

Научная статья
УДК 625.084
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>
EDN: HQAJCW



МЕТОД РАСЧЕТА ФАЗОВОГО УГЛА МЕЖДУ ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛОЙ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ВАЛЬЦА

Е.А. Шишкин

Тихоокеанский государственный университет,
г. Хабаровск, Россия
004655@pnu.edu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе уплотнения грунтов важно иметь информацию о текущей плотности слоя, так как это позволяет оперативно корректировать нагрузку на уплотняемый материал. Полевые методы оценки качества уплотнения не справляются с этой задачей, так как производят точечную оценку в пределах площади покрытия. Поэтому все большее распространение получают системы непрерывного контроля уплотнения, устанавливаемые на вибрационные дорожные катки. В системах, разработанных компаниями BOMAG и AMMANN, для расчета показателя качества уплотнения среди прочих требуется значение фазового угла между вынуждающей силой возбудителя и перемещением вальца. Фазовый угол определяется датчиком положения дебаланса, что весьма трудоемко. Кроме этого, в состав систем непрерывного контроля уплотнения входит акселерометр. Целью данной статьи является разработка косвенного метода расчета фазового угла на основе показаний акселерометра.

Методика исследования. Для достижения цели работы произведено исследование одномассной модели «каток-грунт» в типичном для вибрационных катков режиме (периодический отрыв). В результате моделирования установлено, что реакция уплотняемого материала оказывает основное влияние на вертикальную составляющую ускорения вальца и практически не влияет на горизонтальную составляющую. Это подтверждается экспериментальными данными.

Результаты. Фазовый угол возможно определить методом взаимной корреляции сигналов горизонтального и вертикального ускорений вальца, полученных с помощью акселерометра.

Заключение. В исследовании предложен новый метод расчета фазового угла между вынуждающей силой возбудителя и перемещением вальца, исключающий непосредственное измерение указанного угла. Расчет угла производится по показаниям двухосевого акселерометра, устанавливаемого на дорожный каток. Предложенный метод позволяет упростить систему непрерывного контроля уплотнения и снизить трудоемкость измерения фазового угла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожный каток, вибрационный валец, возбудитель, вынуждающая сила, фазовый угол, ускорение, спектр

Статья поступила в редакцию 29.04.2024; одобрена после рецензирования 20.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Шишкин Е.А. Метод расчета фазового угла между вынуждающей силой вибровозбудителя и перемещением вальца // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 388-394. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>

© Шишкин Е.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>

EDN: HQAJCW

THE METHOD FOR CALCULATING PHASE ANGLE BETWEEN EXCITER FORCE OF VIBRATION EXCITER AND ROLLER DISPLACEMENT

Evgenii A. Shishkin

Pacific National University,

Khabarovsk, Russia

004655@pnu.edu.ru

ABSTRACT

Introduction. In the process of soil compaction it is important to have information about the current density of the layer, as it enables to quickly adjust the load on the compacted material. The field methods of compaction quality assessment do not cope with this task, as they make point estimation within the pavement area. Therefore, continuous compaction monitoring systems installed on vibratory road rollers are becoming increasingly common. The systems developed by BOMAG and AMMANN require, among other things, the phase angle between the exciter force and the roller movement to calculate the compaction quality index. The phase angle is determined by the unbalance position sensor, which is very labor-intensive. In addition, continuous compaction monitoring systems include an accelerometer. The purpose of this paper is to develop an indirect method for calculating the phase angle from accelerometer readings.

The method of research. In order to achieve the purpose of the work, a roller-soil single-mass model in a typical mode for vibratory rollers (periodic loss of contact) has been studied. As a result of modeling it has been found that the reaction of the compacted material has the main influence on the vertical component of a roller acceleration and practically does not affect the horizontal component. This is confirmed by the experimental data.

Results. The phase angle can be determined by mutual correlation of the horizontal and vertical acceleration signals of the roller obtained with the accelerometer.

Conclusion. The study proposes a new method of calculating the phase angle between the exciter force and the roller displacement, which eliminates the direct measurement of this angle. The calculation of the angle is based on the readings of a two-axis accelerometer installed on the road roller. The proposed method enables to simplify the system of continuous compaction control and reduce the labor intensity of phase angle measurement.

KEYWORDS: road roller, vibrating roller, exciter, exciter force, phase angle, acceleration, spectrum

The article was submitted 29.04.2024; approved after reviewing 20.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

Author 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. 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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>

© Shishkin E.A., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Стандартные методы оценки плотности уплотненного слоя грунта характеризуются низкой эффективностью, так как не позволяют определять качество уплотнения слоя по всей площади, а также нарушают целостность покрытия [1, 2]. Перспективным методом оценки качества уплотнения слоя грунта является использование показателей ICMV (Intelligent Compaction Measurement Value – значение интеллектуального измерителя уплотнения) [3, 4, 5].

На оси вибрационного вальца катка, оснащенного системой интеллектуального уплотнения, устанавливается акселерометр для регистрации ускорения вальца. Данные об ускорении вальца используются блоком управления для расчета значения интеллектуального измерителя уплотнения (ICMV) [5, 6].

Компания BOMAG разработала систему непрерывного контроля уплотнения VARIOCONTROL, в которой для оценки качества уплотнения используется вибрационный модуль $E_{\text{виб}}$, характеризующий жесткость уплотняемого грунта [7, 8]. В расчете величины вибрационного модуля $E_{\text{виб}}$ используется контактная сила взаимодействия вальца с уплотняемым материалом $F_{\text{в}}$, которая определяется из уравнения баланса сил, действующих на валец [9]:

$$F_{\text{в}} = m_{\text{в}} \omega^2 A \cos(\omega t - \varphi) + m_0 r_0 \omega^2 \cos(\omega t) + (m_{\text{п}} + m_{\text{в}}) g, \quad (1)$$

где $m_{\text{в}}$ – масса вальца, кг; ω – рабочая частота вращения дебаланса, рад/с; A – амплитуда вертикального ускорения вальца, м/с²; $m_0 r_0$ – статический момент дебаланса вибровозбудителя, кг·м; $m_{\text{п}}$ – масса рамы, кг; φ – фазовый угол, рад.

Компания AMMANN предлагает систему непрерывного контроля уплотнения ACE (Ammann Compaction Expert), в которой для оценки качества уплотнения используется интегрированная с катком жесткость $k_{\text{в}}$ [10, 11]:

$$k_{\text{в}} = \omega^2 \left[m_{\text{в}} + \frac{m_0 r_0 \cos \varphi}{z_{\text{в}}} \right], \quad (2)$$

где $z_{\text{в}}$ – вертикальное смещение вальца, м.

Таким образом, для расчета показателей ICMV, таких как интегрированная с катком жесткость $k_{\text{в}}$, вибрационный модуль $E_{\text{виб}}$, а также для определения величины контактной силы взаимодействия вальца с уплотняемым материалом, необходимо знать значение фа-

зового угла φ между вынуждающей силой возбудителя и перемещением вальца.

Оснащение существующего дорожного катка датчиком положения дебаланса для определения фазового угла φ является весьма трудоемкой операцией [12, 13].

Известно, что акселерометр входит в базовый комплект оборудования большинства систем непрерывного контроля уплотнения [14, 15]. Целью данной статьи является разработка косвенного метода расчета фазового угла φ на основе показаний акселерометра.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Возможность осуществления указанного метода рассмотрим на примере одномассной модели «каток-грунт» в режиме периодического отрыва, поскольку этот режим является типичным рабочим режимом вибрационных катков [16].

Вынуждающая сила вибровозбудителя с круговой вибрацией содержит вертикальную $F_{\text{в}}$ и горизонтальную $F_{\text{г}}$ составляющие, вызывающие движение вальца вдоль осей z и x соответственно (рисунок 1):

$$\begin{aligned} F_{\text{в}} &= m_0 r_0 \omega^2 \cos(\omega t); \\ F_{\text{г}} &= m_0 r_0 \omega^2 \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $F_{\text{в}}$, $F_{\text{г}}$ – вертикальная и горизонтальная составляющие вынуждающей силы соответственно, Н; $m_0 r_0$ – статический момент дебаланса вибровозбудителя, кг·м; ω – рабочая частота вращения дебаланса, рад/с.

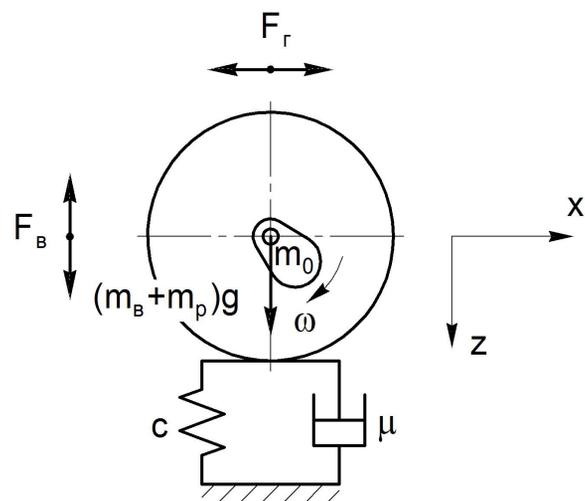


Рисунок 1 – Схема одномассной модели «каток-грунт»
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Schematic diagram of the roller-soil single-mass model
Source: compiled by the author.

Влияние реакции грунта на горизонтальную составляющую ускорения вальца \ddot{x}_g минимально. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований [17, 18, 19]. Типичный спектр сигнала горизонтального

ускорения вальца содержит всего одну гармонику – основную (рисунок 2). На вертикальную составляющую ускорения вальца \ddot{z}_g , напротив, основное влияние оказывает реакция уплотняемого материала (рисунок 3).

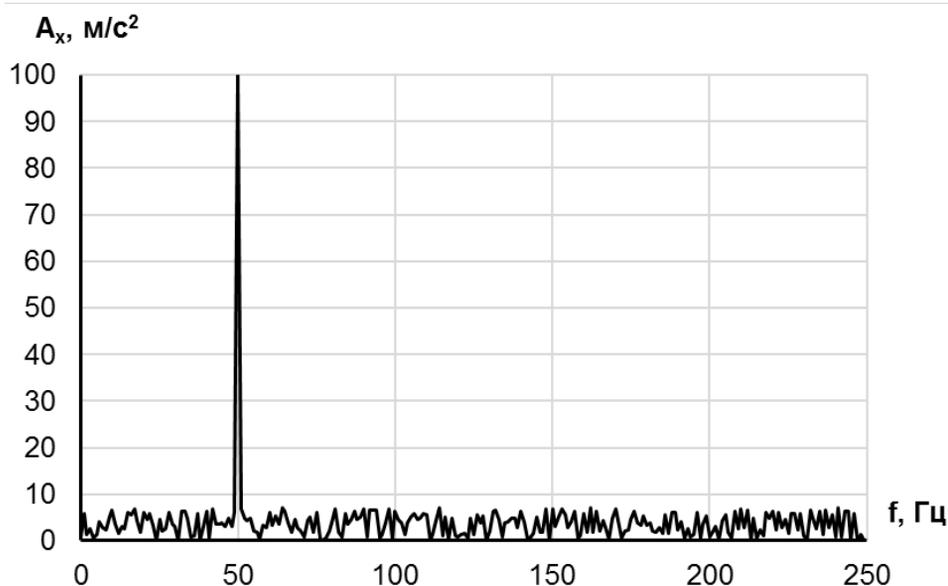


Рисунок 2 – Спектр сигнала горизонтального ускорения вальца
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Spectrum of the horizontal roller acceleration signal
Source: compiled by the author.

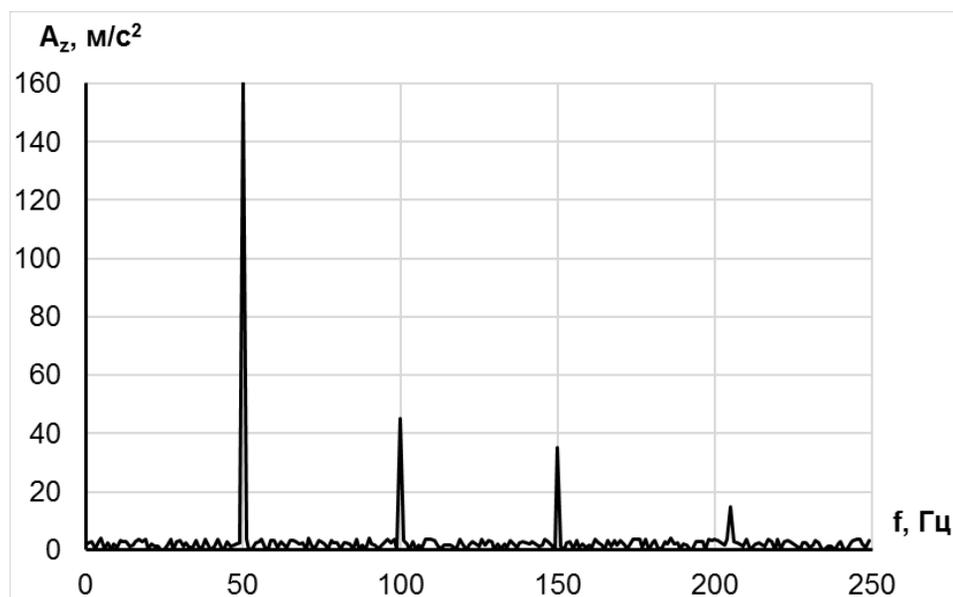


Рисунок 3 – Спектр сигнала вертикального ускорения вальца
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Spectrum of the vertical roller acceleration signal
Source: compiled by the author.

Следовательно, для определения разности фаз между составляющими ускорения достаточно определить разность фаз между сигналом горизонтального ускорения вальца при его движении в отрыве от грунта и сигналом вертикального ускорения вальца при его движении в контакте с уплотняемым материалом.

Рассмотрим движение вальца по вертикали. Как известно, такое движение вальца в контакте с грунтом для одномассной модели описывается уравнением

$$z_b = A \cos(\omega t - \varphi), \quad (4)$$

где z_b – вертикальное смещение вальца, м; φ – фазовый угол, рад; A – амплитуда колебаний, м.

Дважды продифференцировав (4), получим

$$\ddot{z}_b = -\omega^2 A \cos(\omega t - \varphi) = -A_z \cos(\omega t - \varphi), \quad (5)$$

где \ddot{z}_b – вертикальная составляющая ускорения вальца, м/с²; $A_z = \omega^2 A$ – амплитуда вертикальной составляющей ускорения вальца (в контакте с грунтом), м/с².

Рассмотрим движение вальца по горизонтали. Дифференциальное уравнение горизонтального движения вальца в отрыве от грунта имеет вид

$$m_0 r_0 \omega^2 \sin(\omega t) - \ddot{x}_b m_b = 0, \quad (6)$$

где \ddot{x}_b – горизонтальная составляющая ускорения вальца, м/с²; m_b – масса вальца, кг.

Из (6) получим

$$\ddot{x}_b = \frac{m_0 r_0 \omega^2}{m_b} \sin(\omega t) = A_x \sin(\omega t), \quad (7)$$

где $A_x = m_0 r_0 \omega^2 / m_b$ – амплитуда горизонтальной составляющей ускорения вальца (в отрыве от грунта), м/с².

Определим разность фаз α_{x-z} между горизонтальной и вертикальной составляющими ускорения вальца.

Преобразуем выражения (5) и (7):

$$\ddot{z}_b = A_z \cos(\omega t - \varphi - \pi); \quad (8)$$

$$\ddot{x}_b = A_x \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (9)$$

Тогда разность фаз α_{x-z} равна

$$\alpha_{x-z} = \left(-\frac{\pi}{2}\right) - (-\varphi - \pi) = \varphi + \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

Из выражения (8) получим фазовый угол

$$\varphi = \alpha_{x-z} - \frac{\pi}{2}. \quad (11)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, для определения фазового угла φ между вынуждающей силой возбудителя и перемещением вальца необходимо вычислить разность фаз α_{x-z} между сигналами горизонтального и вертикального ускорений вальца, полученных с помощью акселерометра, и от результата отнять угол $\pi/2$. Угол α_{x-z} рассчитывается стандартным методом взаимной корреляции [20], используемым в теории обработки сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В то время как классические системы непрерывного контроля уплотнения оснащены специальным датчиком для измерения фазового угла между вынуждающей силой возбудителя и перемещением вальца, в данном исследовании предложен новый метод оценки фазового угла без использования указанного датчика. Разработанный метод расчета фазового угла φ заключается в сравнении фаз вертикального и горизонтального ускорения вибрационного вальца. Для получения значений указанных ускорений достаточно установить на дорожный каток двухосевой акселерометр, а сдвиг фаз α между ускорениями вычислять методом взаимной корреляции или каким-либо другим. Предложенный метод упрощает систему непрерывного контроля уплотнения за счет отказа от использования специального датчика измерения фазового угла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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: 10.3390/app13105953.
2. Тюремнов И.С., Морев А.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 1 // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2015; 4(39): 99–108.
3. 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: 4100896. DOI: 10.1155/2021/4100896.

4. Yangping Y, Er Bo S. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart construction and sustainable cities*. 2023; 1. DOI: 10.1007/s44268-023-00004-4.

5. Wang Z., Qian J., Ling J., Intelligent compaction measurement value in variability control of subgrade compaction quality. *Applied sciences*. 2023; 14(1): 68. DOI: 10.3390/app14010068.

6. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Методика определения свойств асфальтобетонной смеси, уплотняемой вибрационным катком. *Справочник // Инженерный журнал*. 2022; 3(300): 47–52. DOI: 10.14489/hb.2022.03.pp.047–052

7. 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: 10.1016/j.autcon.2022.104473.

8. Тюремнов И.С., Морев А.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 2 // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2016; 1(40): 69–76.

9. 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: 10.1016/j.jrmge.2022.07.004.

10. Meehan C., Cacciola D., Tehrani F., Baker W. Assessing soil compaction using continuous compaction control and location-specific in situ tests. *Automation in construction*. 2016; 73(1). DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.017.

11. Mooney M., Adam D. Vibratory roller integrated measurement of earthwork compaction: an overview. *Proceedings of the 7th FMGM 2007: Field measurements in geomechanics*. 2007; 1–12. DOI: 10.1061/40940(307)80.

12. Смоляков А.А., Шишкин Е.А. Система автоматического управления вибратором вальца дорожного катка // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2021; 2(61): 45–52.

13. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the vibratory compaction process for roads. *Buildings*. 2023; 13(11): 2837. DOI 10.3390/buildings13112837.

14. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // *Системы. Методы. Технологии*. 2022; 1(53): 36–42. DOI 10.18324/2077-5415-2022-1-36-42.

15. Emelyanov R.T., Prokopen A.P., Vasiliev Y.V. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller. *Journal of Physics*. 2021; 1889: 42059. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.

16. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the variable contact geometry in vibratory roller compaction. *Infrastructures*. 2023; 8(7): 110. DOI: 10.3390/infrastructures8070110.

17. Тюремнов И.С., Краюшкин А.С., Шорохов Д.А. Экспериментальные исследования по уплотнению грунта вибрационным катком HAMM 3411 // *Вестник СибАДИ*. 2022; 6(88): 828–840. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840.

18. Kim J., Lee S.-Y., Cho J.-w. A study on the analysis of the ground compaction effect according to the roller operation method through CMV analysis using IC rollers. *Advances in civil engineering*. 2023; 2023: 6589652. DOI: 10.1155/2023/6589652.

19. Hu W., Polaczyk P., Jia X., Gong H., Huang B. Visualization and quantification of lab vibratory compacting process for aggregate base materials using accelerometer. *Transportation Geotechnics*. 2020; 25: 100393. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100393.

20. Зайцева И.Н. Алгоритм определения сдвига фаз гармонических сигналов с использованием стохастической дискретизации // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2019; 3: 90–96. DOI 10.24143/2072-9502-2019-3-90-96.

REFERENCES

1. 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: 10.3390/app13105953.

2. Tyuremnov I.S., Morev A.S. The review of the Continuous Compaction Control systems for soil compaction by vibratory rollers. Part 1. *Bulletin of PNU*. 2015; 4(39): 99–108. (in Russ.)

3. 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: 4100896. DOI: 10.1155/2021/4100896.

4. Yangping Y, Er Bo S. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart construction and sustainable cities*. 2023; 1. DOI: 10.1007/s44268-023-00004-4.

5. Wang Z., Qian J., Ling J., Intelligent compaction measurement value in variability control of subgrade compaction quality. *Applied sciences*. 2023; 14(1): 68. DOI: 10.3390/app14010068.

6. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Method for determining properties of asphalt concrete mixture compacted by vibratory roller. *Handbook. An Engineering journal*. 2022; 3(300): 47–52. DOI: 10.14489/hb.2022.03.pp.047–052. (in Russ.)

7. 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: 10.1016/j.autcon.2022.104473.

8. Tyuremnov I.S., Morev A.S. The review of the Continuous Compaction Control systems for soil compaction by vibratory rollers. Part 2. *Bulletin of PNU*. 2016; 1(40): 69–76. (in Russ.)

9. 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: 10.1016/j.jrmge.2022.07.004.

10. Meehan C., Cacciola D., Tehrani F., Baker W. Assessing soil compaction using continuous compaction control and location-specific in situ tests. *Automation in construction*. 2016; 73(1). DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.017.

11. Mooney M., Adam D. Vibratory roller integrated measurement of earthwork compaction: an overview. *Proceedings of the 7th FMGM 2007: Field measurements in geomechanics*. 2007; 1–12. DOI: 10.1061/40940(307)80.

12. Smolyakov A.A., Shishkin E.A. The system of automated control of road roller drum vibrator. *Bulletin of PNU*. 2021; 2(61): 45–52. (in Russ.)

13. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the vibratory compaction process for roads. *Buildings*. 2023; 13(11): 2837. DOI 10.3390/buildings13112837.

14. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Justification of the method of regulating the contact force of the vibrating roller with the compacted material. *Systems Methods Technologies*. 2022; 1(53): 36–42. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-1-36-42. (in Russ.)

15. Emelyanov R.T., Prokopen A.P., Vasiliev Y.V. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller. *Journal of Physics*. 2021; 1889: 42059. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.

16. Pistor J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the variable contact geometry in vibratory roller compaction. *Infrastructures*. 2023; 8(7): 110. DOI: 10.3390/infrastructures8070110.

17. Tyuremnov I.S., Krayushkin A.S., Shorokhov D.A. Experimental studies on compaction of soil with HAMM 3411 vibrating roller. *The Russian*

Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19(6): 828–840. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840>

18. Kim J., Lee S.-Y., Cho J.-w. A study on the analysis of the ground compaction effect according to the roller operation method through CMV analysis using IC rollers. *Advances in civil engineering*. 2023; 2023: 6589652. DOI: 10.1155/2023/6589652.

19. Hu W., Polaczyk P., Jia X., Gong H., Huang B. Visualization and quantification of lab vibratory compacting process for aggregate base materials using accelerometer. *Transportation Geotechnics*. 2020; 25: 100393. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100393.

20. Zaitseva I.N. Algorithm for determining phase shift of harmonic signals using stochastic discretization. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2019; 3: 90–96. DOI 10.24143/2072-9502-2019-3-90-96. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шишкин Евгений Алексеевич – канд. техн. наук, доц. высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>, **SPIN-код**: 6027-4510, e-mail: 004655@pnu.edu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgenii A. Shishkin – Cand. of Sci., Associate Professor of Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (136 Tikhookeanskaya street, Khabarovsk, 680035), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>, **SPIN-code**: 6027-4510, e-mail: 004655@pnu.edu.ru