

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 624.21.042.8

*КАРТОПОЛЬЦЕВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук,
профессор,*

kaf_most@mail.ru

КАРТОПОЛЬЦЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,

kaf_most@mail.ru

КОЛМАКОВ БОРИС ДМИТРИЕВИЧ, аспирант,

boriskolmakov@mail.ru

ЩЕРБИНИН АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ, студент,

alek1192@mail.ru

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ С УЧЕТОМ ДЕФЕКТОВ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ

Рассмотрены вопросы изменения динамических характеристик пролетных строений сталежелезобетонных мостов с учетом дефектов проезжей части. На основе реальных расчетных схем выявлены и определены основные динамические характеристики пролетных строений в условиях резонансного состояния. Полученные математические зависимости, на основе анализа параметрического и комбинационного резонансов, дают основу формирования условий для автоматического регулирования динамических характеристик.

Ключевые слова: сталежелезобетонный мост; балки; дефекты; динамическая подвижная нагрузка; колебательный процесс.

VLADIMIR M. KARTOPOLTSEV, DSc, Professor,

kaf_most@mail.ru

ANDREI V. KARTOPOLTSEV, PhD, A/Professor,

kaf_most@mail.ru

BORIS D. KOLMAKOV, Research Assistant,

boriskolmakov@mail.ru

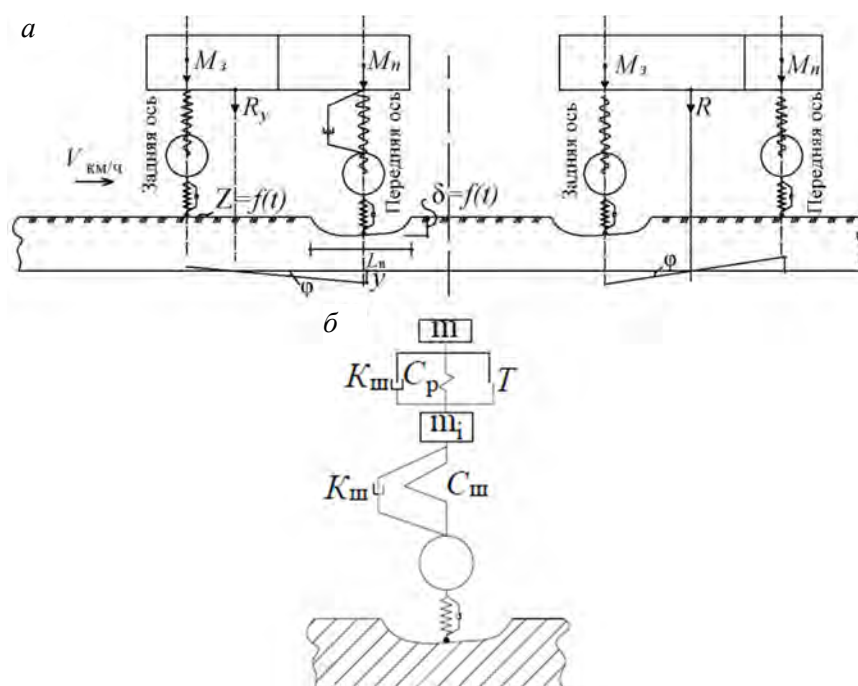
ALEKSANDR N. SHCHERBININ, Student,
alek1192@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

DETERMINATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF COMPOSITE BRIDGES WITH PAVEMENT DEFECTS USING RESONANCE METHODS

The article discusses the changes in the dynamic properties of composite bridge spans having pavement defects. The design diagrams allow identifying basic dynamic properties of bridge spans in resonance conditions. The mathematical dependences obtained as a result of the analysis of parametric and combination resonances, provide the formation of conditions for the automated control for the dynamic properties of bridge spans.

Keywords: composite bridge; beams; defects; live load; vibration process.

Изучение взаимодействия динамической подвижной нагрузки с пролетным строением мостов и определение динамических характеристик в системе «автомобиль + пролетное строение» представляют сложную и особо актуальную задачу. Связано это, прежде всего, с большим спектром факторов и условий, такими как модернизированная модель взаимодействия временной динамической подвижной нагрузки с пролетным строением с учетом дефектов в виде выбоин на проезжей части (рисунок), квазигармоничность нагружения пролетных строений временной нагрузкой, взаимосвязью между квазистатическим режимом работы сооружения и его напряженно-деформированным состоянием.



Виды поддресоренных нагрузок (а) и их взаимодействие с дефектами проезжей части (б)

Параметры, влияющие на оценку колебательного процесса пролетных строений мостов с учетом дефектов, подробно изложены в работе [6].

Многолетняя эксплуатация и техническая диагностика мостовых сооружений свидетельствуют о том, что в формировании предельного состояния конструкции от динамического воздействия особую роль отводят показателям M_g , $V_{кр}$, ζ , $\frac{\bar{\omega}}{\omega}$, где M_g – дополнительный динамический изгибающий момент от воздействия временной нагрузки с учетом сил инерции и диссипации в условиях взаимодействия колеса автомобиля с дефектом на проезжей части (в частности, выбоины); $V_{кр}$ – критическая скорость, при которой эксплуатационная прочность сооружения в рамках управляемых пластических деформаций $\xi_{пл} = 0,0016–0,0020$ приближается к предельной; ζ – параметр диссипации; $\frac{\bar{\omega}}{\omega}$ – отношение вынужденной (круговой) частоты к частоте собственных колебаний.

Данное обстоятельство указывает на необходимость рассмотрения изменений в определении динамических характеристик металлических и железобетонных мостов [1], что подтверждается исследованиями Н.И. Новожиловой и В.А. Быстрова [2]. В связи с этим в условиях эксплуатации мостовых сооружений тяжелой и сверхтяжелой нагрузкой вопрос их динамического воздействия на пролетное строение, усугубляемого влиянием дефектов в виде выбоин на проезжей части, приобретает особую актуальность. Инерционные силы системы «автомобиль + пролетное строение» от воздействия дефектов в виде выбоин на проезжей части значительно изменяют напряженно-деформированное состояние несущих балок пролетных строений моста.

Дифференциальное уравнение вертикальных колебаний пролетных строений автодорожных мостов, рассматриваемое с учетом дефектов проезжей части, можно представить по аналогии с исследованиями, отраженными в работах [3–6] в виде

$$m_0 \frac{d^2 y(x, t)}{dt^2} + EI_z \left(1 + v_0 \frac{d}{dt} \right) \frac{d^4 y(x, t)}{dx^4} = \sum_1^n R_i \cdot f(V, t), \quad (1)$$

где $y(x, t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + \omega \int_{t_1}^{t_2} f(t) \cdot \sin \omega(t_1 - t_2)$; C_1 , C_2 – параметры де-

фекта проезжей части; R_i – параметр динамического воздействия; $m_0 = \frac{M}{m \cdot L}$ – погонная масса балки; EI_z – изгибная жесткость балки; v_0 – коэффициент диссипации колебательного процесса; t – время движения временной нагрузки по пролетному строению; t_1 , t_2 – время въезда и выезда с выбоины; $f(V, t)$ – функция скорости движения транспорта и временная функция. Представленный дефект проезжей части (например, в виде выбоины) (рисунок) параметр $y(x, t)$ достаточно точно характеризуется выражением [6]

$$y(x, t) = \frac{h_b}{2} \left[1 - \cos \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\ell_b} \right] \text{ при } V = \text{const}, \quad (2)$$

где h_b – глубина выбоины; ℓ_b – длина выбоины.

При часто расположенных по длине пролета выбоинах необходимо ввести коэффициент приведения для неровностей.

При $P_i = P_0^i (1 + \mu_g)$, где P_0^i – величина нормативной временной нагрузки, уравнение (1) приобретает вид

$$m_0 \frac{d^2 y(x, t)}{dt^2} + EI_z \left(1 + \nu_0 \frac{d}{dt} \right) \frac{d^4 y(x, t)}{dx^4} = P_0^i (1 + \mu_g) C_1. \quad (3)$$

При $V = \text{const}$ и $C_1 = h + \frac{(1 + \mu_g) P_0^i \cdot \ell^3}{48 EI_z}$ формула (1) имеет вид

$$m_0 \frac{d^2 y(x, t)}{dt^2} + EI_z \left(1 + \nu_0 \frac{d}{dt} \right) \frac{d^4 y(x, t)}{dx^4} = P_0^i (1 + \mu_g) \left(h + \frac{(1 + \mu_g) P_0^i \cdot \ell^3}{48 EI_z} \right), \quad (4)$$

где h – высота стальной части балки.

Однако, как видно из формул (1) и (3), важным фактором в оценке изменения динамических характеристик системы «автомобиль + пролетное строение» является скорость, которая в первом случае $V = V(t)$, в другом случае решение уравнения (3) существует при $V = \text{const}$.

Данное обстоятельство подтверждается результатом исследований А.Г. Барченкова, В.С. Сафронова и другими, анализирующими эффект въезда в выбоину на проезжей части одного из колес транспортного средства [5]. Было выявлено также, что и коэффициент затухания колебаний является функцией скорости во времени в рамках определенной гармонике колебаний. Например, при $V \approx 40$ км/ч и первой гармонике колебаний коэффициент затухания колебаний $\gamma \approx 0,34$, а частота колебаний системы находится в пределах $\omega = 15\text{--}16$ с⁻¹.

Анализ структурного содержания и критериев, заложенных в определение динамического коэффициента $(1 + \mu_g)$, показывает значительное влияние параметра скорости, который в условиях резонансного или близкого к резонансному состоянию значительно влияет на изменение динамических характеристик и напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных мостов.

При гармонических колебаниях системы «автомобиль + пролетное строение» рассмотрим три случая:

- отсутствие резонансного состояния;
- состояние параметрического резонанса;
- комбинационный резонанс.

В первом случае частота колебаний системы определится из выражения

$$\bar{\omega}^0 = \pi \frac{V_{кр}}{L}, \quad (5)$$

где $V_{кр} = \frac{\bar{\omega}^0 L \ell_b}{\pi (2L + \ell_b)}$; L – длина пролета моста; ℓ_b – расстояние между выбоинами на проезжей части; $\bar{\omega}^0$ – частота вынужденных колебаний системы.

Из формулы (5) практически не удастся установить частотный и амплитудный характеры колебаний и деформирования системы «автомобиль + пролетное строение», в котором скорость $V = V_{кр}$. Однако имеются сведения [5], что частота, вычисленная по формуле (5), соответствует деформированному состоянию балки, у которой $y_i = f_{max}$. Тогда частота вынужденных колебаний системы определяется из выражения

$$\bar{\omega}^0 = \frac{m^2 \pi k_0}{2L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \beta, \quad (6)$$

где $m = 1$; $\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega_1} \cong 0,82$; m – погонный вес сталежелезобетонной балки моста; ρ – удельная плотность материала балок; k_0 – коэффициент динамической жесткости системы.

Таким образом, в случае гармонических колебаний какой-либо корреляционной зависимости между динамическими характеристиками системы, например, ω^0 , A , T , и $V_{кр}$, установить практически не удастся, за исключением мостов с малыми пролетами, где ℓ_a – без автомобиля $\approx L$; T – период гармонических колебаний.

Противоречивость данных обстоятельств изложена и подтверждена в работе [6]. В случае, когда $\ell_a \leq L$, т. е. для временной подвижной нагрузки намного меньшей длины пролета (случай больших и средних пролетов), формулы А.В. Болотина для $V_{кр}$ представляются в виде

$$\left. \begin{aligned} V_{кр} &= \frac{\omega_i^0 L}{\pi \sqrt{1 + 2\mu}}, \\ \omega_i^0 &= K_i \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{m \cdot L^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где ω_i^0 – частота i -й функции колебаний системы; M – масса временной подвижной нагрузки; K_i – коэффициент предельного состояния динамической работы системы, характеризующий вид резонанса.

Для определения K_i рассмотрим два вида резонанса: параметрический и комбинационный.

Для параметрического резонанса рассматриваются следующие сочетания:

$$K_i = K_{\Pi} = \begin{cases} \omega + \omega_1, \\ \bar{\omega} + \omega_2, \\ \bar{\omega} + \omega_1, \end{cases} \quad (8)$$

где K_{Π} – коэффициент предельного состояния динамической работы системы при параметрическом резонансе; ω – частота собственных колебаний автомобиля; $\bar{\omega}$ – частота вынужденных колебаний автомобиля; ω_1 – частота соб-

ственных колебаний сталежелезобетонной балки; ω_2 – частота вынужденных колебаний сталежелезобетонной балки.

В этом случае критическая скорость движения транспорта, соответствующая состоянию параметрического резонанса, составит

$$V_{кр}^{\Pi} = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{\pi^4 \cdot E_s I_{stb}}{M_0 \cdot L^3} + \frac{K_{\Pi}}{M_0}}, \quad (9)$$

где $E_s I_{stb}$ – жесткость сталежелезобетонной балки; M_0 – параметр движения мультипликаторов [7].

Критическая скорость $V_{кр}^{\Pi}$ соответствует частотной характеристике вынужденных колебаний системы, равной

$$\bar{\omega}^0 = K_{\Pi} \cdot \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}. \quad (10)$$

В случае комбинационного резонансного состояния и сочетания (8) формулы (9) и (10) будут иметь вид

$$V_{кр}^{\Pi} = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{\pi^4 \cdot E_s I_{stb}}{M_0 \cdot L^3} + \frac{K_K}{M_0}}, \quad (11)$$

где $K_K = K_{\Pi} \left(1 + \frac{\sqrt{\beta \cdot \gamma^2}}{1 + \gamma} \right)$ – коэффициент предельного состояния динамической работы системы при комбинационном резонансе; γ – коэффициент диссипации энергии колебаний, принимаемый из [6].

Таким образом, используя равенства (8) и формулы (9) – (11), можно методом подбора определить критические параметры динамического процесса, происходящего в сталежелезобетонных балках мостов, и оценить их критические характеристики с учетом необходимости автоматического регулирования.

Однако ретроспективным анализом формирования и продвижения резонансных состояний в определении и изменении динамических характеристик мостовых балок на основе выражений (6), (7), (10) создаются достаточные условия альтернативного или затухающего резонансного состояния динамического процесса системы «автомобиль + пролетное строение», когда частотные и амплитудные характеристики изменяются не в зависимости от форм колебаний, а по законам изменения масс с учетом их нагруженности.

Достаточно убедительное обоснование данному обстоятельству отражено в классическом определении частоты колебаний методами Рэлея и Ритца:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \sqrt{\frac{EI}{m}} - \text{по Рэлею,} \\ \omega &= \frac{1}{2\pi} \frac{a_i^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} - \text{по Ритцу,} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где m – погонная масса системы, равная $\frac{\sum P}{g}$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; a_i – коэффициент, зависящий от статической схемы сооружения: $a_i = 3,14$ – $3,9$ – для однопролетных балок; $a_i = 3,14$ – $3,39$ – для многопролетных балок; EI – жесткость системы, складывающаяся из жесткости подвесок автомобиля и жесткости балки пролетного строения.

Известно, что в резонансных режимах трудно найти максимальную частоту ($\omega_{\max}$), тем более с учетом диссипации или затухания [8].

Доступным и достаточным методом определения частотных и амплитудных характеристик в формуле (12) является способ, построенный на зависимости между частотой колебаний и жесткостями в системе [9]. Тогда частоту вынужденных колебаний автомобиля в системе в общем виде с учетом параметра затухания запишем в виде

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{k_g}{m_g}}. \quad (13)$$

Аналогично частота собственных колебаний балок пролетного строения в системе будет

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{48E_s I_{stb} \cdot m}{L^3}}, \quad (14)$$

где $m_g = \frac{P_{вр}}{g}$; $m = \frac{P_{пост}^{I+II}}{g}$; $P_{вр}$ – вес временной подвижной нагрузки; k_g – коэффициент, характеризующий динамическую жесткость балок.

Характеризуя резонанс соотношением $\bar{\omega} \approx 2/3\omega_1$, определим коэффициент диссипации системы в режиме затухания:

– для вынужденных колебаний автомобиля

$$\beta^2 = \bar{\omega}^2 \left(\frac{y_{ст}}{g} \right); \quad (15)$$

– для вынужденных колебаний системы

$$\beta^2 = \frac{\bar{\omega}^2}{\omega_1^2} = \frac{\bar{\omega}^2 \cdot y_{ст}}{P_{вр}}. \quad (16)$$

При $\beta = 0,27$ вынужденные колебания автомобиля $\bar{\omega}$ соответствуют жесткости k_g , равной

$$k_g = 0,4 \cdot E_s I_{stb} \cdot \bar{\omega}. \quad (17)$$

В свою очередь, частота $\bar{\omega}$ соответствует частоте собственных колебаний ω_1 , равной

$$\omega_1 = \frac{1,5\pi V_{кр} (2L + P_{вр})}{L \cdot \ell_B}. \quad (18)$$

Таким образом, в состоянии затухающего резонанса критическая скорость автотранспорта будет равна

$$V_{кр} = \frac{\omega_1 L \ell_b}{1,5\pi(2L + \ell_b)}. \quad (19)$$

Для определения $\bar{\omega}$ нами получена следующая зависимость:

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{(0,20P_{вр} + 2)y_{ст} \pm \sqrt{D}}{0,20y_{ст}^2}}, \quad (20)$$

где $D = 0,041P_{вр}^2 \cdot y_{ст} + (0,81 - 1,22y_{ст})P_{вр} + 4y_{ст}$; $y_{ст}$ – предельный статический прогиб сталежелезобетонной балки.

После соответствующих преобразований формула (20) приобретает вид

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{0,102y_{ст} + 0,20P_{вр} + 2 \pm \sqrt{D}}{0,204}}. \quad (21)$$

Используя состояние затухающего резонанса, имеем возможность получить непосредственно значения амплитудно-частотных характеристик работы пролетного строения в системе «автомобиль + пролетное строение» при возможной критической скорости движения транспорта с учетом дефектов на проезжей части. Это способствует внедрению процесса автоматического регулирования динамических характеристик во время длительной эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кириллов, В.С. Эксплуатация и реконструкция мостов и труб на автомобильных дорогах / В.С. Кириллов. – М: Транспорт, 1971. – 196 с.
2. Новожилова, Н.И. Прогнозирование надежности конструкций стальных и сталежелезобетонных мостов / Н.И. Новожилова, В.А. Быстров, В.Л. Шайкевич. – Л. : ЛИСИ, 1988. – 96 с.
3. Будковой, А.Н. Нестационарные колебания балочных систем при переходных режимах воздействия подвижной нагрузки : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 2014. – 20 с.
4. Ефимов, П.П. К вопросу о динамических возмущениях, вызванных движением автомобиля по неровному покрытию проезжей части мостов. Теоретические и экспериментальные исследования мостов и строительных конструкций / П.П. Ефимов. – Омск : СибАДИ., 1970. – С. 65–73.
5. Барченков, А.Г. Применение корреляционной теории для динамических расчетов мостов / А.Г. Барченков, А.Н. Котуков, В.С. Сафронов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1970. – № 4. – С. 43–48.
6. Картопольцев, В.М. Влияние дефектов проезжей части на изменение динамических характеристик пролетных строений мостов / В.М. Картопольцев, А.В. Картопольцев, Б.Д. Колмаков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 6. – С. 156–164.
7. Кадисов, Г.М. К динамике пролетных строений мостов / Г.М. Кадисов // Теоретические и экспериментальные исследования мостов. – Новосибирск, 1978. – С. 43–52.
8. Клаф, Р. Динамика сооружений / Р. Клаф, Дж. Пензиен. – М. : Стройиздат, 1979. – 320 с.

REFERENCES

1. Kirillov V.S. Ekspluatatsiya i rekonstruktsiya mostov i trub na avtomobil'nykh dorogakh [Operation and reconstruction of road bridges and pipes]. Moscow : Transport Publ., 1971, 196 p. (rus)

2. Novozhilova N.I. Bystrov V.A., Shaikevich V.L. Prognozirovaniye nadezhnosti konstrukttsii stal'nykh i stalezhelezobetonnykh mostov [Prediction of reliability of steel and composite bridges]. Leningrad : Leningrad Institute of Civil Engineering Publ., 1988. 96 p. (rus)
3. Budkovo A.N. Nestatsionarnye kolebaniya balochnykh sistem pri perekhodnykh rezhimakh vozdviizviya podvizhnoi nagruzki: avtoref. dis. kand. tekhn. Nauk [Non-stationary vibrations of beam systems under transient live loads. PhD Abstract]. Voronezh, 2014. 20 p. (rus)
4. Efimov P.P. K voprosu o dinamicheskikh vozmushcheniyakh, vyzvannykh dvizheniem avtomobilya po nerovnomu pokrytiyu proezzhei chasti mostov. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya mostov i stroitel'nykh konstrukttsii [Dynamic excitations induced by vehicle movement on defective pavement of the bridge]. Omsk : SibADI Publ., 1970. Pp. 65–73. (rus)
5. Barchenkov A.G., Kotukov A.N., Safronov V.S. Primenenie korrelyatsionnoi teorii dlya dinamicheskikh raschetov mostov [Correlation theory for dynamic analysis of bridges]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 1970. No. 4. Pp. 43–48. (rus)
6. Kartopol'tsev V.M., Kartopol'tsev A.V., Kolmakov B.D. Vliyanie defektov proezzhei chasti na izmenenie dinamicheskikh kharakteristik proletnykh stroenii mostov [Effect of trafficway defects on dynamic properties of bridge spans]. *Vestnik TSUAB*. 2015. No. 6. Pp. 156–164. (rus)
7. Kadisov G.M. K dinamike proletnykh stroenii mostov. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya mostov [Dynamics of bridge spans. Theoretical and experimental bridge investigations]. Novosibirsk, 1978. Pp. 43–52 (rus)
8. Clough R.W., Penzien J. Dinamika sooruzhenii [Dynamics of structures.]. Stroyizdat Publ., 1979. 320 p. (transl. from Engl).