

УДК 624.21.058

*КАРТОПОЛЬЦЕВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
kaf\_most@mail.ru*

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

*ДИМО КИСОВ, докт. техн. наук, инженер,  
председатель Совета директоров,  
dkisov@abv.bg*

*ЕАД «Мостстройинженеринг»,*

*Болгария, г. София, ул. Еровете, 12,*

*КАРТОПОЛЬЦЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
kaf\_most@mail.ru*

*КОЛМАКОВ БОРИС ДМИТРИЕВИЧ, аспирант,  
boriskolmakov@mail.ru*

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

### **ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ**

Приведены результаты динамических испытаний сталежелезобетонных мостов с пролетами большой, средней и малой длины. Проанализированы полученные прогибовидеорограммы с учетом проявления дефектов проезжей части, а также построены графики зависимости амплитуда-частота в зависимости от размеров дефектов. Получены данные, способные оценить изменение динамических характеристик пролетных строений в зависимости от длины пролета и наличия дефектов, включая обнаружение резонансного состояния.

**Ключевые слова:** сталежелезобетонный мост; дефекты проезжей части; балка; колебательный процесс; спектральный анализ; амплитуда.

*VLADIMIR M. KARTOPOLTSEV, DSc, Professor,  
kaf\_most@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia,*

*DIMO KISOV, DSc, Engineer, Board Chairman,  
dkisov@abv.bg*

*Moststroinzhenering,*

*175, Eroвете Str., Sofia, Bulgaria,*

*ANDREI V. KARTOPOLTSEV, PhD, A/Professor,  
kaf\_most@mail.ru*

*BORIS D. KOLMAKOV, Research Assistant,  
boriskolmakov@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## DYNAMIC TESTS OF COMPOSITE BRIDGES WITH PAVEMENT DEFECTS

The paper presents results of dynamic testing of composite bridges with spans of large, medium and small length. The analysis of obtained vibration records is given with regard for the pavement defects. The amplitude/frequency dependences are obtained in relation to the defect size. The research findings allow estimating the dynamic properties of bridge spans and the presence of the pavement defects including the detection of the resonance state.

**Keywords:** composite bridge; pavement defects; beam; oscillation process; spectral analysis; amplitude.

В ходе выполнения экспериментальных работ проведено сравнительное сопоставление результатов теоретического расчета и экспериментальных исследований в условиях воздействия как тестовой нагрузки, так и случайного транспортного потока в условиях наличия дефектов проезжей части. Определялись как формы, так и значения частот собственных и вынужденных колебаний, период и амплитуды, а также энергетические спектры колебаний и динамические прогибы.

Динамические характеристики балок пролетных строений сталежелезобетонных мостов во многом зависят от качественного объединения железобетонной плиты проезжей части со стальными балками, а также от вида и характеристик дефектов на проезжей части. Качественная оценка дефектов на проезжей части, в частности в виде выбоин, позволила не только дополнить уже имеющиеся сведения о них, но и расширить классификатор дефектов (таблица). Расширение классификатора за счет подкатегорий не только уточняет спектр и границы влияния на динамические характеристики, особенно на величину динамического коэффициента ( $1 + \mu_g$ ), но и раскрывает масштабность и изменчивость влияния дефектов на динамическую работу сталежелезобетонных мостов [1–7].

Как требуют международные стандарты, экспериментальные исследования динамических характеристик сталежелезобетонных мостов проводились по специальной программе динамических испытаний при движении случайного транспортного потока и эталонного автомобиля с соответствующими подготовительными работами по идентификации дефектов проезжей части.

Исходя из общеизвестных и принятых требований, в качестве объекта исследований были выбраны автодорожные сталежелезобетонные мосты с большими пролетами.

В качестве одного из объектов экспериментального исследования принят внеклассный автодорожный сталежелезобетонный мост неразрезной системы со схемой  $(73,0 + 3) \times (109,0 + 73,0)$  м, а также другие мосты с пролетами 42,5 м и менее (рис. 1).

Динамические испытания проводились при движущемся потоке транспорта с определенной скоростью и режимом движения. При этом сигналы прогибовиброграмм с подключенных датчиков регистрируются 100 раз в секунду, что обеспечивает анализ колебаний конструкций в диапазоне от 0 до 50 Гц.

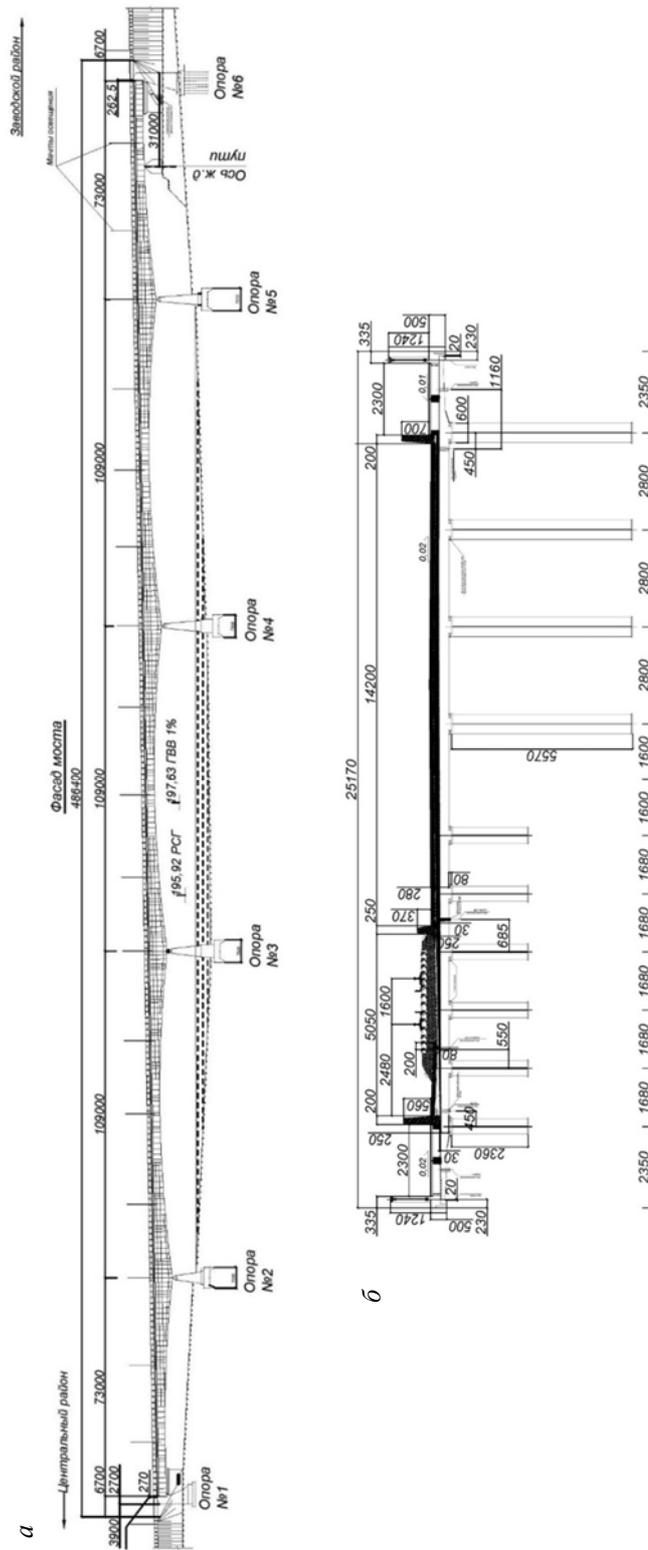


Рис. 1. Сталежелезобетонный мост неразрезной системы:  
 а – фасад испытуемого моста; б – сечение пролетного строения

## Классификатор дефектов покрытия проезжей части

Тип и описание дефекта	Параметры дефекта	Категория неисправности	Классификатор дефектов
Одиночные выбоины в пределах верхнего слоя покрытия	$n, A$	БД I	БДд I
Частые выбоины в пределах верхнего слоя покрытия	$F$	БД II	–
	$F \leq 50 \%$	–	БДд IIа
	$50 \% < F \leq 75 \%$	–	БДд IIб
	$75 \% < F \leq 100 \%$	–	БДд IIв
Одиночные выбоины на всю толщину покрытия	$n, A$	БД I	–
	$n = 1$	–	БДд I
	$1 < F \leq 5$	–	БДд IIа
	$5 < F \leq 10$	–	БДд IIб
	$n > 1$	–	БДд IIв
Частые выбоины на всю толщину покрытия	$F$	БД II	–
	$F \leq 25 \%$	–	БДд IIа
	$25 \% < F \leq 60 \%$	–	БДд IIб
	$60 \% < F \leq 100 \%$	–	БДд IIв
Разрушение покрытия и нижележащих конструктивных слоев: в пределах защитного слоя на всю толщину защитного слоя разрушение защитного слоя и гидроизоляции	$F$	БД III	– БД IIIа БД IIIб БД IIIв
Просадки покрытия над переходными плитами	$y \leq 0,01$	БД I	БДд Ia
	$0,01 < y \leq 0,03$		БДд Ib
	$0,03 < y \leq 0,05$		БДд IIа
	$0,05 < y \leq 0,010$ $0,010 < y \leq 0,015$	БД II БД II	БДд IIб БДд IIв
	$0,015 < y \leq 0,20$		БД IIIа
	$0,20 < y \leq 0,25$		БД IIIб
	$y > 0,25$		БД IIIв
Трещины в покрытии у шва и над швом	$c, B$	БД I	БДд I
Образование бугров в покрытие у шва и над швом	$h, B$	БД II	
	$h < 0,05$	–	БДд IIа
	$0,05 \leq h < 0,10$	–	БДд IIб
	$0,10 \leq h < 0,15$	–	БДд IIв
	$h > 0,15$	–	БД III
Разрушение, отрыв и продавливание в зазор конструкции ДШ	$B$	БД III	БД III

В результате проведенных динамических испытаний было задокументировано 20 прогибовиброграмм длительностью по 60 с каждая. Эталонный же автомобиль двигался поэтапно, с различными скоростями, с постоянной скоростью от 20 до 60 км/ч по всей длине моста в прямом и обратном направлениях. Во время записи колебательного процесса пролетного строения местонахождение испытательной нагрузки относительно устоев отмечалось на прогибовиброграммах с помощью синхрометок, а нумерация записываемых виброграмм фиксировалась в журнале испытаний.

Амплитудно-частотный характер прогибовиброграмм (рис. 2–5) отражает трехстадийное развитие политонального колебательного процесса.

Стадия 1 – процесс зарождения колебаний, исследуемая конструкция совершает только вынужденные колебания.

Стадия 2 – совместные собственные колебания, которые совершает пролетное строение при условии, когда к массе исследуемой мостовой конструкции присоединена масса от испытательной нагрузки, и вынужденные колебания с наибольшими амплитудами.

Стадия 3 – свободные собственные колебания пролетного строения с затуханием и последующим успокоением.

Методом спектрального анализа на основе дискретного преобразования Фурье были обработаны все прогибовиброграммы и определены значения частот собственных колебаний.

Спектральный анализ показал, что для пролетного строения моста фактическая величина частоты собственного колебания составила  $1,76 \text{ Гц} \pm 0,01 \text{ Гц}$  (период  $0,568 \text{ с} \pm 0,003 \text{ с}$ ) (рис. 6).

Как видно из виброграмм (рис. 6), в процессе обработки концевых участков виброграмм, когда пролетное строение находится в режиме свободной вибрации, установлены интервалы значений экспериментальных параметров затухания собственных свободных колебаний пролетного строения моста: коэффициент затухания – 0,068, логарифмический декремент затухания – 0,12 при скорости движения автомобиля 26,5 км/ч; коэффициент затухания – 0,080, логарифмический декремент затухания – 0,14 при скорости движения автомобиля 34,8 км/ч.

Для детализации анализа колебательного процесса при движении тестовой одиночной подвижной нагрузки по пролету  $\ell_p = 73 \text{ м}$  с проезжей частью, имеющей дефекты в виде выбоин от 0,1 до 0,35 м, были зафиксированы прогибовиброграммами часто расположенные (рис. 7, а) и одиночные (рис. 7, б) дефекты, а также построены графики «амплитуда – частота» в зависимости от размеров дефектов (рис. 8, а – е).

В традиционном представлении фактическая величина частоты вертикальных собственных колебаний пролетного строения моста составила  $1,76 \text{ Гц} \pm 0,01 \text{ Гц}$  (период  $0,568 \text{ с} \pm 0,003 \text{ с}$ ) и расположена в опасном диапазоне  $1,7\text{--}2,2 \text{ Гц}$  (период  $0,45\text{--}0,6 \text{ с}$ ), что противоречит выводам в работе [1].

В подтверждение ранее полученным результатам теоретических и экспериментальных исследований наблюдается несколько иная картина изменения динамических характеристик для пролетных строений до 42,5 м [5–9].

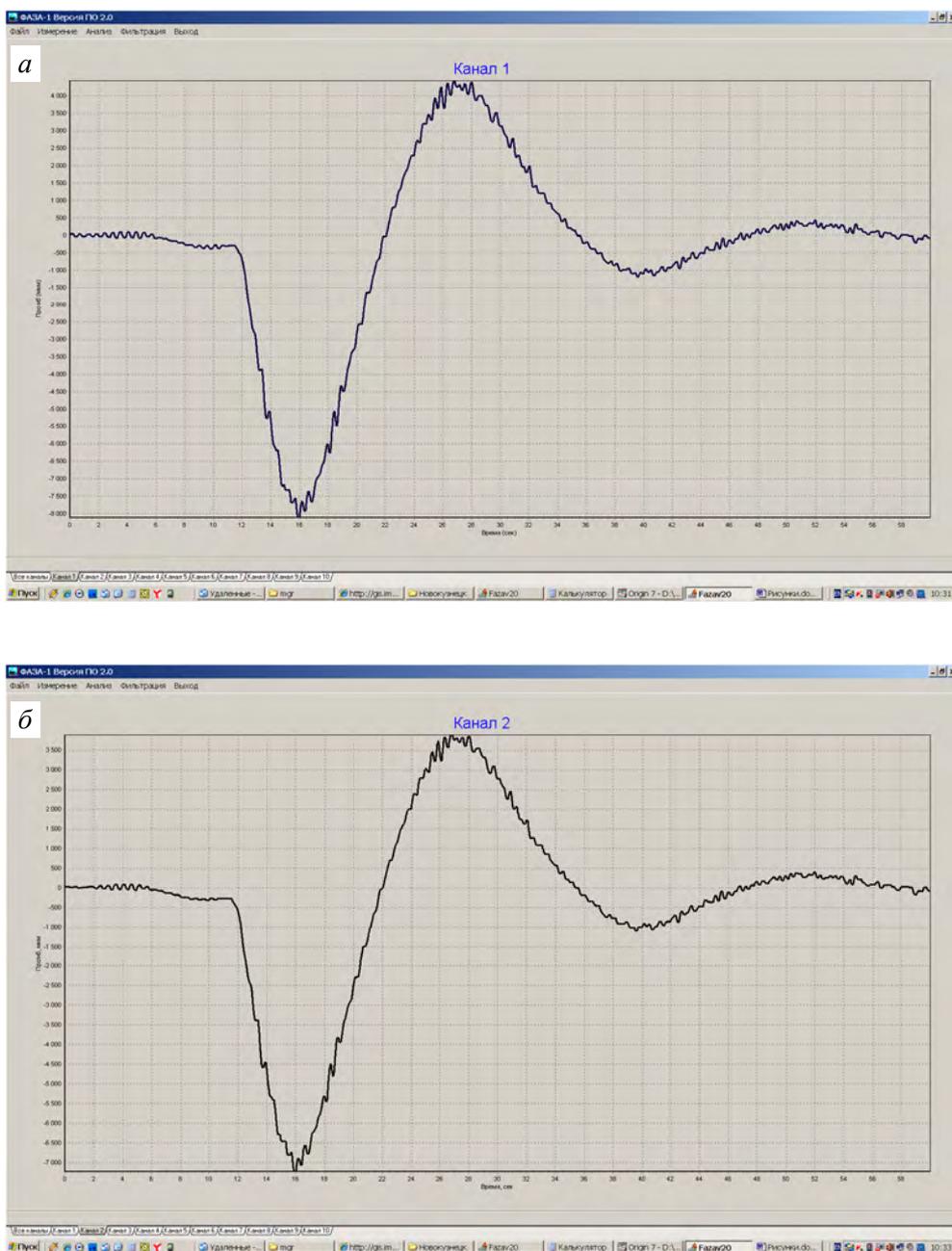


Рис. 2. Общий вид прогибовивброграмм при колебании главных балок в пролете при скорости нагрузки 26,5 км/ч:

а – прогибовивброграмма балки № 9; б – прогибовивброграмма балки № 8

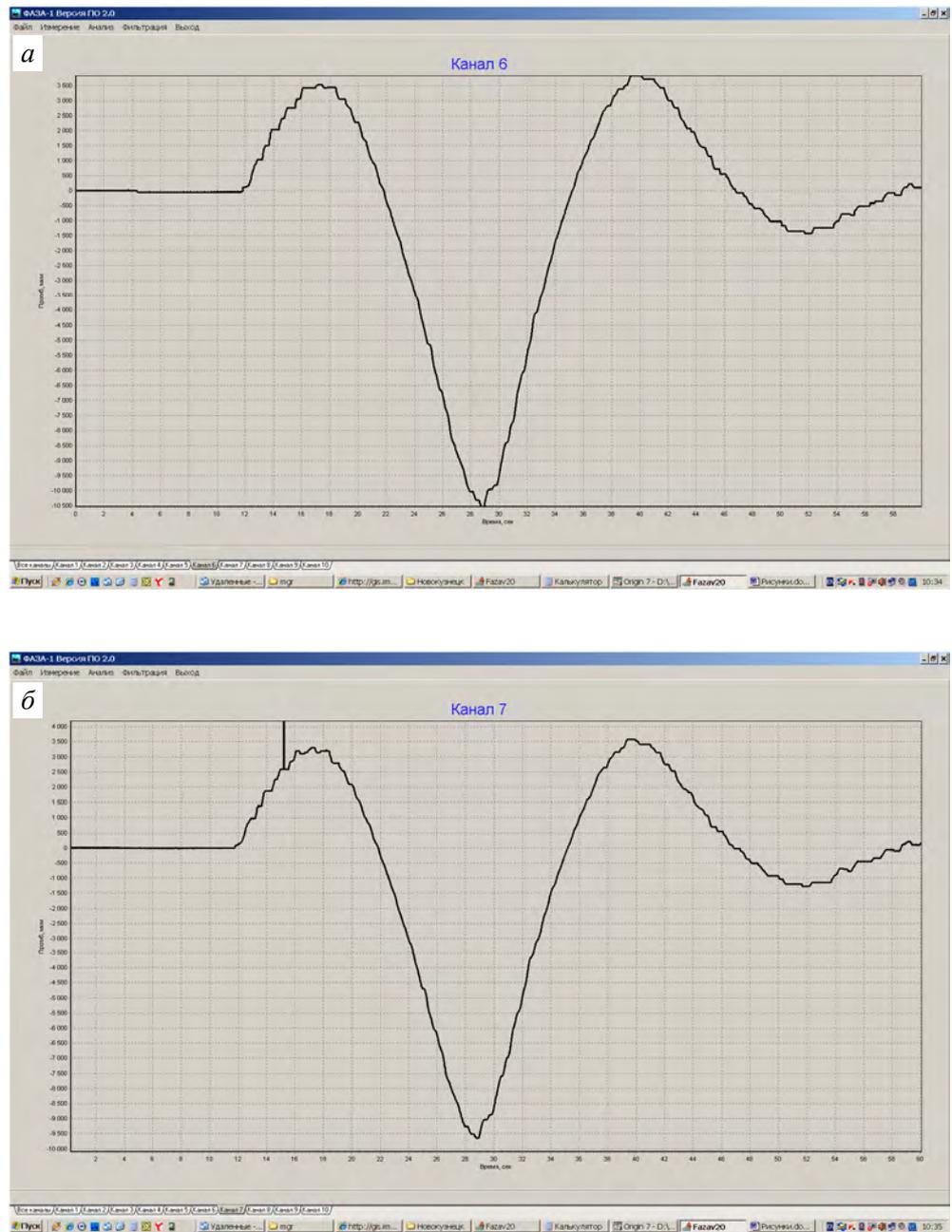


Рис. 3. Общий вид прогибовиброграмм при колебании главных балок в пролете № 2 при скорости нагрузки 26,5 км/ч:  
а – прогибовиброграмма балки № 9; б – прогибовиброграмма балки № 8

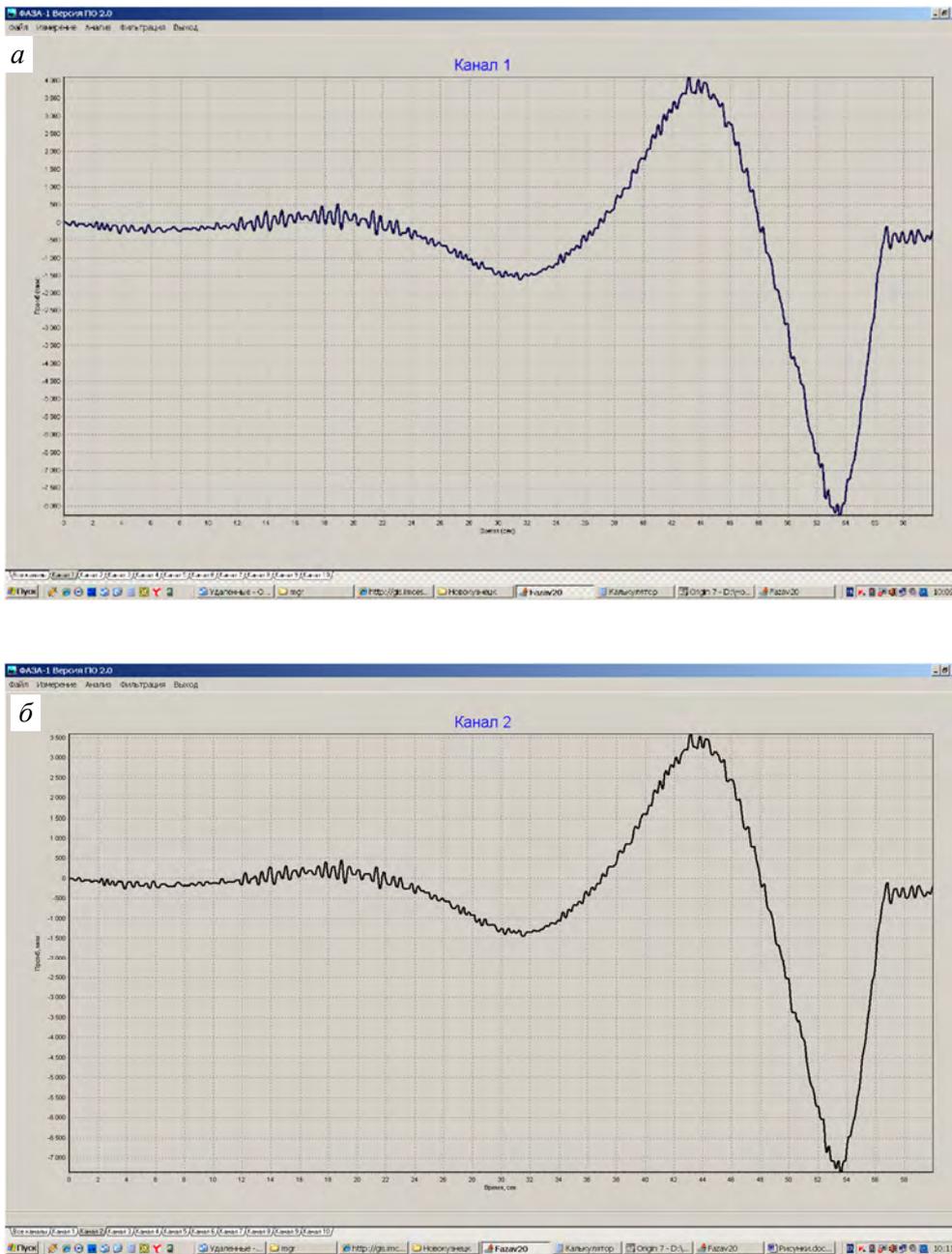


Рис. 4. Общий вид прогибовиброграмм при колебании главных балок в пролете № 1 при скорости нагрузки 34,8 км/ч:  
 а – прогибовиброграмма балки № 9; б – прогибовиброграмма балки № 8

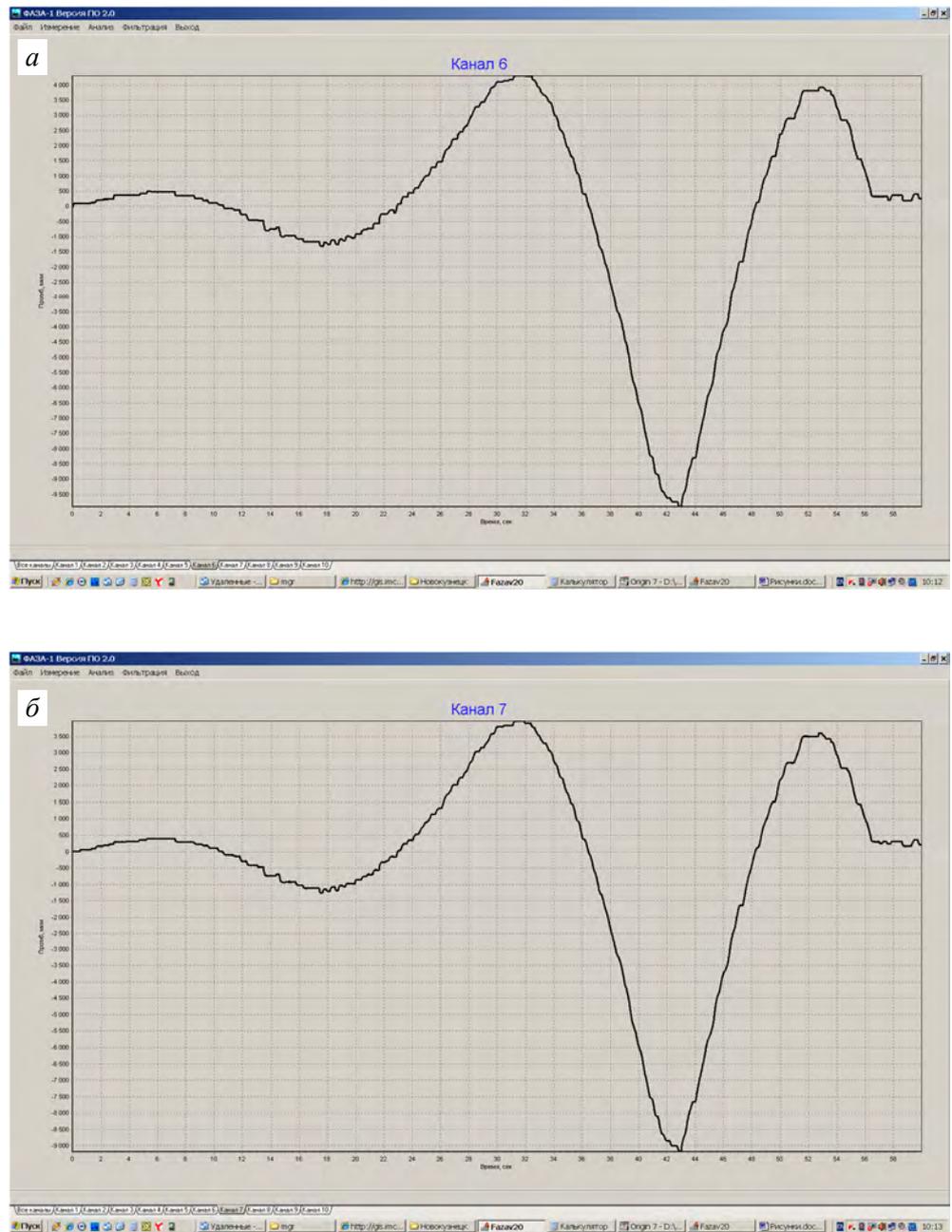


Рис. 5. Общий вид прогибовивброграмм при колебании главных балок в пролете № 2 при скорости нагрузки 34,8 км/ч:  
а – прогибовивброграмма балки № 9; б – прогибовивброграмма балки № 8

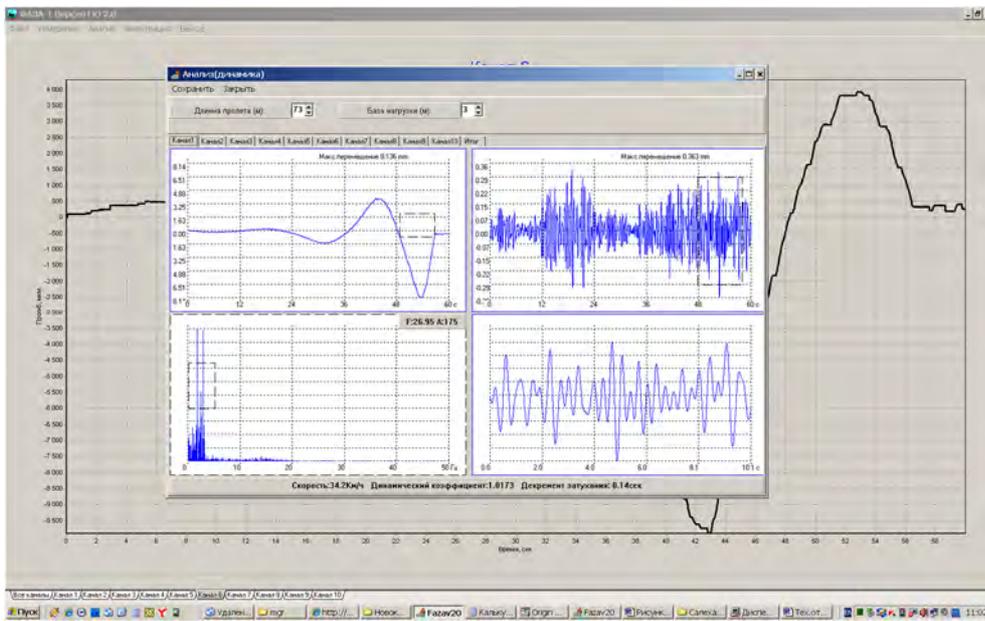


Рис. 6. Результирующие виброграммы динамических испытаний

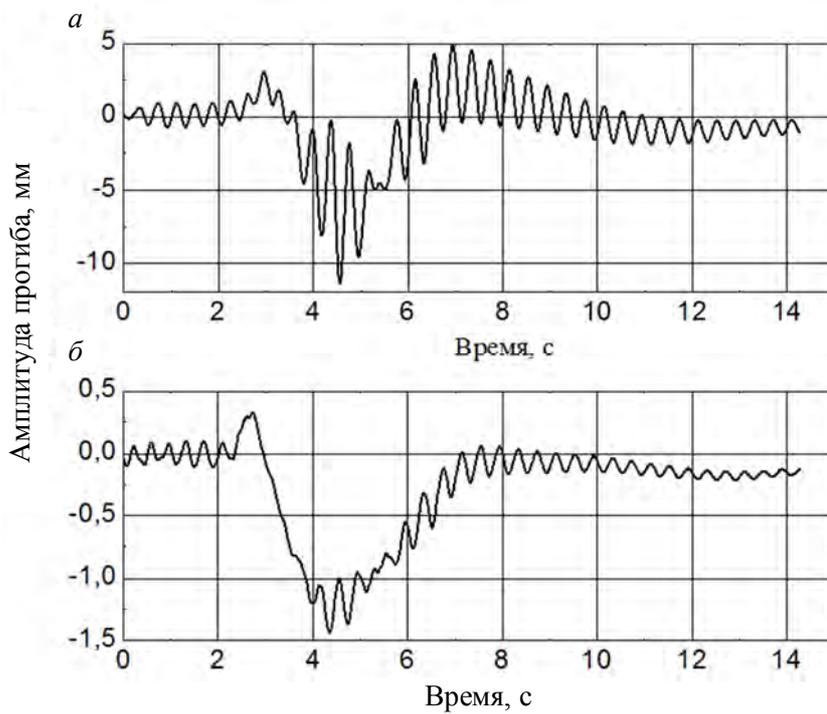


Рис. 7. Прогибовивброграммы с учетом проявления дефектов проезжей части:  
 $a - h_{\text{выб}} = 0,15 \text{ м}$ ;  $б - h_{\text{выб}} = 0,25 \text{ м}$

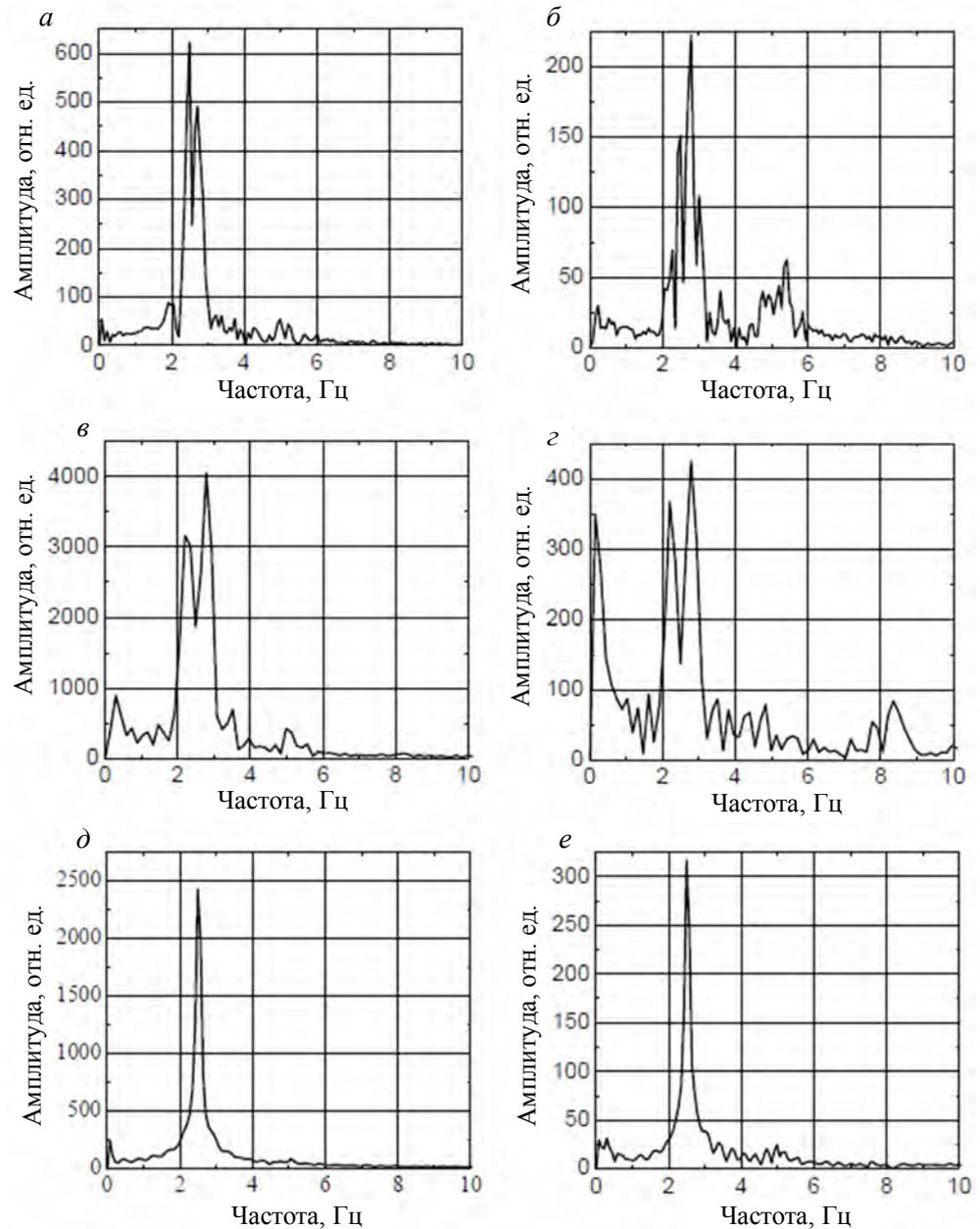


Рис. 8. Зависимость  $A \rightarrow f(\omega)$ :

$a, б - h_{\text{выб}} = 0,1$  м;  $в, г - h_{\text{выб}} = 0,35$  м;  $д, е - h_{\text{выб}} = 0,1-0,25$  м

В связи с проявлением динамических характеристик в области инфранизких частот для данного типа пролетных строений проводилась цифровая фильтрация виброграмм с использованием режекторного фильтра и выполнялось центрирование сигнала в ходе спектрального анализа. В процессе цифровой фильтрации определялась область спектра, где сосредоточены собствен-

ные и вынужденные колебания балок пролетного строения с учетом проявления дефектов проезжей части.

Спектральный анализ виброграммы (рис. 9) показал, что при прохождении автомобилей общий спектр частот сосредоточен в полосе от 1,9 до 2,8 Гц ( $T = 0,375\text{--}0,526$  с) с максимальным пиком на частоте  $f = 2,3$  Гц ( $T = 0,435$  с).

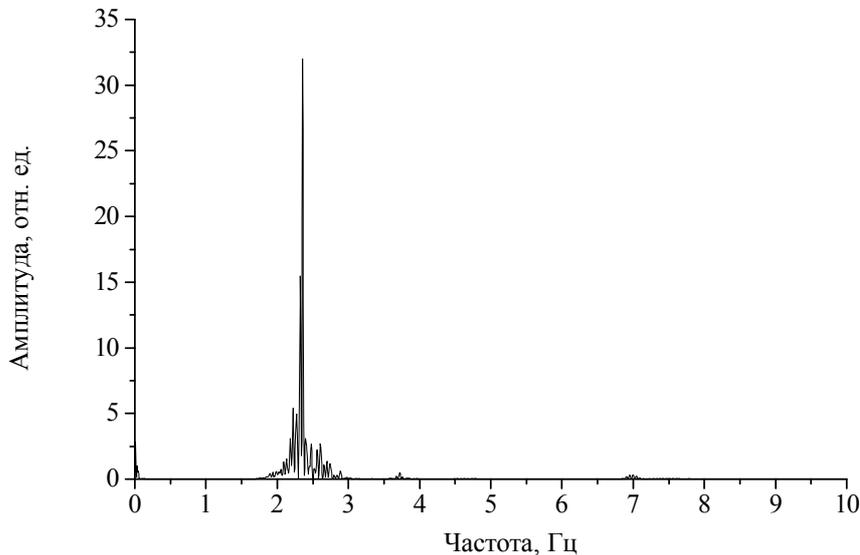


Рис. 9. Общий спектр частот всей реализации при испытании сталежелезобетонного моста

Спектральный анализ отдельных участков временной реализации (выборки 4–8 и 7–11 с) во время движения автомобилей определил одинаковый характер вынужденных колебаний, которые имеют максимальное значение на частоте  $f_v = 7$  Гц ( $T_v = 0,143$  с). Анализ спектра частот собственных вертикальных колебаний моста (выборки 11–27 с) показал, что основное собственное колебание пролетных строений моста имеет частоту  $f_c = 2,3$  Гц ( $T_c = 0,435$  с). Таким образом, колебание моста осуществляется на собственной частоте независимо от расположения временной нагрузки. Возникающие вынужденные частоты не влияют на колебательный процесс за счет незначительных амплитудных значений по отношению к амплитуде собственных колебаний.

Прогиб пролетного строения от массы подвижной нагрузки представляет собой полусинусоидальное колебание на частоте 0,2 Гц при величине прогиба  $y_{\text{экс}} = 8,2$  мм. Максимальное значение собственных колебаний  $y_{\text{ст}}^{\text{теор}} = 10$  мм.

На основании выполненных исследований установлено, что пролетное строение сталежелезобетонного моста с пролетами 42,5 м обладает недостаточной жесткостью и с учетом проявления дефектов проезжей части имеет тенденцию к возбуждению колебаний при движении подвижной нагрузки по соседним пролетам, что не коррелируется с большими пролетами (рис. 9). Частота собственных колебаний  $f_c = 2,3$  Гц ( $T_v = 0,435$  с) находится в опасном пределе  $f_v = 1,4 \text{ Гц} \pm 3,3 \text{ Гц}$  ( $T = 0,3 \text{ с} \pm 0,7 \text{ с}$ ), где наиболее вероятны резонансные явления.

Для пролетных строений сталежелезобетонных мостов с  $L < 42,5$  м при частоте дискретизации сигнала  $< 100$  Гц временная запись виброграммы составляла 20 с.

При анализе таких виброграмм (рис. 10) выделены выборки: от 5 до 11 с – вынужденные колебания пролета; от 11 до 13 с – затухающие собственные колебания мостовой конструкции после съезда транспортного средства; от 19 до 27 с – вынужденные колебания пролета; от 27 до 29 с – затухающие собственные колебания моста после съезда транспортного средства; от 49 до 54 с – вынужденные колебания пролета; от 54 до 58 с – затухающие собственные колебания конструкции после съезда транспортного средства; от 59 до 66 с – вынужденные колебания пролета; от 66 до 68 с – затухающие собственные колебания пролета после съезда транспортного средства; от 101 до 115 с – вынужденные колебания пролета; от 115 до 118 с – затухающие свободные колебания после съезда транспортного средства.

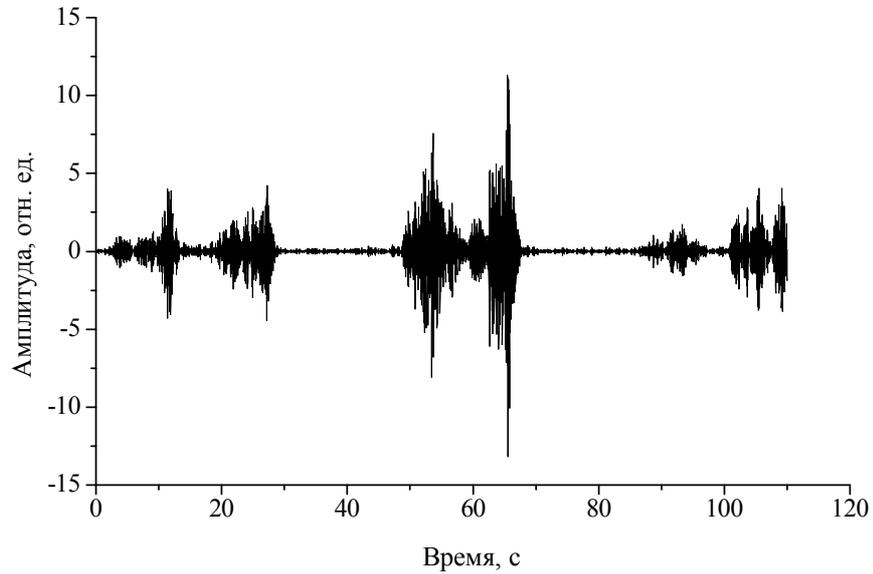


Рис. 10. Экспериментальная виброграмма с элементами биения в процессе спектральной обработки после фильтрации

Спектральный анализ измерений динамических испытаний моста с пролетами меньше 42,5 м показал, что при прохождении транспортных средств общий спектр частот в соответствии с рис. 10 более богат по сравнению со сталежелезобетонным пролетным строением моста пролетами  $\cong 42,5$  м по количеству максимальных пиков частот и сосредоточен в полосе от 6,0 до 12,8 Гц ( $T = 0,078\text{--}0,167$  с) с максимумом на частоте  $f = 8,2$  Гц ( $T = 0,122$  с). Спектральный анализ отдельных участков временной реализации (выборки 18–27 и 58–66 с) во время проезда автотранспорта по пролету моста позволил определить вынужденные колебания, которые имеют максимальные пики на частотах  $f_v = 9,4$  и  $11,2$  Гц (период  $T_v = 0,106$  и  $0,089$  с). Диапазон вынужден-

ных колебаний составляет от 9,2 до 12,3 Гц, которые зависят от расположения временной нагрузки по отношению к дефекту на проезжей части (рис. 11).

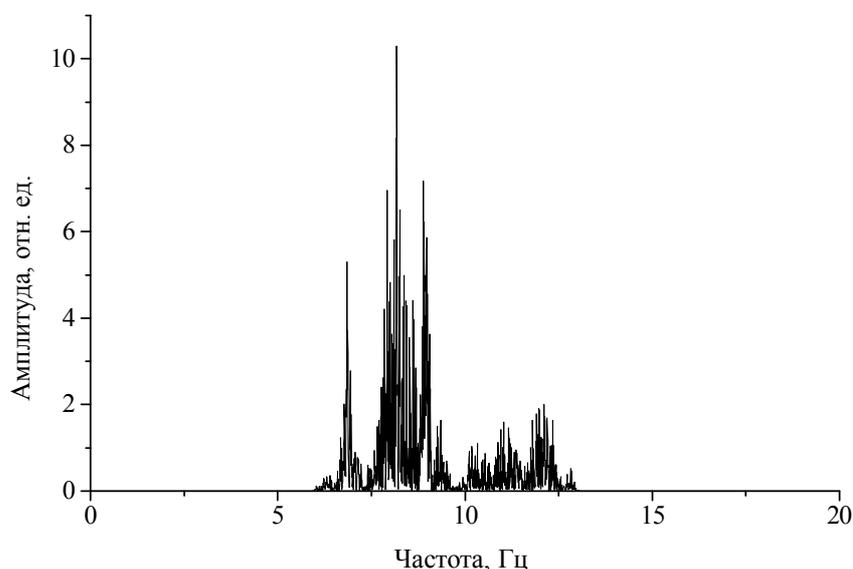


Рис. 11. Спектр частот всей реализации при испытании моста с пролетами меньше 42,5 м

Корреляционно-спектральный анализ частот собственных вертикальных колебаний моста (выборка 27–29 с) после съезда автотранспорта показал, что среднее значение основного собственного колебания пролетного строения моста имеет частоту  $\omega_c = 8,1$  Гц (период  $T_c = 0,123$  с) с доверительным интервалом  $\pm 0,1$  Гц. Таким образом, диапазон пиковых частот собственных и вынужденных колебаний достигает 5 Гц и указывает на то, что общий фон колебательного процесса зависит от количества дефектов на проезжей части и их размеров в зависимости от типа классификатора дефектов.

Затухающие свободные колебания характеризуются коэффициентом затухания  $\varepsilon = 1,4 \text{ с}^{-1}$  и логарифмическим декрементом  $\delta_c = 0,17$ .

Таким образом, анализ результатов динамических испытаний мостов с  $L < 42,5$  м показал, что впервые в практике определения характеристик динамической работы получены данные, способные оценить изменение динамических характеристик пролетных строений в зависимости от длины пролета и наличия дефектов, включая обнаружение резонансного состояния [8]. Характеристики дефектов представляются следующими параметрами: площадью пораженного дефектами элементов в процентах, геометрическими параметрами дефекта, шириной раскрытия трещины, размером пораженной части элемента коррозией, глубиной выбоины. Расширение подкатегорий дефектов внутри каждой категории неисправности способствует более глубокому и точному описанию особенностей дефектов в отличие от существующих методик. Введение расширенной номенклатуры характеристик дефектов уточняет не только границы влияния этих дефектов, но и указывает на возможные отклонения в динамической работе мостовых сооружений.

Анализ экспериментальных результатов исследований позволяет судить об адекватности предложенных механизмов взаимодействия дефектов и динамических характеристик при оперативной оценке эксплуатационного состояния пролетных строений автодорожных мостов.

Нормативные документы при динамических испытаниях во всех странах мира не учитывают влияние какого-либо дефекта на колебательный процесс. Проведенные исследования установили прямую зависимость между динамическими характеристиками (амплитуды собственных и вынужденных колебаний, параметры затухания, динамический коэффициент) и дефектностью элемента мостового сооружения. Экспериментально установлена закономерность влияния дефектов на динамическую работу пролетных строений, особенно в условиях нестационарного случайного транспортного потока.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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.
2. *Картопольцев, В.М.* Evaluation of dynamic characteristics of a bridge span highway bridges in terms of exposure random traffic flow. / В.М. Картопольцев, Н.Н. Бочкарев, А.В. Картопольцев // Cambridge Journal of Education and Science. – 2015. – №2 (14). – V. VI. – С. 521–533.
3. *Компьютерный расчет динамической работы* сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов / В.М. Картопольцев, Н.Н. Бочкарев, А.В. Картопольцев, А.С. Шендель // Наука и образование в XX веке : сб. научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, г. Тамбов 30 сентября 2013 г.: в 34 ч. Ч. 33. – Тамбов : Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 42–45.
4. *Бочкарев, Н.Н.* Техническая диагностика динамической работы пролетных строений при возникновении и развитии дефектов в автодорожных мостах / Н.Н. Бочкарев, А.В. Картопольцев // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации : материалы Международного конгресса. Кн. 2. – Омск : СибАДИ, 2013. – С. 178–183.
5. *Картопольцев, А.В.* Динамические характеристики расчетных моделей сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов / А.В. Картопольцев, Н.Н. Бочкарев, А.С. Шендель // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации : материалы Международного конгресса. Кн. 2. – Омск : СибАДИ, 2013. – С. 187–192.
6. *Картопольцев, В.М.* Динамическая работа пролетных строений при возникновении и развитии дефектов в автодорожных мостах / В.М. Картопольцев, Н.Н. Бочкарев, А.В. Картопольцев // Наука и образование в XXI веке : сб. научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 сентября 2013 г.: в 34 ч. Ч. 33. – Тамбов : Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 20–23.
7. *Картопольцев, А.В.* Исследование колебательного процесса неразрезного сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста на основе численного моделирования и экспериментальных исследований / А.В. Картопольцев, А.С. Шендель // Актуальные вопросы образования и науки: в 14 ч. Ч. 7. – Тамбов : Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2014. – С. 68–71.
8. *Бочкарев, Н.Н.* Мобильный автоматизированный комплекс вибродиагностики автодорожных мостов в условиях стационарного транспортного потока / Н.Н. Бочкарев, А.В. Картопольцев // Proceeding of the 12-th International FASE Symposium «Transport Noise and Vibration». – St-Petersburg, Russia, 1994. – P. 201–203.
9. *Ефимов, П.П.* К вопросу о динамических возмущениях, вызванных движением автомобиля по неровному покрытию проезжей части мостов / П.П. Ефимов // Теоретические и экспериментальные исследования мостов и строительных конструкций. – Омск : СибАДИ., 1970. – С. 65–73.

## REFERENCES

1. *Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D.* Vliyaniye defektov proezzhei chasti na izmeneniye dinamicheskikh kharakteristik proletnykh stroenii mostov [Effect of trafficway defects on dynamic properties of bridge spans] *Vestnik TSUAB*. 2015. No. 6. Pp. 156–164. (rus)
2. *Kartopoltsev V. ., Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V.* Evaluation of dynamic characteristics of a bridge span highway bridges in terms of exposure random traffic flow. *Cambridge Journal of Education and Science*. 2015. V. 6. No. 2. Pp. 521–533.
3. *Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Bochkarev N.N., Shendel A.S.* Komp'yuternyi raschet dinamicheskoi raboty stalezhelezobetonnykh proletnykh stroenii avtodorozhnykh mostov [Computing the dynamic behavior of composite bridges]. Tambov: Biznes-Nauka-Obshchestvo Publ., 2013. Pp. 42–45. (rus)
4. *Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V.* Tekhnicheskaya diagnostika dinamicheskoi raboty proletnykh stroenii pri vozniknovenii i razvitii defektov v avtodorozhnykh mostakh [Technical diagnostics of dynamic behavior of bridge spans with pavement defects]. Omsk: SibADI Publ., 2013. Pp. 178–183. (rus)
5. *Kartopoltsev A.V., Bochkarev N.N., Shendel A.S.* Dinamicheskie kharakteristiki raschetnykh modeli stalezhelezobetonnykh proletnykh stroenii avtodorozhnykh mostov [Dynamic properties of simulation models of composite bridges]. Omsk: SibADI Publ., 2013. Pp. 187–192. (rus)
6. *Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Bochkarev N.N.* Dinamicheskaya rabota proletnykh stroenii pri vozniknovenii i razvitii defektov v avtodorozhnykh mostakh [Dynamic work superstructures at the origin and development of defects in road bridges]. Tambov: Biznes-Nauka-Obshchestvo Publ., 2013. Pp. 20–23. (rus)
7. *Kartopoltsev A.V., Shendel A.S.* Issledovaniye kolebatel'nogo protsessa nerazreznogo stalezhelezobetonno proletnogo stroeniya avtodorozhnogo mosta na osnove chislennogo modelirovaniya i eksperimental'nykh issledovaniy [Oscillation process of composite bridge based on numerical modeling and experimental research]. Tambov: Biznes-Nauka-Obshchestvo Publ., 2013. Pp. 68–71. (rus)
8. *Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V.* Mobil'nyi avtomatizirovannyi kompleks vibrodiagnostiki avtodorozhnykh mostov v usloviyakh stacionarnogo transportnogo potoka [Mobile automated vibration diagnostic system for bridges under continuous traffic flow]. *Proc. 12<sup>th</sup> Int. FASE Symposium 'Transport Noise and Vibration'*. St-Petersburg, 1994. Pp. 201–203. (rus)
9. *Efimov P.P.* K voprosu o dinamicheskikh vozmushcheniyakh, vyzvannykh dvizheniem avtomobilya po nerovnomu pokrytiyu proezzhei chasti mostov [Dynamic loads induced by vehicle movement on defect pavement]. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya mostov i stroitel'nykh konstruksii*. Omsk: SibADI Publ., 1970. Pp. 65–73. (rus)