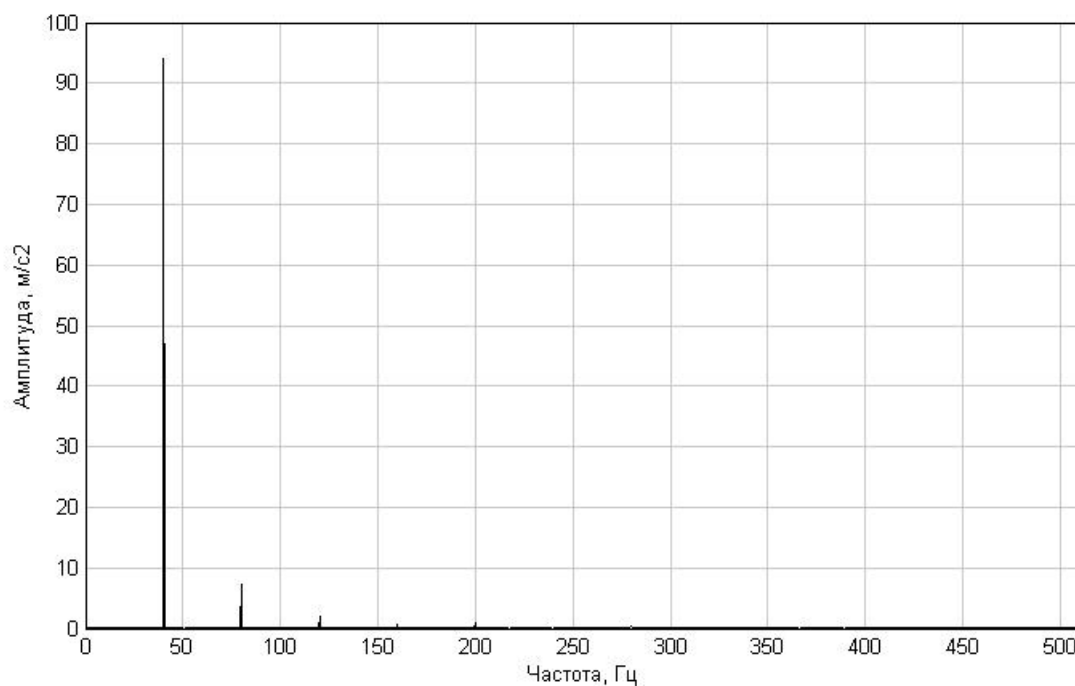


Рисунок 3 – Частотный спектр вальца в режиме периодического отрыва
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Frequency spectrum of the roller in the mode of periodic contact loss (uplift mode)
Source: compiled by the authors.

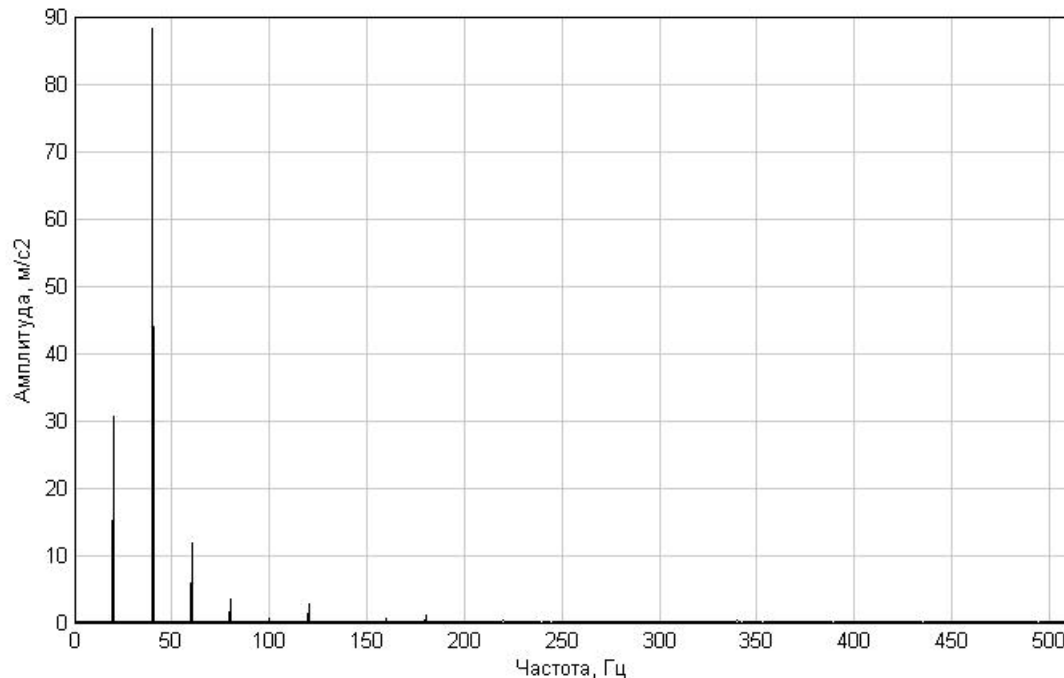


Рисунок 4 – Частотный спектр вальца в режиме «двойного прыжка»
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Frequency spectrum of the roller in the mode of double jump
Source: compiled by the authors.

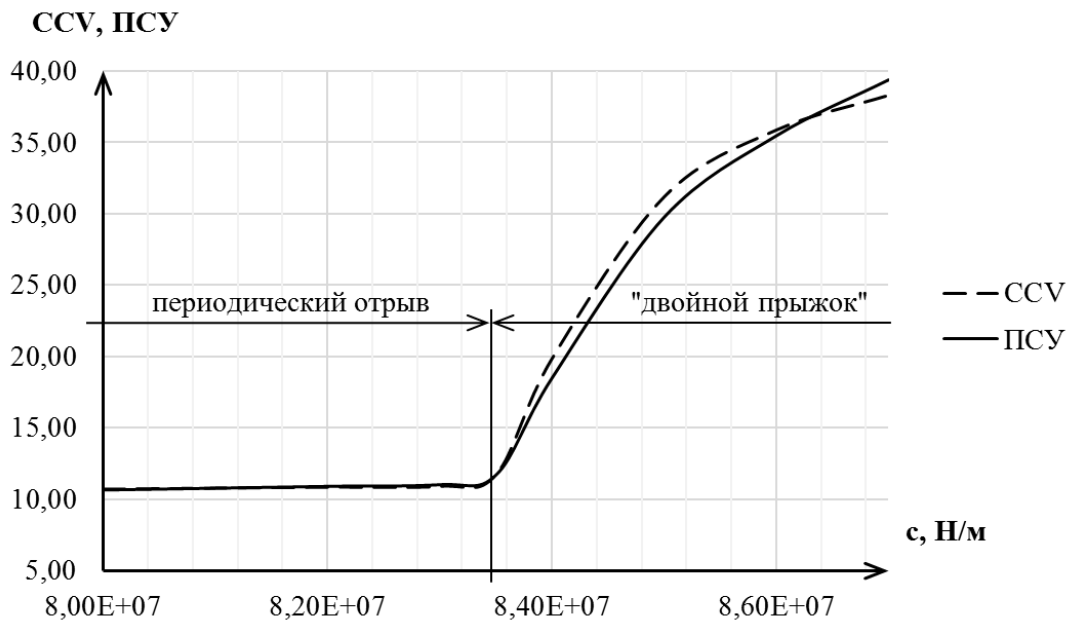


Рисунок 5 – Сравнение показателей ССВ и ПСУ
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Comparison of Compaction Control Values and Compaction Index
Source: compiled by the authors.

В результате анализа частотных спектров вибрационного вальца в режимах периодического отрыва и «двойного прыжка» с учетом выявленных недостатков существующих показателей степени уплотнения был предложен новый показатель

$$ПСУ = k \frac{A_{0,5f} + A_{2f}}{A_f}, \quad (8)$$

где ПСУ – показатель степени уплотнения; k – тарировочный коэффициент.

В сравнении с показателем CMV предложенный показатель ПСУ позволяет определять жесткость грунта как в режиме периодического отрыва, так и в режиме «двойного прыжка». Показатель ПСУ характеризуется более высокой точностью в сравнении с показателем ССВ, так как при его расчете не используются гармоники высших порядков $A_{1,5f}$, $A_{2,5f}$, A_{3f} . Сравнительный анализ значений показателей ССВ и ПСУ (рисунок 5) при различных состояниях уплотняемого грунта и различных режимах работы катка показывает

удовлетворительную сходимость (расхождение не более 5%).

ВЫВОДЫ

Режим «двойного прыжка» является недопустимым с точки зрения сохранения целостности покрытия и на практике его следует избегать. На основе полученного показателя ПСУ разработана методика определения момента времени смены режима периодической потери контакта на режим «двойного прыжка».

Численным дифференцированием находим скорость изменения показателя степени уплотнения в некоторый момент времени t_i

$$(ПСУ)'_i \approx \frac{ПСУ_{i+1} - ПСУ_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad (9)$$

где $ПСУ_i$, $ПСУ_{i+1}$ – значения показателя степени уплотнения, измеренные в моменты времени t_i и t_{i+1} соответственно (рисунок 6); t_i и t_{i+1} – смежные моменты времени, отличающиеся на постоянную величину шага дискретности, с.

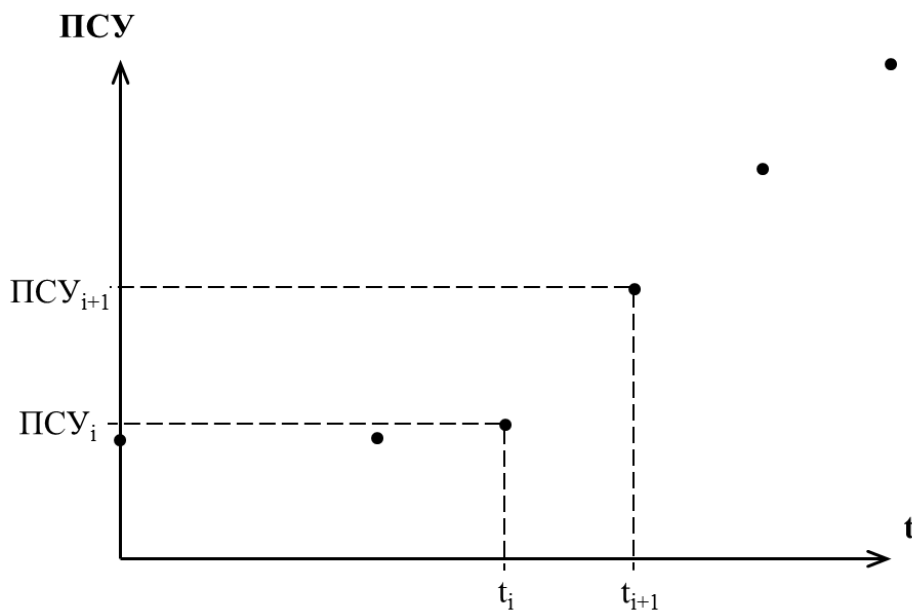


Рисунок 6 – Скорость изменения КСУ
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Rate of Compaction Index change
Source: compiled by the authors.

Так как при смене режима работы катка с периодического отрыва на «двойной прыжок» скорость изменения показателя КСУ резко возрастает (см. рисунок 5), то условие начала режима «двойной прыжок» будет иметь вид

$$\left| (КСУ)'_i - (КСУ)'_{i+1} \right| > \Delta, \quad (10)$$

где $(КСУ)'_i$, $(КСУ)'_{i+1}$ – значения скорости изменения показателя степени уплотнения в моменты времени t_i и t_{i+1} соответственно; Δ – предельное приращение скорости.

При использовании предложенной методики в системе управления катком появляется возможность более точно определять момент перехода катка в режим «двойного прыжка». В этот момент необходимо изменять режим вибрации путем регулирования частоты возбуждения и статического момента дебаланса. Наибольшая эффективность уплотнения возможна при работе катка в непосредственной близости от режима «двойного прыжка» без его достижения.

Темой для дальнейших исследований является разработка методики определения тарировочного коэффициента к показателя КСУ (8), которая будет основана на экспериментальных исследованиях процесса взаимодействия вибрационного вальца с грунтом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yao Y., Song E. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023; 1(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>
2. Pistol J., Hager M., Kopf F. et al. An advanced ICMV for vibratory roller compaction. *Acta Geotech*. 2024; 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8>
3. White D.J., Vennapusa P.R., Gieselman H.H. Field Assessment and Specification Review for Roller-Integrated Compaction Monitoring Technologies. *Advances in Civil Engineering*. 2011; 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/783836>
4. Zhou F., Tao M., Yuan M., Yu Z. Deriving stiffness indices for intelligent compaction using inverse analysis of excitation and contact forces. *Automation in Construction*. 2024; 166: 105637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105637>

5. Bodin D., Sounthararajahb A., Ghorbani J. et al. A State-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 2021; 24: 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2015423>
6. Шишкин Е.А. Метод расчета фазового угла между вынуждающей силой вибровозбудителя и перемещением вальца // *Вестник СибАДИ*. 2024; 21(3): 388–394. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>
7. Zhang Q., An Z., Huangfu Z., Li Q. A review on roller compaction quality control and assurance methods for earthwork in five application scenarios. *Materials*. 2022; 15(7): 2610. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15072610>
8. Lee S., Sharafat A., Kim I.S., Seo J. Development and assessment of an intelligent compaction system for compaction quality monitoring, assurance, and management. *Applied Sciences*. 2022; 12(14): 6855. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12146855>
9. Mazumder M., Yun J., Lee S.-J., Jeong K.-D. Cost-effectiveness of conventional compaction and intelligent compaction methods of asphalt pavement overlay. *Sustainability*. 2021; 13(21): 11830. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132111830>
10. He Z., Zhang J., Paolo C. Compaction quality inspection method of soil-rock filled embankment based on continuous compaction control technology. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 21(2): 144–152. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8894042>
11. Fang Z., Zhu Y., Ma T., Zhang Y., Han T., Zhang J. Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction. *Automation in Construction*. 2022; 142: 104473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104473>
12. Тюремнов И.С., Морев А.С., Краюшкин А.С. Обоснование выбора значений коэффициентов веса показателя уплотнения для систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. *Динамика систем, механизмов и машин*. 2020; 8(1): 104–110. DOI: <https://doi.org/10.25206/2310-9793-8-1-104-110>
13. Ma Y. Numerical simulation of Intelligent Compaction for subgrade construction. *Journal of Central South University*. 2020; 27: 2173–2184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4439-2>
14. Hou Z., Dang X., Yuan Y., Tian B., Li S. Research on intelligent compaction technology of subgrade based on regression analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 2021(1): 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/4100896>
15. Wang Z., Qian J., Ling J. Intelligent compaction measurement value in variability control of subgrade compaction quality. *Applied Sciences*. 2024; 14(1): 68. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14010068>
16. Baek S.-H., Kim J.-Y., Kim J., Cho J.-W. Continuous compaction control of subgrade bases using intelligent compaction measurement values with dynamic cone penetrometer and light weight deflectometer. *Automation in Construction*. 2024; 168: 105835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105835>
17. Chang G., Xu Q. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction. *Automation in Construction*. 2016; 62: 78–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.004>
18. Pang J., Yang J., Zhu B., Qian J. Study of regression algorithms and influent factors between intelligent compaction measurement values and in-situ measurement values. *Applied Sciences*. 2023. 13(10): 5953. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13105953>
19. Tatsuoka F., Hashimoto T., Tateyama K. Soil stiffness as a function of dry density and the degree of saturation for compaction control. *Soils Found.* 2021; 61(4): 989–1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.007>
20. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Методика определения свойств асфальтобетонной смеси, уплотняемой вибрационным катком. *Справочник // Инженерный журнал*. 2022; 03: 47–52. DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2022.03.pp.047-052>
21. Xu Z., Khabbaz H., Fatahi B., Wu D. Real-time determination of sandy soil stiffness during vibratory compaction incorporating machine learning method for intelligent compaction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022; 14(5): 1609–1625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.004>
22. Lun L. Nonlinear dynamics of the rigid drum for vibratory roller on elastic subgrades. *Shock and vibration*. 2021; 2021(9): 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9589230>
23. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the variable contact geometry in vibratory roller compaction. *Infrastructures*. 2023; 8(7): 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070110>
24. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Моделирование взаимодействия вибрационного вальца дорожного катка с уплотняемым грунтом. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2024; 26: 60–67. DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>

REFERENCES

1. Yao Y., Song E. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023; 1(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>.
2. Pistol J., Hager M., Kopf F. et al. An advanced ICMV for vibratory roller compaction. *Acta Geotech.* 2024: 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8>.
3. White D.J., Vennapusa P.R., Gieselman H.H. Field Assessment and Specification Review for Roller-Integrated Compaction Monitoring Technologies. *Advances in Civil Engineering*. 2011: 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/783836>.
4. Zhou F., Tao M., Yuan M., Yu Z. Deriving stiffness indices for intelligent compaction using inverse analysis of excitation and contact forces. *Automation in Construction*. 2024; 166: 105637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105637>.

5. Bodin D., Sountharajahb A., Ghorbani J. et al. A State-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 2021; 24: 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2015423>.
6. Shishkin E.A. The method for calculating phase angle between exciter force of vibration exciter and roller displacement. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(3): 388–394. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>.
7. Zhang Q., An Z., Huangfu Z., Li Q. A review on roller compaction quality control and assurance methods for earthwork in five application scenarios. *Materials*. 2022; 15(7): 2610. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15072610>.
8. Lee S., Sharafat A., Kim I.S., Seo J. Development and assessment of an intelligent compaction system for compaction quality monitoring, assurance, and management. *Applied Sciences*. 2022; 12(14): 6855. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12146855>.
9. Mazumder M., Yun J., Lee S.-J., Jeong K.-D. Cost-effectiveness of conventional compaction and intelligent compaction methods of asphalt pavement overlay. *Sustainability*. 2021; 13(21): 11830. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132111830>.
10. He Z., Zhang J., Paolo C. Compaction quality inspection method of soil-rock filled embankment based on continuous compaction control technology. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 21(2): 144–152. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8894042>.
11. Fang Z., Zhu Y., Ma T., Zhang Y., Han T., Zhang J. Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction. *Automation in Construction*. 2022; 142: 104473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104473>.
12. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Krayushkin A.S. Justification of chosen values of the weight coefficients of the compaction value for continuous compaction control systems for vibration rollers. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2020; vol. 8, no. 1: 104–110. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25206/2310-9793-8-1-104-110>.
13. Ma Y. Numerical simulation of Intelligent Compaction for subgrade construction. *Journal of Central South University*. 2020; 27: 2173–2184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4439-2>.
14. Hou Z., Dang X., Yuan Y., Tian B., Li S. Research on intelligent compaction technology of subgrade based on regression analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 2021(1): 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/4100896>.
15. Wang Z., Qian J., Ling J. Intelligent compaction measurement value in variability control of subgrade compaction quality. *Applied Sciences*. 2024; 14(1): 68. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14010068>.
16. Baek S.-H., Kim J.-Y., Kim J., Cho J.-W. Continuous compaction control of subgrade bases using intelligent compaction measurement values with dynamic cone penetrometer and light weight deflectometer. *Automation in Construction*. 2024; 168: 105835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105835>.
17. Chang G., Xu Q. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction. *Automation in Construction*. 2016; 62: 78–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.004>.
18. Pang J., Yang J., Zhu B., Qian J. Study of regression algorithms and influential factors between intelligent compaction measurement values and in-situ measurement values. *Applied Sciences*. 2023. 13(10): 5953. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13105953>.
19. Tatsuoka F., Hashimoto T., Tateyama K. Soil stiffness as a function of dry density and the degree of saturation for compaction control. *Soils Found*. 2021; 61(4): 989–1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.007>.
20. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Method for determining properties of asphalt concrete mixture compacted by vibratory roller. *Handbook. An engineering journal*. 2022; 03: 47–52. DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2022.03.pp.047-052>.
21. Xu Z., Khabbaz H., Fatahi B., Wu D. Real-time determination of sandy soil stiffness during vibratory compaction incorporating machine learning method for intelligent compaction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022; 14(5): 1609–1625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.004>.
22. Lun L. Nonlinear dynamics of the rigid drum for vibratory roller on elastic subgrades. *Shock and vibration*. 2021; 2021(9): 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9589230>.
23. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the variable contact geometry in vibratory roller compaction. *Infrastructures*. 2023; 8(7): 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070110>.
24. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Modeling of interaction between road roller vibrating drum and soil being compacted. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024; 26: 60–67. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Шишкин Е.А. Руководство темой исследования. Постановка цели и задач. Разработка модели взаимодействия вальца с грунтом.

Смоляков А.А. Анализ изученности темы. Подготовка материала для статьи, перевод литературы. Анализ результатов моделирования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Shishkin E.A. Supervising of the research theme. Setting goal and objectives. Roller–soil interaction model development.

Smolyakov A.A. Review of Continuous Compaction Control Technologies. Preparing data for the article, translation. Simulation result's analysis.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шишкин Евгений Алексеевич – канд. техн. наук, доц. высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (680042, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>,

SPIN-код: 6027-4510,

e-mail: 004655@togudv.ru

Смоляков Александр Андреевич – аспирант высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (680042, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4332-1667>,

e-mail: gm26578@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shishkin Evgenij Al. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Graduate School of Industrial Engineering, Pacific National University (136, Tikhookeanskaya street, Khabarovsk, 680042).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>,

SPIN-code: 6027-4510,

e-mail: 004655@togudv.ru

Smolyakov Alexander A. – Postgraduate student, Graduate School of Industrial Engineering, Pacific National University (136, Tikhookeanskaya street, Khabarovsk, 680042).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4332-1667>,

e-mail: gm26578@gmail.com