

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 539.312

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-4-13

Упруго-линейная модель динамического контроля жесткости балластного слоя железнодорожного пути

В. С. Выплавень, аспирант, Сибирский государственный университет путей сообщения,
Новосибирск, Россия

С. А. Бехер, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения,
Новосибирск, Россия

В статье представлены результаты математического моделирования ударных упругих процессов установки динамического контроля балластного слоя железнодорожного пути. Установка используется для определения степени уплотнения и оценки несущей способности балластного слоя в межремонтный период, при выполнении подбивочных, выправочных работ, динамической стабилизации пути и в период контроля технологии осуществления ремонтных путевых работ. Процесс воздействия на контролируемое упругое основание рассмотрен в рамках четырехэлементной математической модели. Выявлены временные интервалы взаимодействия между элементами модели. Каждый временной интервал описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка, для которой получены аналитические решения.

Выполнена верификация модели с реальными сигналами, зарегистрированными в процессе экспериментов на основании с известной жесткостью при вариации жесткости упруго-демпферного элемента. В процессе испытаний вертикальное ускорение штампа измерялось акселерометром с частотой дискретизации 42 кГц, сохранялось на ЭВМ и обрабатывалось специализированным программным обеспечением. Для верификации результатов моделирования полученные сигналы сравнивались с аналитическими с использованием корреляционного анализа.

В результате моделирования определены амплитудные и временные информативные параметры для оценки модуля упругости основания. Получены зависимости параметров от характеристик установки в условиях неопределенности высоты падения груза, массы штампа, жесткости упруго-демпферного элемента, угла наклона направляющей штанги. По полученным зависимостям оценено влияние неопределенностей на погрешность оценки жесткости основания. Определены информативные параметры, позволяющие определить жесткость основания с погрешностью не более 7 %. Разработан способ выбора оптимальных характеристик конструкции установки и информативных параметров для обеспечения минимальных погрешностей.

Ключевые слова: железнодорожный путь, балласт, упругость, динамический плотномер, неразрушающий контроль, математическая модель, подрельсовое основание.

Введение

Способность строительных конструкций выполнять заложенные при проектировании функции в течение всего расчетного срока эксплуатации напрямую зависит от надежности их оснований [1–3]. Железнодорожные пути являются одними из самых высоконагруженных объектов инфраструктуры [4–7]. Динамическое воздействие подвижного состава на путь в несколько раз превышает статическую осевую нагрузку. Подшпальное основание – балластный слой – передает и равномерно распределяет нагрузку от шпал на нижнее строение пути – основную площадку земляного полотна.

Устойчивость [8–10] железнодорожного пути

в проектном положении в межремонтный период в значительной степени определяется характеристиками балластного слоя. После капитальных и средних ремонтов проводится динамическая стабилизация пути с использованием специализированных выправочно-подбивочных машин и динамических стабилизаторов [11–13]. Нарушения технологии путевых ремонтных работ могут привести к недостаточной устойчивости балласта, снижению его характеристик и отклонениям оси пути от проектного положения как в плане, так и в профиле [14–16]. Эти неисправности приводят к ограничениям скорости движения, снижают пропускную способность, требуют значительных материальных

затрат на их устранение и являются потенциальной угрозой безопасности движения [17, 18]. В настоящее время средства контроля устойчивости балластного слоя после выполнения плановых видов ремонта в линейных подразделениях службы пути не применяются.

Для решения задачи оперативного контроля степени уплотнения грунтов положительно рекомендовали себя методы, основанные на динамическом ударном воздействии на штамп и измерении его реакции – перемещения, скорости и ускорения [19–22]. В автодорожном строительстве широко применяются устройства – динамические плотномеры [23], к преимуществам которых относятся: широкий спектр динамических нагрузок, мобильность и компактность, возможность измерения упругих модулей и остаточной деформации. С учетом косвенного характера метода динамического штампа для разработки экспресс-методики контроля степени уплотнения балластного слоя необходимы экспериментально верифицированные модели динамического плотномера, специализированного для данного вида оснований.

Цель работы – оптимизация параметров динамического контроля балластного слоя на основе решения обратной задачи определения модуля упругости основания в рамках упруго-линейной модели, разработка алгоритмов и программного обеспечения для расчета первичных сигналов акселерометра при динамическом ударном воздействии.

Описание и физическая модель экспериментальной установки. Установка для динамического контроля (рис. 1) состоит из штампа массой m_1 , установленного на контролируемое основание с жесткостью k_2 . В верхней части штампа закреплена вертикальная направляющая – штанга. По штанге свободно перемещается груз массой m_1 , оснащенный фторопластовыми вставками для уменьшения сил трения. Между грузом и штампом расположен упруго-демпферный элемент с жесткостью k_1 .

Энергия удара определяется потенциальной энергией груза, поднятого перед падением на высоту h , при наклоне штанги на угол α , в поле тяжести с ускорением свободного падения g . Без учета трения скольжения и силы сопротивления воздуха скорость груза в начальный момент удара, очевидно, определяется выражением:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \cos \alpha}. \quad (1)$$

Ускорение штампа регистрировалось с частотой дискретизации 42 кГц расположенным в центре штампа акселерометром ADXL326 с верхним пределом измерений $\pm 157 \text{ м/с}^2$ в частотном диапазоне от 0,5 Гц до 1,6 кГц. Основные технические характеристики установки с упруго-демпферным элементом в виде нескольких (1–6) слоев полиуретана приведены в табл. 1. Жесткость элемента k_2 определена при статическом нагружении на прессе по зависимости силы от деформации с погрешностью не более 5 %.

Таблица 1. Основные характеристики установки динамического контроля
Table 1. Main characteristics of the light weight deflectometer

№	Величина	Значение
1	Масса падающего груза m_1 , кг	10,20 ± 0,01
2	Масса штампа со штангой m_2 , кг	17,90 ± 0,01
3	Радиус штампа, мм	0,11 ± 0,001
4	Жесткость элемента k_1 , МН/м	1,30 ± 0,07
5	Жесткость основания k_2 , МН/м	От 10 до 50
6	Высота поднятия груза, h , м	От 0,1 до 1,2

Установка описывается тремя постоянными параметрами: массами груза m_1 и штампа m_2 , жесткостью элемента k_1 , переменным параметром – высотой поднятия груза h . Основное назначение установки – определение жесткости основания k_2 по временным и амплитудным параметрам ускорения штампа.

Цель оптимизации методики контроля состоит в определении таких параметров установки, которые обеспечивают минимальную суммар-

ную погрешность измерения жесткости k_2 при условии минимальной суммарной массы установки ($m_1 + m_2$) и достаточного уровня динамической нагрузки на грунт, эквивалентной воздействию подвижного состава. Основными источниками погрешности измерения являются вариации положения установки в пространстве (начальной высоты груза и угла наклона штанги), жесткости элемента k_1 и массы основания m_2 .

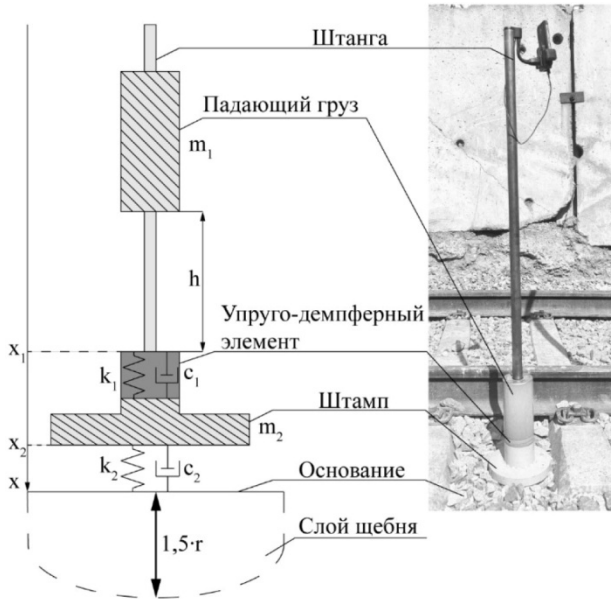


Рис. 1. Модель (а) и фотография (б) установки динамического контроля
Fig. 1. Model (a) and photo (b) of the light weight deflectometer

Неопределенности высоты и угла наклона направляющей штанги относительно вертикали создают вариации начальной скорости падающего груза при взаимодействии с упругим элементом. Жесткость элемента k_1 изменяется в зависимости от амплитуды и частоты динамического воздействия (нелинейность), температуры, степени загрязнения и старения с течением времени (непостоянство).

Масса m_2 является одним из наиболее неопределенных параметров системы, поскольку в рамках физической модели на рис. 1 масса представляет собой сумму массы штампа m_{20} и обобщенную массу контролируемого основания, которая может быть оценена как половина массы щебня в цилиндре с основанием радиусом r и высотой $1,5 \cdot r$.

Исходя из предполагаемой плотности контролируемого балласта $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$ при радиусе штампа $r = 0,11 \text{ м}$ масса балласта составит

$$m_{21} = 0,5 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot 1,5 \cdot r = 2,2 \text{ кг},$$

где $1,5 r$ – глубина влияния динамической нагрузки [24].

Оптимизация способа измерения основана на аналитическом решении упруго-линейной модели для перемещения, скорости и ускорения штампа и оценки погрешности по изменениям характеристик регистрируемых сигналов при вариациях параметров установки.

Математическая упруго-линейная модель и аналитическое решение

В общем виде движение груза и штампа описываются временными функциями смещения от положений равновесия $x_1(t)$ и $x_2(t)$ соответственно. Эти функции являются решениями системы дифференциальных уравнений второго порядка (второй закон Ньютона) для груза и штампа:

$$\begin{cases} m_1 \cdot x_1'' = F_1(k_1, k_2, x_1, x_2) + m_1 \cdot g, \\ m_2 \cdot x_2'' = F_2(k_1, k_2, x_1, x_2) + m_2 \cdot g, \end{cases} \quad (2)$$

где F_1 и F_2 – обобщенная сила реакции упруго-демпферного элемента и контролируемого основания на груз и штамп соответственно, Н; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

В общем случае обобщенные силы, действующие на груз F_1 и штамп F_2 , определяются законом Гука и имеют вид

$$\begin{cases} F_1 = -k_1 \cdot (x_1 - x_2), \\ F_2 = -k_2 \cdot x_2 + k_1 \cdot (x_1 - x_2). \end{cases} \quad (3)$$

Упруго-демпферный элемент k_1 и основание k_2 работают только на сжатие, так как не имеют жесткой связи с грузом и штампом при растяжении. В математических выражениях для упругих сил F_1 и F_2 (3) на интервалах времени t_2 , t_3 , t_4 некоторые слагаемые отсутствуют (рис. 2).

Интервал t_1 начинается в момент времени $t = 0$ мс, когда груз сталкивается со штампом. На упруго-демпферный элемент k_1 и основание k_2 действуют упругие силы до тех пор, пока штамп сжимает основание ($x_2 < 0$) (рис. 2), а груз и штамп сжимают упруго-демпферный элемент ($x_2 - x_1 > 0$) (рис. 2) соответственно.

На последующем интервале t_2 штамп отрывается от основания (рис. 2, а), его перемещение $x_2 > 0$ и, следовательно, упругая реакция основания на штамп отсутствует. Упруго-демпферный элемент k_1 продолжает создавать силы, действующие как на груз, так и на штамп.

При определенном соотношении жесткостей и масс элементов вместо интервала t_2 реализуется интервал t_3 (рис. 2, б), на котором основание воздействует на штамп ($x_2 < 0$), а упруго-демпферный элемент не создает упругого действия ($x_2 - x_1 < 0$).

Последний интервал движения t_4 описывает состояние системы, в котором упруго-демпферный элемент k_1 и основание k_2 находятся в состоянии равновесия ($x_2 > 0$ и $x_2 - x_1 < 0$) и штамп и груз движутся только под действием сил тяжести (рис. 2).

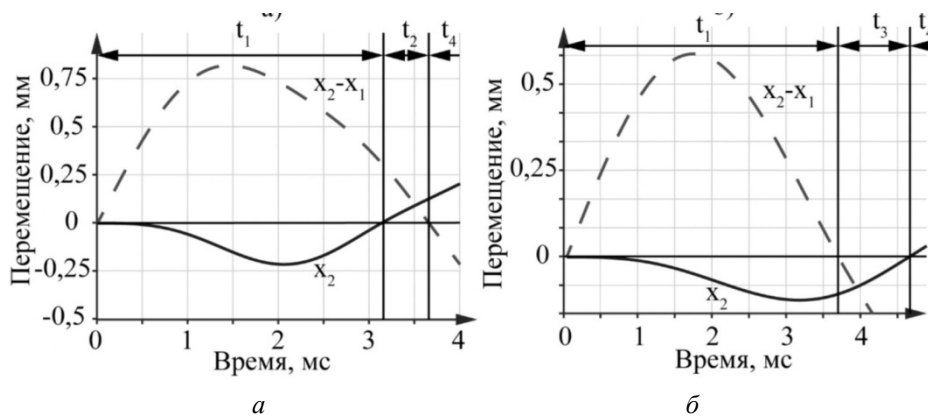


Рис. 2. Графики зависимости перемещения штампа x_2 и разности перемещений штампа и груза ($x_2 - x_1$) от времени и временные интервалы: t_1, t_2, t_3, t_4 при жесткости упруго-демпферного элемента k_1 : 8 МН/м (а) и 3 МН/м (б)

Fig. 2. Loading plate movement x_2 time dependence and difference between loading plate and falling weight movement ($x_2 - x_1$) plots and time intervals: t_1, t_2, t_3, t_4 with elastic-damping element stiffness k_1 : 8 MN/m (a) and 3 MN/m (b)

Таким образом, динамическая система описывается четырьмя дифференциальными уравнениями второго порядка с постоянными коэф-

фициентами (табл. 2). В общем виде решения системы являются комбинацией тригонометрических и степенных функций:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n (A_j \cdot \cos(\omega_j \cdot t) + B_j \cdot \sin(\omega_j \cdot t)) + C \cdot t^2 + D \cdot t + E, \tag{4}$$

где $n = 2$ – число независимых корней характеристического уравнения; ω_j – корень характеристического уравнения (табл. 4); A_j, B_j, C, D, E – постоянные коэффициенты.

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{\omega_{IV}^2 \pm \sqrt{\omega_{IV}^2 - 4 \cdot \omega_V^2}}{2}, \tag{5}$$

где ω_{IV}, ω_V – характерные частоты установки, формулы для их вычисления в каждом временном интервале приведены в табл. 3.

Таблица 2. Временные интервалы работы системы и соответствующие им уравнения

Table 2. System time intervals and their corresponding equations

Интервал	Система уравнений
t_1	$\begin{cases} m_1 \cdot x_1'' = -k_1 \cdot (x_1 - x_2) + m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot x_2'' = -k_2 \cdot x_2 + k_1 \cdot (x_1 - x_2) + m_2 \cdot g \end{cases}$
t_2	$\begin{cases} m_1 \cdot x_1'' = -k_1 \cdot (x_1 - x_2) + m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot x_2'' = k_1 \cdot (x_1 - x_2) + m_2 \cdot g \end{cases}$
t_3	$\begin{cases} m_1 \cdot x_1'' = m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot x_2'' = -k_2 \cdot x_2 + m_2 \cdot g \end{cases}$
t_4	$\begin{cases} m_1 \cdot x_1'' = m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot x_2'' = m_2 \cdot g \end{cases}$

Жесткости и массы входят в характеристические уравнения (табл. 2) только в виде собственных частот: груза $\omega_I = \sqrt{k_1/m_1}$, штампа на основании $\omega_{II} = \sqrt{k_2/m_2}$ и штампа на упругом элементе $\omega_{III} = \sqrt{k_1/m_2}$. Характеристическое уравнение имеет два независимых решения:

Таблица 3. Значения циклических частот на различных временных интервалах

Table 3. Cyclic frequencies values at different time intervals

Интервал	Циклические частоты
t_1	$\begin{aligned} \omega_{IV}^2 &= \omega_I^2 + \omega_{II}^2 + \omega_{III}^2, \\ \omega_V^2 &= \omega_I^2 \cdot \omega_{II}^2. \end{aligned}$
t_2	$\begin{aligned} \omega_{IV}^2 &= \omega_I^2 + \omega_{III}^2, \\ \omega_V^2 &= 0. \end{aligned}$
t_3	$\begin{aligned} \omega_{IV}^2 &= \omega_{II}^2, \\ \omega_V^2 &= 0. \end{aligned}$
t_4	$\begin{aligned} \omega_{IV}^2 &= 0, \\ \omega_V^2 &= 0. \end{aligned}$

Разработано программное обеспечение на языке Python 3, предназначенное для расчета сигналов ускорения, скорости и перемещения по заданным параметрам установки. В программе реализован алгоритм поиска значений

информативных параметров и их среднеквадратичных отклонений.

Полученные аналитические решения проверялись экспериментально. Начальные параметры математической модели задавались из табл. 1. Проводились испытания установки динамического контроля (рис. 1, б) на полиуретановом основании с известной жесткостью $k_2 = 50$ МН/м. Упруго-демпферный элемент состоял из трех полиуретановых пластин суммарной жесткостью $k_1 = 7$ МН/м. Груз падал с высоты $h = 0,5$ м. Рассчитанные временные зависимости ускорения штампа сравнивались с теоретическими по значениям коэффициента корреляции (рис. 3).

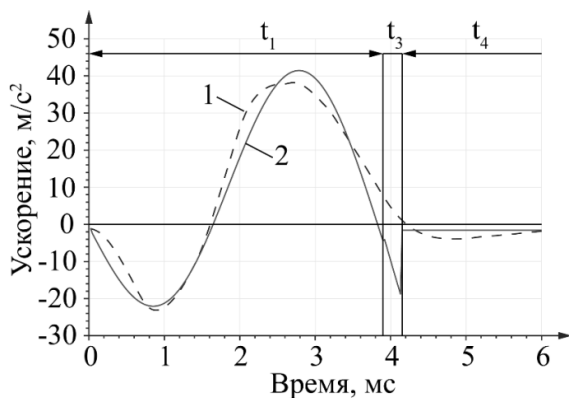


Рис. 3. График зависимости ускорения штампа от времени: 1 — экспериментальные данные, 2 — теоретические данные с линейным коэффициентом упругости и временные интервалы t_1 , t_3 , t_4 при жесткости упруго-демпферного элемента 7 МН/м и жесткости основания 50 МН/м

Fig. 3. Loading plate acceleration time dependence plot: 1 — experimental data, 2 — theoretical data with a linear elastic coefficient and time intervals t_1 , t_3 , t_4 at the elastic-damping element stiffness 7 MN/m and base stiffness 50 MN/m

Даже с учетом значительной нелинейности полиуретана получена достаточно высокая корреляция (более 0,92) экспериментальных сигналов акселерометра и результатов моделирования. Отклонения по амплитуде экстремальных значений экспериментального и теоретического ускорения составляют не более 20 %.

Временные зависимости ускорения, скорости и перемещения штампа описываются информативными параметрами, по которым оценивают жесткость контролируемого основания. На рис. 4 приведены графики рассчитанных зависимостей при одиночном ударном воздействии установкой со следующими характеристиками: $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 17$ кг, $k_1 = 7$ МН/м, $k_2 = 50$ МН/м, $h = 0,5$ м. Одновременно на графиках показаны амплитудные и временные параметры сигналов, которые соответствуют точкам локальных экс-

тремумов или пересечениям оси абсцисс. Амплитудные и временные параметры зависят от характеристик установки и жесткости основания, причем временные параметры определяются только значениями циклических частот ω_I , ω_{II} , ω_{III} .

Достоверная оценка жесткости по информативным параметрам сигналов возможна только при наличии между ними взаимоднозначной монотонной зависимости. Амплитудные параметры a_1 , a_2 , a_4 , a_5 и временные параметры $\tau_1 - \tau_3$, $\tau_5 - \tau_9$ монотонно зависят от жесткости основания на интервале от 10 до 70 МН/м (рис. 5). Параметры a_3 и τ_4 немонотонны при жесткости выше 40 МН/м из-за наличия в сигналах ускорения, скорости и перемещения расхождений по времени $\Delta\tau_{456}$, $\Delta\tau_{789}$ (рис. 4). Расхождение времен $\Delta\tau_{456}$ возникает, когда частота колебаний груза ниже частоты колебаний основания $\omega_I < \omega_{II}$. При этом за время удара груза штамп совершает сложное движение. Критерий расхождения времен $\Delta\tau_{789}$ получен численными методами: $\omega_I \leq \omega_{II} / 1,7$.

При $\omega_I < \omega_{II}$ точность определения жесткости основания по информативным параметрам снижается; например, параметр a_3 , определяющий ускорение штампа в момент его максимального смещения, немонотонно изменяется при увеличении жесткости и перестает быть информативным (рис. 5 а).

Таким образом, необходимым условием выбора характеристик установки является выполнение неравенства $\omega_I > \omega_{II}$ на всем интервале жесткостей. При этом груз и штамп совершают достаточно простое гармоническое движение на половине периода колебаний.

Чувствительность параметра к изменению жесткости характеризуется дифференциальным коэффициентом пропорциональности между ними. При оценке чувствительности реализованная в виде программы модель многократно выполнялась для каждого значения жесткости основания на интервале от 10 до 70 МН/м. При каждом расчете в исходные данные (массу основания, жесткость упругого элемента, наклон и высоту направляющей груза, погрешность измерения времени и ускорения) случайным образом вносили случайные отклонения от номинальных значений, имитирующие неопределенности этих параметров у реальной установки. По значениям рассчитанных параметров определялись средние квадратические отклонения результата измерения жесткости, характеризующие его случайную погрешность (рис. 6, табл. 4).

Состояние основания наилучшим образом оценивается по амплитудному параметру – значению максимального смещения штампа под нагрузкой a_4 , и временным параметрам: времени достижения штампа этого смещения τ_4 , τ_6

и длительности удара τ_7 , τ_8 , τ_9 (табл. 4). Среднее квадратическое отклонение погрешности по абсолютному значению не превышает 5 МН/м при использовании амплитудного параметра и 2 МН/м – временных параметров.

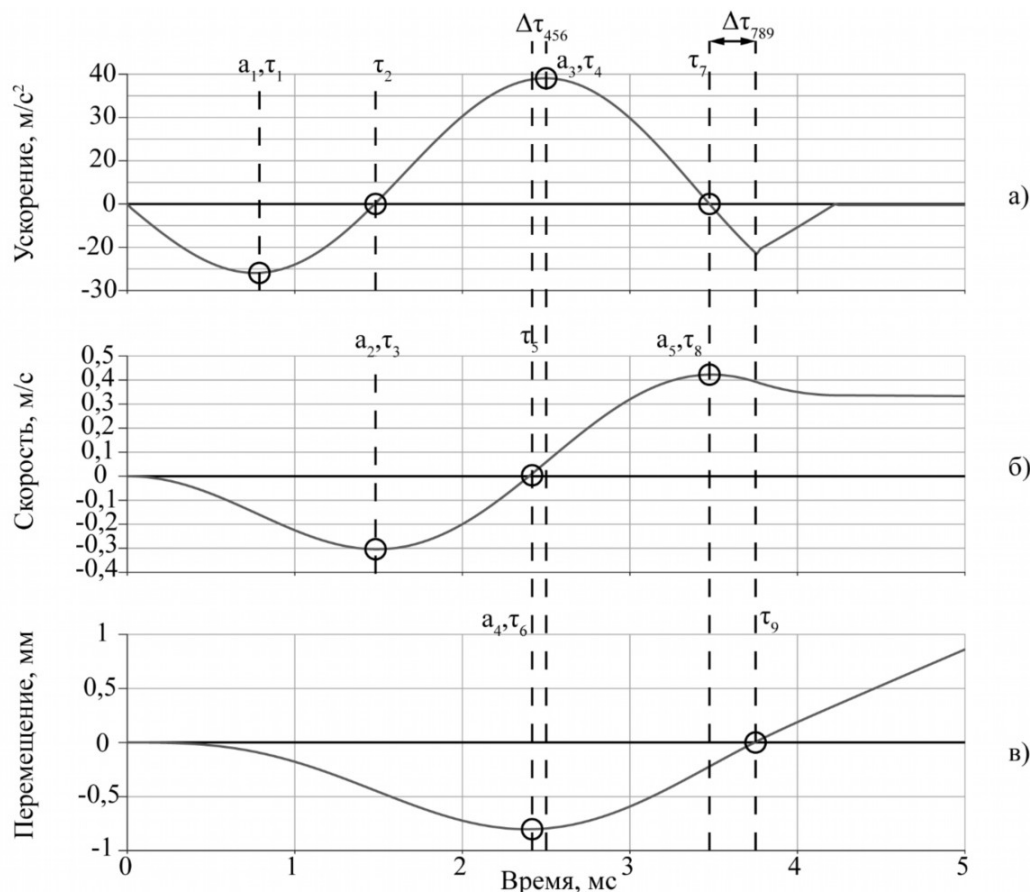


Рис. 4. Графики зависимости ускорения (а), скорости (б), перемещения (в) штампа m_2 от времени при упругом взаимодействии с грузом m_1 , информативные амплитудные ($a_1 - a_5$) и временные ($\tau_1 - \tau_9$) параметры

Fig. 4. Loading plate m_2 acceleration (a), velocity (b), displacement (c) time dependence plots during elastic interaction with falling weight m_1 , informative amplitude ($a_1 - a_5$) and time ($\tau_1 - \tau_9$) parameters

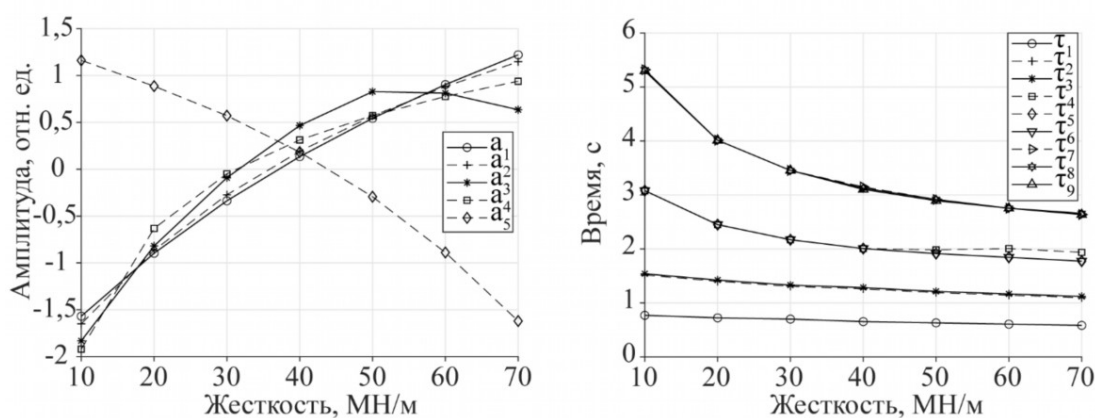


Рис. 5. Графики зависимости исследуемых амплитудных (а) и временных (б) параметров от жесткости основания k_2 при $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 15$ кг и жесткости $k_1 = 5$ МН/м

Fig. 5. Investigated amplitude (a) and time (b) parameters base stiffness dependence k_2 plots at $m_1 = 10$ kg, $m_2 = 15$ kg and stiffness $k_1 = 5$ MN/m

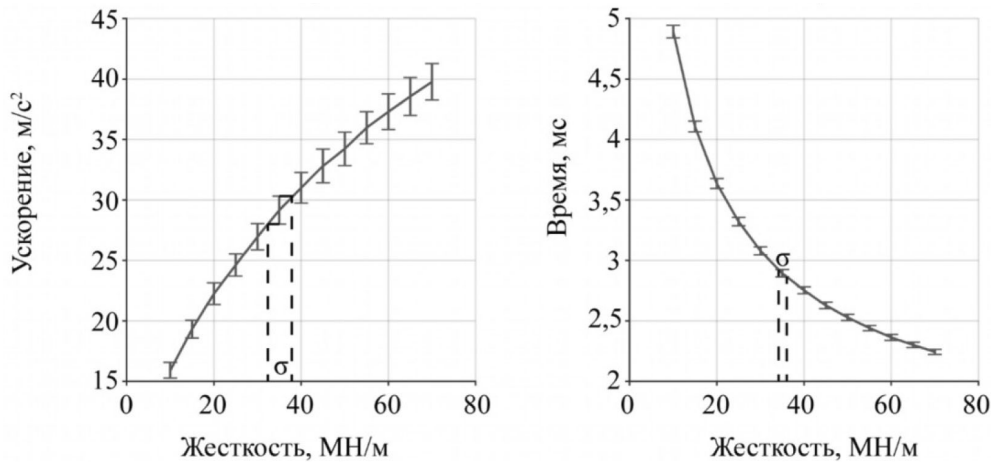


Рис. 6. Зависимость амплитудного параметра a_3 (а) и временного параметра τ_9 (б) от жесткости основания k_2 и среднеквадратические отклонения при $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 18 \pm 1,5$ кг, $k_1 = 40 \pm 0,008$ МН/м, $h = 0,5 \pm 0,025$ м, $\alpha = \pm 10^\circ$

Fig. 6. Amplitude parameter a_3 (a) and time parameter τ_9 (b) base stiffness k_2 dependence and standard deviation at $m_1 = 10$ kg, $m_2 = 18 \pm 1,5$ kg, $k_1 = 40 \pm 0,008$ MN/m, $h = 0,5 \pm 0,025$ m, $\alpha = \pm 10^\circ$

Таблица 4. Значения среднеквадратических отклонений σ информативных параметров сигналов для разных жесткостей контролируемого основания k_2

Table 4. Informative parameters standard deviation values σ for different controlled base stiffnesses k_2

Жесткость, МН/м	Средние квадратические отклонения, МН/м												
	Амплитудные				Временные								
	a_1	a_2	a_3	a_4	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_7	τ_8	τ_9
15	19	7	2	2	14	4	4	1	1	1	1	1	1
40	22	11	7	5	15	7	6	2	3	2	2	2	2
65	16	10	11	4	17	9	9	2	3	2	2	2	2

Статическое давление шпалы на балластный слой при воздействии железнодорожного подвижного состава при нормативной погонной нагрузке $F_k = 120$ кН и площади нижнего основания шпалы $S_s = 0,6$ м² составляет $P_0 = F_k / S_s = 2 \cdot 10^5$ Па. При испытаниях необходимо реализовать равное или большее давление, которое определяется выражением $P = k_2 \cdot a_4 / S$ и для исследуемой установки составило от $0,8 \cdot 10^6$ Па до $2 \cdot 10^6$ Па в диапазоне жесткости основания от 10 до 70 МН/м.

Основные выводы

Разработанная математическая модель установки для динамического контроля оснований описывает линейное упругое динамическое взаимодействие четырех тел и математически представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами, решения которых могут быть получены аналитически.

Проведены испытания экспериментальной установки динамического контроля на полиуретановом основании (толщиной 5 мм, жесткостью 50 МН/м) при различных значениях жест-

кости упруго-демпферного элемента 4, 7, 10, 20 МН/м. Результаты испытаний (временные зависимости ускорения, скорости и перемещения основания) адекватно описываются численными решениями модели с коэффициентом корреляции 0,92–0,93.

По результатам моделирования в широком спектре характеристик установки определены амплитудные и временные информативные параметры: экстремальные значения ускорения, скорости и перемещения и времена пересечения оси абсцисс. Показано, что степень информативности параметров существенно зависит от соотношения частот ω_I и ω_{II} в диапазоне изменения жесткости основания. Взаимно однозначное соответствие наблюдается только при соотношении частот $\omega_I > \omega_{II}$.

Установлены и проанализированы основные источники погрешности измерения жесткости основания: неопределенность высоты и угла наклона направляющей груза, жесткость упруго-демпферного элемента и обобщенная масса штампа, учитывающая инерцию контролируемого основания. Разработанные алгоритмы

и программное обеспечение позволяют выполнить контроль жесткости основания в диапазоне от 10 до 70 МН/м с погрешностью не более 2 МН/м или 7 % измеряемой величины, при этом наименьшие значения погрешности получены при использовании временных параметров сигналов.

Библиографические ссылки

1. Проблемы повышения осевых нагрузок и скоростей движения поездов на участках распространения слабых грунтов / И. В. Колос, Е. С. Свинцов, Г. М. Стоянович и др. // Бюллетень результатов научных исследований. 2017. № 4. С. 26–31.
2. Ашпиз Е. С. Подход к расчету показателей надежности элементов пути // Мир транспорта. 2011. Т. 9. № 5 (38). С. 34–41.
3. Абдурашитов А. Ю., Сычева А. В., Кузнецова Н. В. Варианты усиления конструкции железнодорожного пути при обращении поездов с повышенными осевыми нагрузками // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2020. Т. 16. № 16 (16). С. 35–42.
4. Ермоленко И. Ю., Морозов Д. В., Астахов Н. П. Влияние продольных нагрузок на безопасность движения при эксплуатации на горно-перевальных участках пути // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2 (82). С. 104–111. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_2_104.
5. Дружинина О. В., Гапеева А. С., Людаговская М. А. Анализ системы "железнодорожный путь-подвижной состав" на основе методов оценки влияния поездных нагрузок на техническое состояние пути // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2019. № 6. С. 3–9.
6. Абдурашитов Ю. А., Сычев В. П., Абдурашитов А. Ю. Оценка влияния воздействия подвижного состава с различной нагрузкой на ось на железнодорожный путь с различной толщиной балластного слоя и элементами верхнего строения пути на основе моделирования // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2018. Т. 12, № 12 (12). С. 58–64.
7. Исследования динамических сил в системе колесо-рельс в процессе движения грузового вагона / С. А. Бехер, А. О. Коломеец, Л. Н. Степанова и др. // Контроль. Диагностика. 2016. № 7. С. 68–72. DOI: 10.14489/td.2016.07.pp.068-072.
8. Мильников М. М. Влияние параметров плана на устойчивость балластной призмы железнодорожного пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1 (69). С. 156–164. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).156-164.
9. Инженерные решения по повышению устойчивости верхнего строения железнодорожного пути / В. Л. Шаповалов, В. А. Явна, К. М. Ермолов и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4 (68). С. 119–135.
10. Yunlong Guo, Valeri Marikine, Guoqing Jing. (2022). *Railway ballast* [Rail Infrastructure Resilience: A Best-Practices Handbook]. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-821042-0.00021-6.
11. Manakov A., Abramov A., Ilinykh A. (2021). *Result assessment of the quality railway track padding* [Lecture Notes in Civil Engineering], vol. 130, pp. 193–203. DOI:10.1007/978-981-33-6208-6_20.
12. Косенко С. А., Мишин Е. А. Динамический стабилизатор пути в технологических цепочках по ремонту пути // Вестник современных исследований. 2018. № 12.1 (27). С. 569–573.
13. Попович М. В., Волковойнов Б. Г., Атаманюк А. В. Обеспечение стабильности железнодорожного пути путевыми машинами после глубокой очистки балластного слоя // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 6 (19). С. 48–51.
14. Коваленко Н. И. Особенности обеспечения межремонтного цикла эксплуатации пути трехкратной продолжительности // Наука и технологии железных дорог. 2020. Т. 4, № 4 (16). С. 96–103.
15. Повышение качества работ по виброуплотнению балласта / М. А. Буракова, И. В. Колесников, О. И. Мелешко и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 12. С. 545–549.
16. Скутин А. И., Мильников М. М. Разработка модели возникновения поперечных сил в балластном слое под воздействием внешних нагрузок // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. №4(68). С. 220–230. DOI:10.26731/1813-9108.2020.4(68).220-230.
17. Сулов О. А., Федорова В. И. Перспективные подходы к прогнозному моделированию деградиционных процессов элементов верхнего строения пути и их применение при создании цифровых двойников // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80. № 5. С. 251–259. DOI:10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259.
18. Сулов О. А. Прогнозная модель расчета накопления неисправностей элементов верхнего строения пути и геометрии рельсовой колеи // Наука и образование транспорта. 2021. № 2. С. 245–250.
19. Сазонова С. А., Румянцев С. Д. Применение экспресс-методов для определения характеристик насыпных грунтов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2017. Т. 8, № 3. С. 113–120. DOI:10.15593/2224-9826/2017.3.13.
20. Сазонова С. А., Пономарев А. Б. Некоторые предпосылки применения динамического плотнотера к определению модуля деформации грунта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2018. Т. 9, № 3. С. 28–35. DOI:10.15593/2224-9826/2018.3.03.
21. Duddu S.R., Chennarapu H. (2022). *Quality control of compaction with lightweight deflectometer (LWD) device: a state-of-art* [International Journal of Geo-Engineering], vol. 13, iss. 1, no. 6. DOI: 10.1186/s40703-021-00171-2.

22. Sysyn M., Gerber U., Liu J., et. al. (2022). *Studying the Relation of the Residual Stresses in the Ballast Layer to the Elastic Wave Propagation* [Transportation Infrastructure Geotechnology]. DOI: 10.1007/s40515-022-00249-z.

23. Březina Ilja, Grošek Jiří, Janků Michal. (2017). *Measurement of Deflections and Determination of Jointed Plain Concrete Pavements Stiffness by Falling Weight Deflectometer* [Procedia Engineering], vol. 190, pp. 162-169. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.322.

24. Kuttah D. (2021). *Determining the resilient modulus of sandy subgrade using cyclic light weight deflectometer test* [Transportation Geotechnics], vol. 27, no. 100482. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100482.

References

1. Kolos I.V., Svyntsov Y.S., Stoyanovich G.M., et. al. [The issues of axle loading increase and train speed at light soil railroad sections]. Bulletin of scientific research result. 2017. No. 4. Pp. 26-31 (in Russ.).

2. Ashpiz E.S. [An approach to computation of track elements reliability indices]. World of transport and transportation. 2011. Vol. 9, no. 5. Pp. 34-41 (in Russ.).

3. Abdurashitov A.Y., Sycheva A.V., Kuznetsova N.V. [Options for structural reinforcement the railway track when handling trains with increased axial loads]. *Vnedrenie sovremennykh konstruksiy i peredovykh tekhnologiy v putevoe khozyaystvo*. 2020. Vol. 16, no. 16. Pp. 35-42 (in Russ.).

4. Ermolenko I.Y., Morozov D.V., Astashkov N.P. [Influence of longitudinal loads on traffic safety when operating on mountain passway sections]. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2021. No. 2, pp. 104-111. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_2_104 (in Russ.).

5. Druzhinina O.V., Gapeeva A.S., Lyudagovskaya M.A. [Analysis of the "railway track-rolling stock" system on the basis of methods for assessment of the impact of train loads on technical condition of track]. *Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*. 2019. No. 6. Pp. 3-9 (in Russ.).

6. Abdurashitov Y.A., Sychev V.P., Abdurashitov A.Y. [Estimation of the influence of the impact of rolling stock with different axle loads on the railway track with different thickness of the ballast layer and elements of the upper track structure on the basis of modeling]. *Vnedrenie sovremennykh konstruksiy i peredovykh tekhnologiy v putevoe khozyaystvo*. 2018. Vol. 12, no. 12. Pp. 58-64. (in Russ.).

7. Beher S.A., Kolomeetz A.O., Stepanova L.N., et. al. [Dynamic force in wheel-rail system investigation during freight car movement process]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2016. No. 7. Pp. 68-72. DOI: 10.14489/td.2016.07.pp.068-072 (in Russ.).

8. Mylnikov M.M. [The influence of parameters of the plan on the railways ballast section stability]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2021. No. 1, pp. 156-164. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69). 156-164 (in Russ.).

9. Shapovalov V.L., Yavna V.A., Ermolov K.M., et. al. [Engineering solutions to improve the stability of the railway upper structure]. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2017. No. 4. Pp. 119-135 (in Russ.).

10. Yunlong Guo, Valeri Marikine, Guoqing Jing. (2022). *Railway ballast* [Rail Infrastructure Resilience: A Best-Practices Handbook]. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-821042-0.00021-6.

11. Manakov A., Abramov A., Ilinykh A. (2021). *Result assessment of the quality railway track padding* [Lecture Notes in Civil Engineering], vol. 130, pp. 193-203. DOI:10.1007/978-981-33-6208-6_20.

12. Kosenko S.A., Mishin E.A. [Dynamic track stabilizer in technological chains for track repair]. *Vestnik sovremennykh Issledovaniy*. 2018. No. 12.1. Pp. 569-573 (in Russ.).

13. Popovitch M.V., Volkovoyov B.G., Atamanyuk A.V. [Higher stability of railway track by track cleaning machines after deep cleaning of ballast layer]. *Transport rossyskoy federatsii*. 2008. No. 6. Pp. 48-51 (in Russ.).

14. Kovalenko N.I. [Features of providing an inter-repair cycle of operation of a three-fold durations]. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog*. 2020. Vol. 4, no. 4. Pp. 96-103 (in Russ.).

15. Burakova M.A., Kolesnikov I.V., Meleshko O.I., et. al. [Improving the quality of workvibrocompaction ballast]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*. 2017. No. 12. Pp. 545-549 (in Russ.).

16. Skutin A.I., Mylnikov M.M. [Development of the model of transverse forces in the ballast layer under the influence of external loads]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2020. No. 4. Pp. 220-230. DOI:10.26731/1813-9108.2020.4(68).220-230 (in Russ.).

17. Suslov O.A., Fedorova V.I. [Prospective approaches to predictive modeling of degradation processes of track superstructure elements and its application in creating digital twins]. *Russian railway science journal*. 2021. Vol. 80, no. 5. Pp. 251-259. DOI:10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259 (in Russ.).

18. Suslov O.A. [Predictive model for calculating the accumulation of faults in the elements of the superstructure of the track and the geometry of the rail gauge]. *Nauka i obrazovanie transport*. 2021. No. 2. Pp. 245-250 (in Russ.).

19. Sazonova S.A., Rumiantsev S.D. [Application of express methods for determination of characteristics of fill soils]. *Vestnik permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2017. Vol. 8, no. 3. Pp. 113-120. DOI:10.15593/2224-9826/2017.3.13 (in Russ.).

20. Sazonova S.A., Ponomaryov A.B. [Some premises of the application of dynamic densimeter for the determination of soil deformation modulus]. *Vestnik permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo I arkhitektura*. 2018. Vol. 9, no. 3. Pp. 28-35. DOI:10.15593/2224-9826/2018.3.03 (in Russ.).

21. Duddu S.R., Chennarapu H. [Quality control of compaction with lightweight deflectometer (LWD) device: a state-of-art]. *International Journal of Geo-*

Engineering, 2022. Vol. 13, iss. 1, no. 6. DOI: 10.1186/s40703-021-00171-2.

22. Sysyn M., Gerber U., Liu J., et. al. (2022). *Studying the Relation of the Residual Stresses in the Ballast Layer to the Elastic Wave Propagation* [Transportation Infrastructure Geotechnology]. DOI: 10.1007/s40515-022-00249-z.

23. Kuttah D. (2021). *Determining the resilient modulus of sandy subgrade using cyclic light weight*

deflectometer test [Transportation Geotechnics], vol. 27, no. 100482. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100482.

24. Březina Ilja, Grošek Jiří, Janků Michal. (2017). *Measurement of Deflections and Determination of Jointed Plain Concrete Pavements Stiffness by Falling Weight Deflectometer* [Procedia Engineering], vol. 190, pp. 162-169. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.322.

Railway Track Ballast Layer Stiffness Dynamic Control Elastic-Linear Model

V. S. Vyplaven, Postgraduate Student, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

S. A. Bekher, DSc in Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

The paper presents the results of mathematical modeling of the shock-elastic interaction process in the dynamic densimeter for dynamic control of the ballast layer of the railroad track. The installation is used to determine the compaction level and to estimate the carrying capacity of the ballast layer during the inter-repair period of tampering, renewal and track stabilization operations. The effect of exposure on the controlled elastic base is considered within a four-element mathematical model. The time intervals of interaction between the model elements are revealed. Each time interval is described by a system of second-order differential equations, for which analytical solutions were obtained.

The model verification was evaluated during tests with a dynamic control unit consisting of a loading plate, a falling weight, and an elastic-damping element located between the weight and the loading plate. Tests were conducted on a polyurethane surface with known stiffness. In the process, signals of vertical acceleration of the loading plate when the load strikes the elastic-damping element were recorded. The acceleration was recorded by an accelerometer sensor with a sampling rate of 42 kHz being connected to a computer with specialized software. The acceleration data were obtained for different values of the stiffness of the elastic-damping element in the installation. To evaluate the simulation results, the obtained signals were compared with the theoretical model by the correlation method.

According to the results of modeling, the main amplitude and time informative parameters used to determine the degree of compaction of the base layer have been singled out. The dependence of the values of informative parameters on the installation parameters (load weight, loading plate weight, stiffness of an elastic-damping element) in conditions of uncertainty was studied. The obtained dependences are used to estimate the error of each parameter in calculating the rigidity of the base. Informative parameters have been determined that allow you to determine the stiffness of the base with an error of not more than 7%. A method for selecting the optimal characteristics of the unit design and informative parameters to ensure minimum errors has been developed.

Keywords: railway track, ballast, elasticity, dynamic densimeter, nondestructive testing, mathematical model, sub-rail base.

Получено: 05.12.22

Образец цитирования

Выплавень В. С., Бехер С. А. Упруго-линейная модель динамического контроля жесткости балластного слоя железнодорожного пути // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 4–13. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-4-13.

For Citation

Vyplaven' V.S., Bekher S.A. [Railway track ballast layer stiffness dynamic control elastic-linear model]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 4-13 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-4-13.