

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624. 21.159.2

Л. А. ВАСИЛЬЧУК^{1*}, А. Н. ЯШНОВ²

^{1*} СибНИИ мостов, отдел Диагностики и мониторинга мостов, Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191/3, Новосибирск, Россия, 630049, тел. +7 (913) 205 29 54, эл. почта vasilchuck97@mail.ru, ORCID 0000-0001-6332-4211

² Кафедра «Мосты», Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, Новосибирск, Россия, 630049, тел. +7 (903) 901 64 01, эл. почта yan@stu.ru, ORCID 0000-0001-7435-3376

ДИАГНОСТИКА ПОДМЫВОВ ОПОР МОСТОВ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Цель. С целью обоснования возможности своевременного обнаружения подмывов опор путем фиксации и анализа изменений динамических параметров конструкций авторами были выполнены расчетные и экспериментальные исследования зависимости собственных частот колебаний опор от условий взаимодействия с грунтовым основанием. **Методика.** Для достижения поставленной цели был проанализирован опыт проведения мониторинга технического состояния конструкций, в том числе и по динамическим параметрам. Определены динамические характеристики опор, которые могут служить индикатором для выявления подмывов. Проведены численные и натурные эксперименты для выявления зависимости динамических параметров опоры от степени развития местного размыва. **Результаты.** Выделен параметр – частота свободных колебаний, который подвержен существенным изменениям при изменении условий взаимодействия опоры с грунтовым основанием. По результатам расчетов выявлены зависимости собственной частоты колебаний от степени подмыва для опор на свайном фундаменте и на фундаменте мелкого заложения. Опытным путем подтверждена возможность выявления развития подмыва опоры по частоте свободных колебаний с помощью датчиков-акселерометров измерительной системы «Тензор МС». Также на основании расчетов определено, что по изменениям частот колебаний опоры можно определить не только наличие подмыва, но и его местоположение. **Научная новизна.** Впервые предложен метод выявления подмывов опор по динамическим параметрам. **Практическая значимость.** Внедрение непрерывного автоматизированного измерения динамических параметров опор позволит своевременно определять развитие подмывов и принимать меры по их устранению или предотвращению дальнейшего развития, что способствует недопущению возникновения неожиданных аварийных ситуаций.

Ключевые слова: подмыв опоры; непрерывный автоматизированный мониторинг; динамические параметры; частота свободных колебаний; измерительная система «Тензор МС»; датчик-акселерометр

Введение

В июне 2020 года при повышении уровня и скорости течения воды, вызвавшего подмыв и крен опоры на одном из мостов на сети железных дорог России, произошло обрушение пролетных строений. Подобные аварийные ситуации происходили и раньше, например, в 2011 году было обрушение конструкций на мосту через р. Абакан. В связи с этим остро встает вопрос о необходимости своевременного выявления подмыва и принятии мер по его устранению или предотвращению дальнейшего развития.

Периодичность обследования водолазной станцией, при котором может быть выявлено состояние подводной части опор, в том числе и подмывы, составляет один раз в 10 лет, мосто-

испытательной станцией – один раз в 5 лет. Кроме того, согласно Инструкции по содержанию искусственных сооружений в систему надзора входят: осмотры, осуществляемые работниками, назначенными к обходу (квалифицированными монтерами пути, ремонтниками искусственных сооружений); текущие осмотры, выполняемые мостовыми мастерами или бригадами; периодические осмотры под руководством начальника предприятия, обслуживающего искусственные сооружения, или его заместителей. В период ливней и пропуска паводковых вод опасные по размыву сооружения осматриваются в соответствии с разрабатываемыми на такой период мероприятиями, как правило, не реже двух раз в год (до паводка и после паводка). Тем не менее, существующая

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

система периодического мониторинга состояния конструкций не исключает полностью возможность возникновения неожиданных аварийных ситуаций с тяжелыми последствиями.

Поэтому для опасных по размыву сооружений оправдана организация непрерывного автоматизированного мониторинга. Естественно, что обнаружение и оценка подмывов основания опор возможны и с помощью современных эхолотов, но проблема в том, что при паводке работы в русле затруднены, и диагностика все равно будет производиться дискретно.

Цель

Цель исследования – обосновать возможность своевременного обнаружения подмывов опор на основе организации системы автоматизированного мониторинга изменения динамических параметров конструкций, в первую очередь, собственных частот колебаний.

Методика

Возможность диагностирования неисправностей по изменению динамических параметров конструкции отмечалась различными авторами (Цветков, 2008; Бокарев, & Цветков, 2010; Слюсарь, & Яшнов, 2004; Глушков, Соловьев, & Донец, 2011; Чаплин, 2016; Бондарь, 2019; Васильчук, 2020). С практической точки зрения интерес представляет измерение таких диагностических параметров, как частота и форма свободных колебаний. Как известно, частота свободных колебаний конструкции зависит от изгибной жесткости (EI) и распределенной массы (m). При абсолютно жесткой заделке частота основного тона колебаний консоли длиной l может быть определена по формуле (1):

$$v = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}. \quad (1)$$

Очевидно, что при изменении условий взаимодействия опоры с грунтовым основанием будет изменяться и собственная частота колебаний системы.

Для обоснования возможности контроля местного размыва по частоте свободных колебаний были выполнены расчеты промежуточной опоры двухпутного железнодорожного моста на одном из участков Западно-Сибирской

железнодорожной дороги методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе Midas Civil. Моделирование тела опоры и свай выполнено балочными конечными элементами (КЭ), ростверка – объемными КЭ с применением жестких связей для совместной работы элементов опоры. Для моделирования взаимодействия с грунтом использованы одноузловые граничные элементы (опоры типа пружины) с заданными жесткостями закрепления фундамента от горизонтальных перемещений. Жесткости пружины в узле конечного элемента по направлению горизонтальных осей определены по формуле (2).

$$SD_x = SD_y = K \cdot z \cdot b_p \cdot l_{кэ}, \quad (2)$$

где K – коэффициент пропорциональности грунта, кН/м^4 ;

z – глубина от расчетной поверхности грунта (если ростверк расположен над грунтом) или от подошвы ростверка до точки, в которой устанавливается упругая связь, м;

$b_p = 1,5d + 0,5$ – приведенная ширина сваи (ростверка), м;

$l_{кэ}$ – длина сбора нагрузки на узел конечного элемента, м;

d – диаметр сваи или сторона прямоугольного сечения ростверка в плоскости, перпендикулярной действию нагрузки, м.

Вертикальная жесткость SD_z на подошве сваи в первом приближении может быть задана равной бесконечности.

Модель промежуточной опоры представлена на рис. 1.

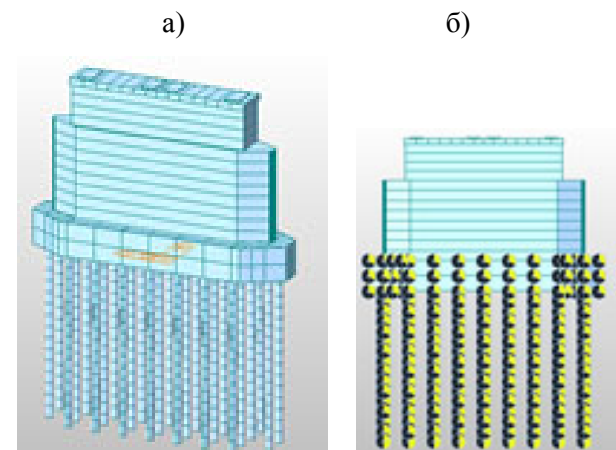


Рис. 1. Модель промежуточной опоры: а) общий вид; б) взаимодействие с грунтом

Для выявления изменений частоты свободных колебаний при увеличении подмыва опоры были рассмотрены следующие случаи:

- 1) равномерный подмыв по всей ширине опоры с увеличением глубины размыва;
- 2) локальный размыв части опоры с увеличением ширины размыва.

Расчеты собственных частот колебаний выполнены при загрузке опоры собственным весом и весом пролетных строений. По результатам расчетов анализируется частота по первой форме колебаний, которая является горизонтальной в продольном направлении моста (рис. 2).

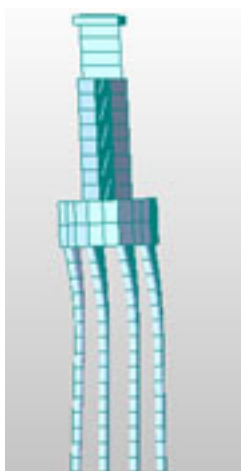


Рис. 2. Первая форма колебаний промежуточной опоры

Экспериментальные исследования выполнялись на металлическом железнодорожном мосту с помощью измерительной системы (ИС) «Тензор МС» (рис. 3), разработанной в Сибирском государственном университете путей сообщения (Бокарев, Мочалкин, Снежков, & Яшнов, 2004; Бокарев, Снежков, & Яшнов, 2007).



Рис. 3. Измерительная система «Тензор МС»

Датчики-акселерометры устанавливались на опорные листы опорных частей. Опоры выводились из равновесия при проходе подвижной нагрузки (ВЛ80С). Записи виброграмм произведены на опоре № 2 с зафиксированным подмывом около 1,5 метров и на аналогичных по конструкции опорах №№ 3 и 4, не имеющих подмывов.

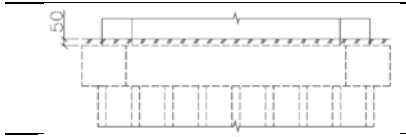
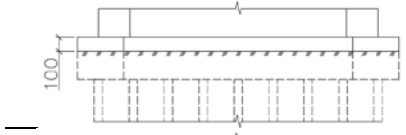
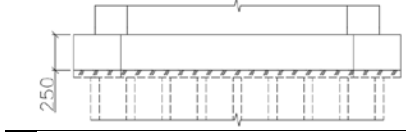

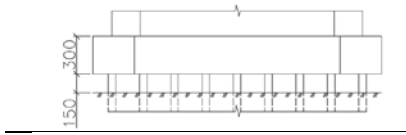
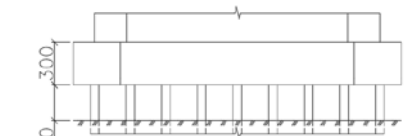
Результаты

Результаты расчетов частоты свободных колебаний при равномерном подмыве по всей ширине опоры сведены в табл. 1.

По результатам расчетов построен график зависимости собственной частоты колебаний опоры от глубины подмыва (рис. 4). Построение линии экспоненциального тренда при равномерном подмыве можно считать достоверным (величина достоверной аппроксимации равна 0,9907).

Таблица 1

Собственные частоты колебаний опоры при равномерном подмыве

Характер подмыва	Собственная частота колебаний, Гц
	2,90
	2,44
	1,75
	1,26
	1,03
	0,83

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

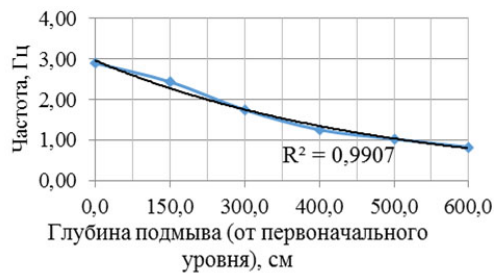


Рис. 4. График зависимости собственной частоты колебаний по основному тону от глубины подмыва опоры

Также был рассмотрен случай локального подмыва с его развитием по ширине опоры. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Частоты свободных колебаний при локальном размыве с развитием по ширине опоры

Характер подмыва	Собственная частота колебаний, Гц
	2,82
	2,75
	2,71
	2,63
	2,52
	2,15
	1,57

По результатам расчетов построен график зависимости частоты свободных колебаний опоры от ширины подмыва (рис. 5). Построение линии полиномиального тренда при локальном подмыве можно считать достоверным (величина достоверной аппроксимации равна 0,9987).

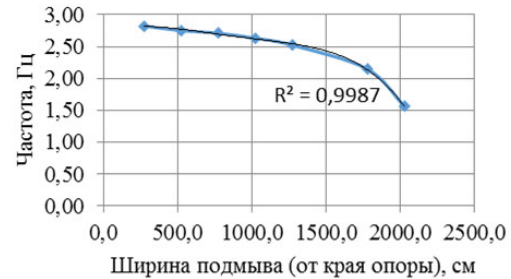
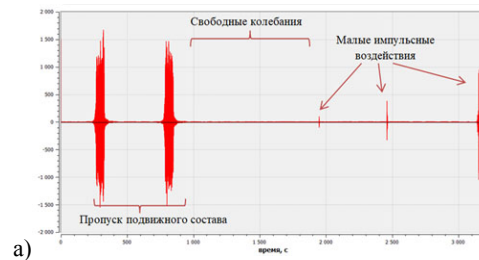


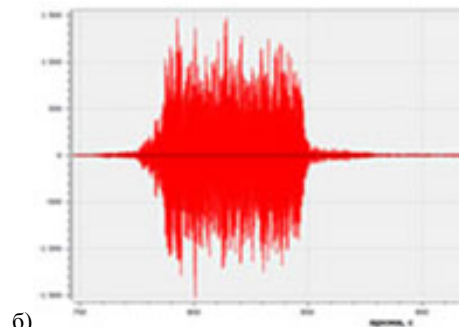
Рис. 5. График зависимости собственной частоты колебаний основного тона от ширины подмыва опоры

Возможность выявления изменения собственных частот колебаний от степени подмыва опоры была подтверждена опытным путем.

По результатам натурных измерений с помощью датчиков-акселерометров были получены виброграммы ускорений для опоры с подмывом (рис. 6) и для опор без подмыва (рис. 8). Определены участки пропуска подвижного состава, свободных колебаний после снятия нагрузки и малых импульсных воздействий (Яшнов, & Снежков, 2019), получены соответствующие графики функций спектральных плотностей мощности (СПМ) (рис. 7 и 9).



а)



б)

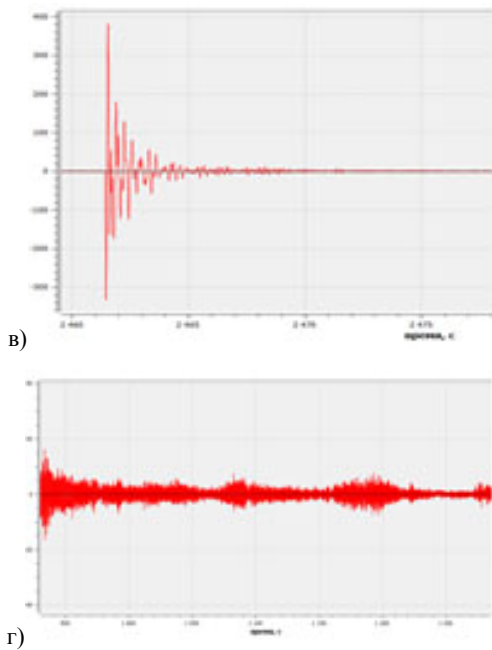


Рис. 6. Виброграма ускорень опори № 2:
 а) повна запис з вібрдатчика; б) учасок пропуску
 ВЛ80С; в) мале імпульсне вплив; г) свободні
 коливання після зняття навантаження

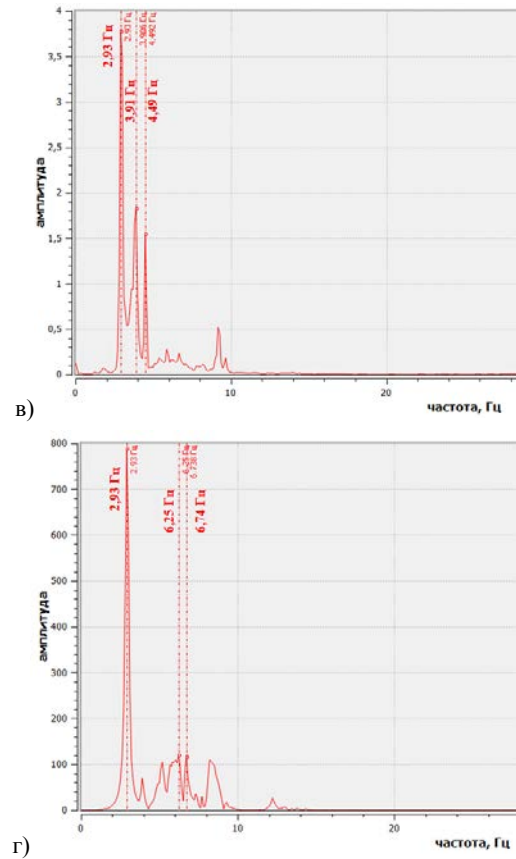
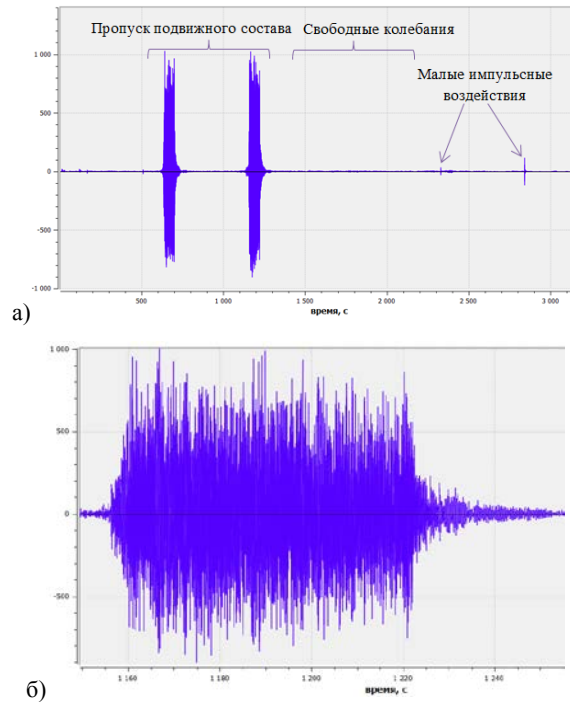
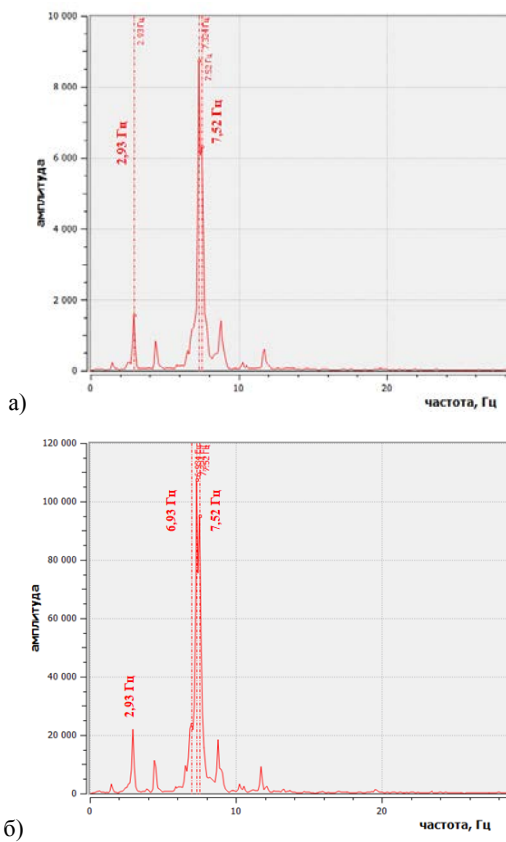
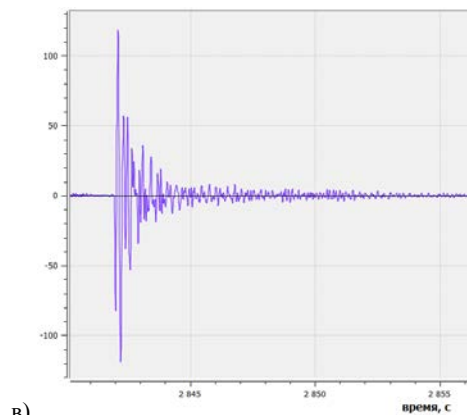


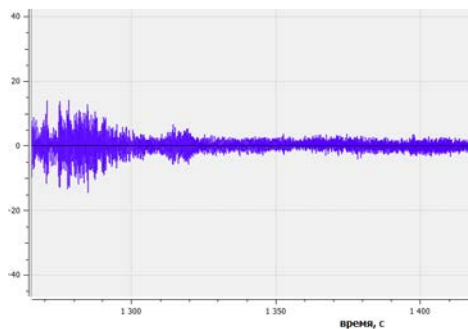
Рис. 7. Спектрограми для опори № 2:
 а) повна запис з вібрдатчика; б) пропуск ВЛ80С;
 в) свободні коливання; г) мале імпульсне вплив



МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

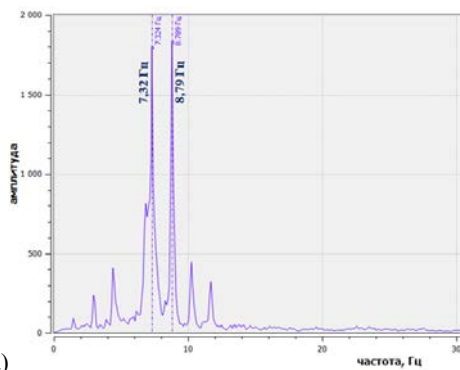


в)

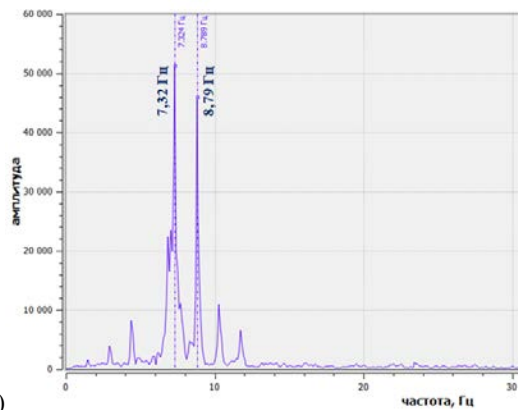


г)

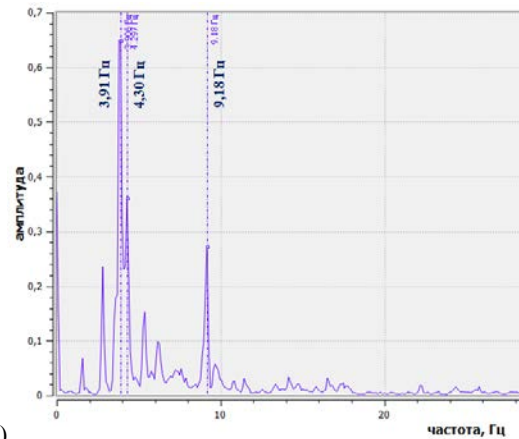
Рис. 8. Виброграма ускорень опори № 4:
а) повна запис з вібрдатчика; б) участок пропуску
ВЛ80С; в) мале імпульсне вплив; г) свободні
колявання після зняття нагрзуки



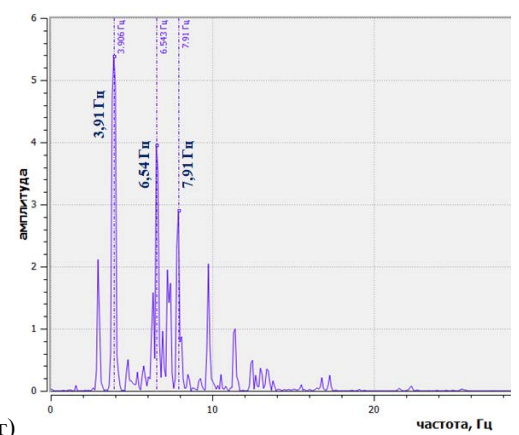
а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Спектрограми для опори № 4:
а) повна запис з вібрдатчика; б) пропуск ВЛ80С;
в) свободні колявання; г) мале імпульсне вплив

Після обробки записаних сигналів в ПО tenzog2 були отримані частоти свободних колявань для опори № 2 з подмывом около 1,5 метрів и для опор № 3,4 без подмыва (табл. 3). Изменение частоты колявань для опори с подмывом составило около 25 %.

Таблица 3

Опытные частоты свободных коляний

Опора	Частота свободных коляний, Гц
Опора №2 (с подмывом)	2,83
Опора №3 (без подмыва)	3,81
Опора №4 (без подмыва)	3,91

Из полученных результатов следует вывод, что изменение частоты свободных коляний может служить сигналом о появлении подмыва опоры и позволит своевременно приступить к

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

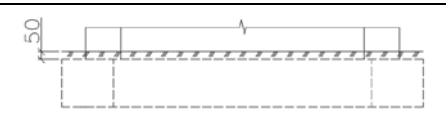
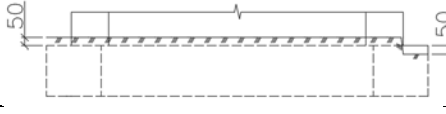
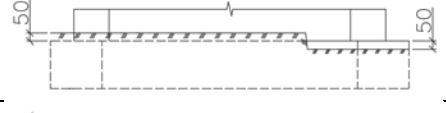

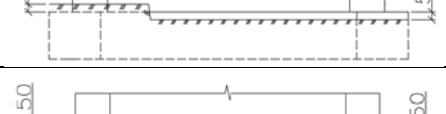
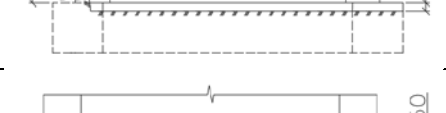

принятию мер по его устранению, что позволит не допускать аварийных ситуаций.

Следует отметить, что отличие натуральных частот колебаний от расчетных может быть объяснено принятием в расчетах условных характеристик грунта из-за отсутствия достоверных сведений о геологическом строении основания. Уточнение коэффициента пропорциональности грунта в конечно-элементных моделях позволит получить расчетные частоты, совпадающие с экспериментальными.

Также в ходе исследований методика была опробована для фундаментов мелкого заложения. Рассмотрен случай постепенного изменения отметки дна около ростверка с его развитием по ширине опоры. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Таблица 4

Частоты свободных колебаний при локальном размыве по ширине опоры на фундаменте мелкого заложения

Характер подмыва	Частота свободных колебаний, Гц
	7,76
	7,75
	7,72
	7,66
	7,61
	7,55
	7,50

По результатам расчетов построен график зависимости частоты свободных колебаний опоры от ширины подмыва (рис. 10).

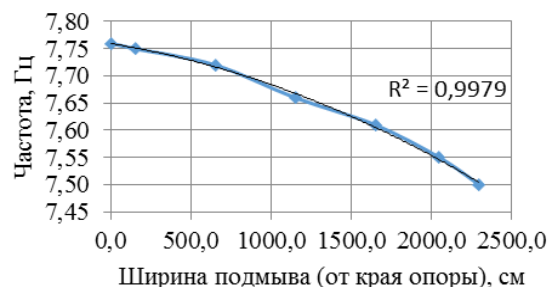


Рис. 10. График зависимости частоты свободных колебаний от ширины подмыва опоры на фундаменте мелкого заложения

Построение линии полиномиального тренда при локальном подмыве фундамента мелкого заложения можно считать достоверным (величина достоверной аппроксимации равна 0,9979).

Значительное увеличение частоты свободных колебаний для опоры на фундаменте мелкого заложения связано с изменением формы колебания конструкции при заданных условиях опирания.

Для выявления местоположения локального размыва были рассмотрены изменения частоты свободных колебаний при загрузке по отдельности железнодорожных путей двухпутного моста. Модель промежуточной опоры загружалась обрабатываемой нагрузкой С10. Загрузка железнодорожных путей производилась поочередно: сначала путь со стороны подмыва, потом – с противоположной стороны. Полученные результаты (табл. 5) позволяют сделать вывод, что по изменениям частот колебаний опоры можно определить не только наличие подмыва, но и его местоположение.

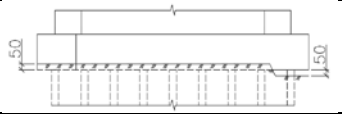

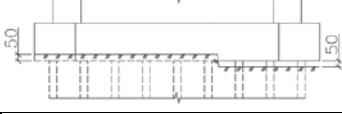
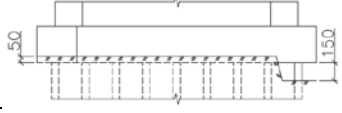

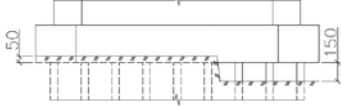
Научная новизна и практическая ценность

Внедрение непрерывного автоматизированного измерения динамических параметров опор позволит своевременно выявлять подмывы и принимать меры по их устранению или предотвращению дальнейшего развития, что способствует недопущению возникновения неожиданных аварийных ситуаций. Методика выявления подмывов опор по динамическим параметрам предложена впервые.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблица 5

Частоты свободных колебаний при локальном размыве по ширине опоры при загрузке подвижной нагрузкой

Характер подмыва	Частота свободных колебаний при загрузке пути, Гц:	
	со стороны подмыва	на противоположной стороне
	1,35	1,49
	1,28	1,36
	1,23	1,33
	1,34	1,39
	1,23	1,33
	1,14	1,26

Выводы

Таким образом, проведенные численные и натурные эксперименты подтвердили возможность организации системы непрерывного автоматизированного мониторинга для своевременного выявления развития размывов опор с помощью датчиков-акселерометров. В дальнейшем предлагаемый метод диагностики и мониторинга может быть дополнен измерением кренов опор с помощью датчиков-инклинометров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Larocca, A. P. C., Schaal, R. E., & Santos, M. C. (2005). Monitoring of dynamic behavior of sus-

pension bridge on high-frequency GPS-data. *GPS World*.

Yashnov, A. & Chaplin, I. (2018). *Specifics of determining the tension forces of the cable-stayed bridge elements, Siberian Transport Forum – TransSiberia, MATEC Web of Conferences, vol. 239, 05011.*

Yashnov, A. & Kuzmenkov P. (2018). *Innovative aspects in developing bridge monitoring systems, X International Scientific and Technical Conference “Polytransport Systems”. MATEC Web of Conferences, vol. 216, 01009.* URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601009>

Бокарев, С. А., Мочалкин, П. С., Снежков, И. И. & Яшнов, А. Н. (2004). Перспективы применения карманных компьютеров при строительстве и эксплуатации. *Вестник мостостроения*, 3(4), 37-39.

Бокарев, С. А., Снежков, И. И. & Яшнов, А. Н. (2007). Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО. *Путь и путевое хозяйство*, 9, 25.

Бокарев, С. А. & Цветков, Д. Н. (2010). Экспресс-оценка технического состояния эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов по динамическим параметрам. *Известия Транссиба*, 1, 98-99.

Бондарь, И. С. (2019). *Вибродиагностика балочных пролетных строения железнодорожных мостов*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.11. Москва.

Васильчук, Л. А. (2020). Выявление развития дефектов по изменению динамических параметров конструкции. *Современные направления в проектировании, строительстве, ремонте и содержании транспортных сооружений*. Минск: изд-во БНТУ, 392-394.

Глушков, С. П., Соловьев, Л. Ю. & Донец, Н. А. (2011). Идентификация повреждений в мостовых конструкциях на основе анализа их колебательных процессов. *Вестник ТГАСУ*, 4, 209-220.

Слюсарь, А. В. & Яшнов А. Н. (2004). Совершенствование методики диагностики железобетонных пролетных строений по результатам исследования их динамической работы. *Научные труды Общества железобетонщиков Сибири и Урала*. Новосибирск: НГАСУ, 8, 83-85.

Цветков, Д. Н. (2008). Исследование динамического отклика сталежелезобетонных пролетных строений с различными повреждениями в плите. *Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: Сб. докладов VII Международ. конф. по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте*. СПб: ПГУПС, 192-193.

© Л. А. Васильчук, А. Н. Яшнов О. Л., 2020

Чаплин, И. В. (2016). Мониторинг напряженно-деформированного состояния железобетонных преднапряженных пролетных строений железнодорожных мостов. *Научные труды общества железобетонщиков Сибири и Урала*, 64-69.

Яшнов, А. Н. & Снежков, И. И. (2019). Опыт диагностики искусственных сооружений методом малых воздействий. *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*, 3.

Л. О. ВАСИЛЬЧУК^{1*}, А. М. ЯШНОВ²

^{1*} СіБНІ мостів, відділ Діагностики та моніторингу мостів, Сибірський державний університет шляхів сполучення, вул. Дусі Ковальчук, 191/3, Новосибірськ, Росія, 630049, тел. +7 (913) 205 29 54, ел. пошта vasilchuck97@mail.ru, ORCID 0000-0001-6332-4211

² Кафедра «Мости», Сибірський державний університет шляхів сполучення, вул. Дусі Ковальчук, 191, Новосибірськ, Росія, 630049, тел. +7 (903) 901 64 01, ел. пошта yan@stu.ru, ORCID 0000-0001-7435-3376

ДІАГНОСТИКА ПІДМИВУ ОПОР МОСТІВ ЗГІДНО ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Мета. З метою обґрунтування можливості своєчасного виявлення підмивів опор шляхом фіксації і аналізу змін динамічних параметрів конструкцій авторами були виконані розрахункові і експериментальні дослідження залежності власних частот коливань опор від умов взаємодії з ґрунтовою основою. **Методика.** Для досягнення поставленої мети було проаналізовано досвід проведення моніторингу технічного стану конструкцій, в тому числі і за динамічними параметрами. Визначено динамічні характеристики опор, які можуть служити індикатором для виявлення підмивів. Проведено чисельні і натурні експерименти для виявлення залежності динамічних параметрів опори від ступеня розвитку місцевого розмиву. **Результати.** Виділено параметр – це частота вільних коливань, який схильний до істотних змін при зміні умов взаємодії опори з ґрунтовою основою. За результатами розрахунків виявлені залежності власної частоти коливань від ступеня підмиву для опор на пильовому фундаменті і на фундаменті мілкого закладення. Дослідним шляхом доведено можливість виявлення розвитку підмиву опори по частоті вільних коливань за допомогою датчиків-акселерометрів вимірювальної системи «Тензор МС». Також на підставі розрахунків визначено, що по змінах частот коливань опори можна визначити не тільки наявність підмиву, але і його місце розташування. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано метод виявлення підмивів опор згідно динамічних параметрів. **Практична значимість.** Впровадження безперервного автоматизованого вимірювання динамічних параметрів опор дозволить своєчасно визначити розвиток підмивів і вживати заходів щодо їх усунення або запобігання подальшого розвитку, що сприятиме недопущенню виникнення несподіваних аварійних ситуацій.

Ключові слова: підмив опори; безперервний автоматизований моніторинг; динамічні параметри; частота вільних коливань; вимірювальна система «Тензор МС»; датчик-акселерометр

L. A. VASILCHUK^{1*}, A. N. YASHNOV²

^{1*} Department of Diagnostics and Monitoring of Bridges of Siberian Research Institute of Bridges, Siberian State Transport University, Dusi Kovalchuk Str., 191/3, Novosibirsk, Russia, 630049, tel. +7 913 205 29 54, email vasilchuck97@mail.ru, ORCID 0000-0001-6332-4211

² Department "Bridges" of Siberian State Transport University, Dusi Kovalchuk Str., 191, Novosibirsk, Russia, 630049, tel. +7 903 901 64 01, email yan@stu.ru, ORCID 0000-0001-7435-3376

DIAGNOSTICS OF BRIDGE SCOUR BY DYNAMIC PARAMETERS

Purpose. In order to substantiate the possibility of timely detection of bridge scour by fixing and analyzing changes in the dynamic parameters of structures, the authors carried out computational and experimental studies of the dependence of the natural frequencies of the pier on the conditions of interaction with the soil foundation. **Methodology.** To achieve this goal, the experience of monitoring the technical condition of structures was analyzed, including by dynamic parameters. The dynamic characteristics of the supports have been determined, which can serve as an indicator for identifying bridge scour. Numerical and full-scale experiments were carried out to reveal the dependence of the dynamic parameters of the support on the degree of development of local scour. **Results.** The

parameter is highlighted – the natural frequencies, which is subject to significant changes when the conditions of interaction between the pier and the soil foundation. Based on the results of calculations, the dependences of the natural frequencies on the degree of scour on a pile foundation and on a shallow foundation were revealed. The possibility of detecting the development of bridge scour by the natural frequencies using the sensors-accelerometers of the «Tensor MS» measuring system has been experimentally confirmed. Also, on the basis of calculations, it was determined that by changes in the natural frequencies of the pier, it is possible to determine not only the presence of bridge scour, but also its location. **Originality.** For the first time, a method is proposed for detecting bridge scour by dynamic parameters. **Practical value.** The introduction of continuous automated measurement of the dynamic parameters of piers will allow timely determining the development of bridge scour and taking measures to eliminate them or prevent further development, which will help to prevent the occurrence of unexpected emergencies.

Keywords: bridge scour; continuous automated monitoring; dynamic parameters; natural frequencies; measuring system “Tensor MS”; sensors-accelerometers

REFERENCES

- Larocca, A. P. C., Schaal, R. E., & Santos, M. C. (2005). Monitoring of dynamic behavior of suspension bridge on high-frequency GPS-data. *GPS World*. (in English)
- Yashnov, A. & Chaplin, I. (2018). *Specifics of determining the tension forces of the cable-stayed bridge elements, Siberian Transport Forum – TransSiberia, MATEC Web of Conferences, vol. 239, 05011*. (in English)
- Yashnov, A. & Kuzmenkov P. (2018). *Innovative aspects in developing bridge monitoring systems, X International Scientific and Technical Conference “Polytransport Systems”. MATEC Web of Conferences, vol. 216, 01009*. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601009> (in English)
- Bokarev, S. A., Mochalkin, P. S., Snezhkov, I. I. & Yashnov, A. N. (2004). Perspektivy primeneniya karmannykh kompyuterov pri stroitelstve i ekspluatatsii. *Vestnik mostostroeniya*, 3(4), 37-39. (in Russian)
- Bokarev, S. A., Snezhkov, I. I. & Yashnov, A. N. (2007). Malogabaritnye avtomatizirovannye sistemy dlya diagnostiki ISSO. *Put i putevoe khozyaystvo*, 9, 25. (in Russian)
- Bokarev, S. A. & Tsvetkov, D. N. (2010). Ekspress-otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh stale-zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy zheleznodorozhnykh mostov po dinamicheskim parametram. *Izvestiya Transsiba*, 1, 98-99. (in Russian)
- Bondar, I. S. (2019). Vibrodiagnostika balochnykh proletnykh stroeniya zheleznodorozhnykh mostov. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.23.11. Moskva (in Russian)
- Vasilchuk, L. A. (2020). Vyyavlenie razvitiya defektov po izmeneniyu dinamicheskikh parametrov konstruksii. *Sovremennye napravleniya v proektirovanii, stroitelstve, remonte i soderzhanii transportnykh sooruzheniy*. Minsk: izd-vo BNTU, 392-394. (in Russian)
- Glushkov, S. P., Solovev, L. Yu. & Donets, N. A. (2011). Identifikatsiya povrezhdeniy v mostovykh konstruksiyakh na osnove analiza ikh kolebatelnykh protsessov. *Vestnik TGASU*, 4, 209-220. (in Russian)
- Slyusar, A. V. & Yashnov A. N. (2004). Sovershenstvovanie metodiki diagnostiki zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy po rezultatam issledovaniya ikh dinamicheskoy raboty. *Nauchnye trudy Obshchestva zhelezobetonshchikov Sibiri i Urala*. Novosibirsk: NGASU, 8, 83-85. (in Russian)
- Tsvetkov, D. N. (2008). Issledovanie dinamicheskogo otklika stalezhelezobetonnykh proletnykh stroeniy s razlichnyimi povrezhdeniyami v plite. *Problemy prochnosti materialov i sooruzheniy na transporte: Sb. dokladov VII Mezhdunar. konf. po problemam prochnosti materialov i sooruzheniy na transporte*. SPb: PGUPS, 192-193. (in Russian)
- Chaplin, I. V. (2016). Monitoring napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh prednapryazhennykh proletnykh stroeniy zheleznodorozhnykh mostov. *Nauchnye trudy obshchestva zhelezobetonshchikov Sibiri i Urala*, 64-69. (in Russian)
- Yashnov, A. N. & Snezhkov, I. I. (2019). Opyt diagnostiki iskusstvennykh sooruzheniy metodom malyykh vozdeystviy. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya»*, 3. (in Russian)

Надійшла до редколегії 27.08.2020.

Прийнята до друку 17.09.2020.