

УДК 624.21

Ю. С. Иванов, И. И. Снежков, И. В. Чаплин, А. Н. Яшнов

Автоматизация процесса определения усилия в вантовых элементах мостов по частотам собственных колебаний

Приведена информация о разработке усовершенствованной методики определения усилия в натянутых вантовых элементах по частотам собственных поперечных колебаний. Методика прошла апробацию при измерении натяжения вантовых подвесок Бугринского моста в г. Новосибирске и мониторинге усилий в вантах при строительстве моста через р. Иртыш на обходе г. Павлодара (Казахстан). Отмечены особенности методики и проведен анализ динамической работы вантовых элементов в составе мостовых конструкций. Для определения частот собственных колебаний вантовых элементов в режиме свободных колебаний применены тензо- и вибродатчики малогабаритного измерительного комплекса «Тензор МС». Процесс выделения форм собственных колебаний вантовых элементов автоматизирован. Проанализированы параметры характеристик затухания колебаний вантовых элементов. Определены относительные значения диссипации энергии по первым трем формам колебаний вантовых элементов. Для исключения случайных составляющих в спектре частот предложено использовать преобразования исходных виброграмм на основе автокорреляции. Разработан алгоритм по выделению и группированию участков колебаний от «малых» воздействий и фоновых колебаний в отдельные виброграммы. Приведены предпосылки для разработки нового метода преобразования исходного сигнала в спектр частот с разделением на составляющие. Даны предложения по разработке программного обеспечения для автоматизации процесса определения фактических усилий в вантовых элементах. Обоснована необходимость применения в качестве характеристики затухания для конструкций с широким диапазоном частот общего коэффициента затухания. Приведены примеры применения методики как для диагностики, так и при организации комплексной системы мониторинга.

Ключевые слова: диагностика мостов, динамические параметры, вантовый элемент, усилие в вантовом элементе, частота собственных колебаний, мониторинг.

При строительстве мостовых сооружений широко используют конструкции с применением натянутых вантовых элементов, с помощью которых можно обеспечить перекрытие больших и сверхбольших пролетов. Например, в 2014 г. сдан в эксплуатацию Бугринский мост через р. Обь в г. Новосибирске с главным пролетом длиной 380 м комбинированной системы в виде сетчатой арки с гибкими перекрестными вантовыми подвесками (рис. 1) [1, 2]. В 2016 г. закончено строительство моста через р. Иртыш на обходе г. Павлодара (Республика Казахстан), русловое пролетное строение которого запроектировано по схеме $110,5 + 252,0 + 110,5$ м в виде трех сетчатых арок с неразрезной затяжкой (рис. 2) [3].

Эти сложные, нетиповые конструкции требуют проведения дополнительных исследований их работы в реальных условиях эксплуатации. Для таких сооружений целесообразно организовать исследовательский мониторинг напряженно-деформированного состояния как в целом пролетного строения, так и отдельных его элементов, в первую очередь вантовых подвесок, обеспечивающих совместную работу арки и затяжки в комбинированной системе. Существующие методы контроля усилия в вантах не

в полной мере обеспечивают возможность оперативно определить усилия натяжения и их изменения в процессе эксплуатации сооружения. Сотрудники НИЛ «Мосты» СГУПС разработывают усовершенствованную методику контроля усилий в вантах по частотам собственных колебаний [4, 5], развивая методы динамической диагностики с применением автоматизированного комплекса «Тензор МС» собственной разработки [6].

Методика [4, 5] разработана при строительстве Бугринского моста. В ходе исследований было проанализировано влияние различных факторов на определение частот собственных колебаний вантовых элементов [5]. В результате проведенных экспериментов в разработанной методике нашли отражение следующие особенности:

- при измерениях для возбуждения колебаний и определения собственных частот колебаний подвесок используется метод «малых» воздействий;
- фиксация колебаний осуществляется датчиком-акселерометром, устанавливаемым на анкере затяжки, в горизонтальной плоскости в направлении поперек оси моста;



Рис. 1. Общий вид главного пролета Бугринского моста (г. Новосибирск)

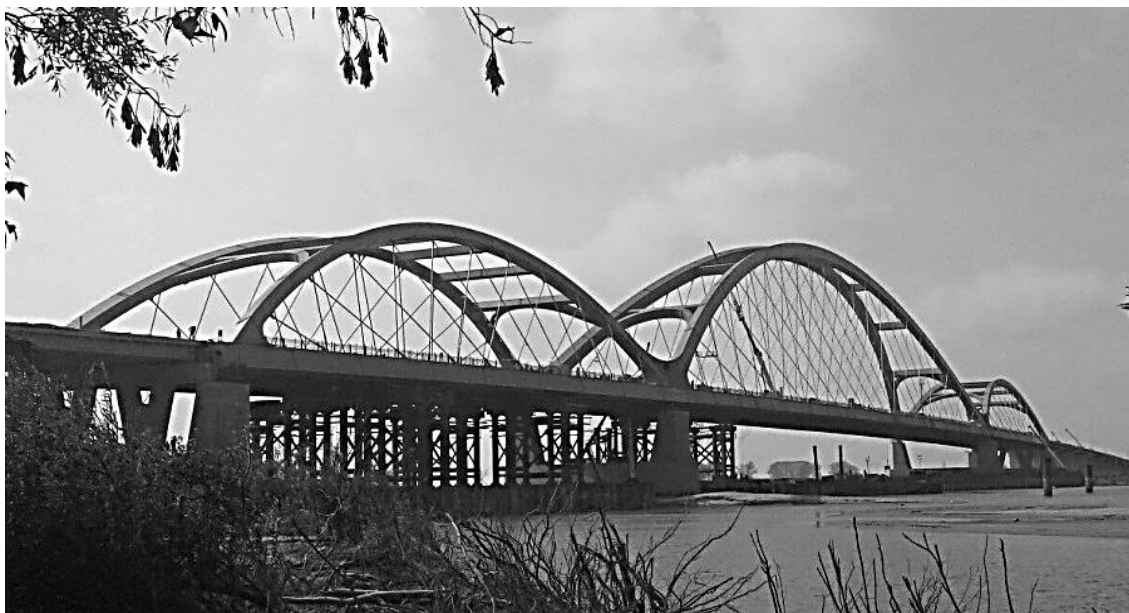


Рис. 2. Общий вид руслового пролетного строения моста через р. Иртыш на обходе г. Павлодара

– влияние анкера учитывается введением удлинения подвески на расчетную длину анкера, а антивандальной оболочки – добавлением к погонной массе подвески массы оболочки с анкером;

– для получения усилия в подвеске берется среднее усилие, рассчитанное по первым трем зафиксированным низшим кратным частотам;

– собственные частоты вантовых подвесок определяются в неавтоматическом режиме.

После сдачи Бугринского моста в эксплуатацию в рамках периодического мониторинга

проведены дополнительные исследования динамической работы вантовых элементов в составе арочного пролетного строения. Отмечено, что чувствительными тензодатчиками [6], установленными на анкер, хорошо фиксировать низшие частоты собственных колебаний вантовых элементов, а частоты больше 2 Гц лучше выделять с помощью датчиков-акселерометров.

Учитывая, что ванты могут иметь различное конструктивное исполнение (рис. 3 и 4), не всегда есть возможность применить тензодатчики. Например, на анкерах затяжки рус-

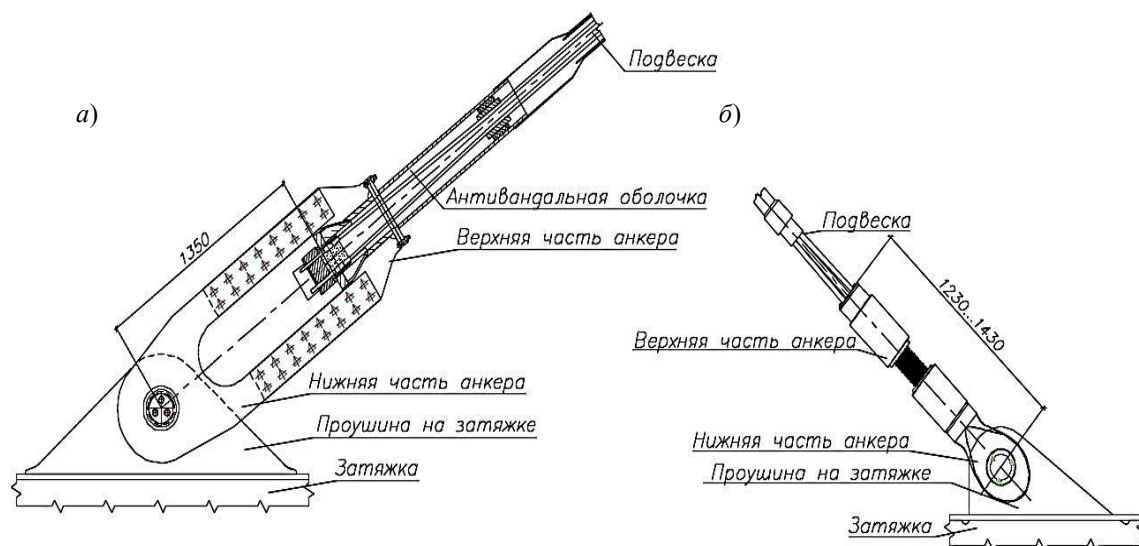


Рис. 3. Конструкции анкеров на затяжке:

а – на Бугринском мосту через р. Обь в г. Новосибирске; *б* – на мосту через р. Иртыш на обходе г. Павлодара

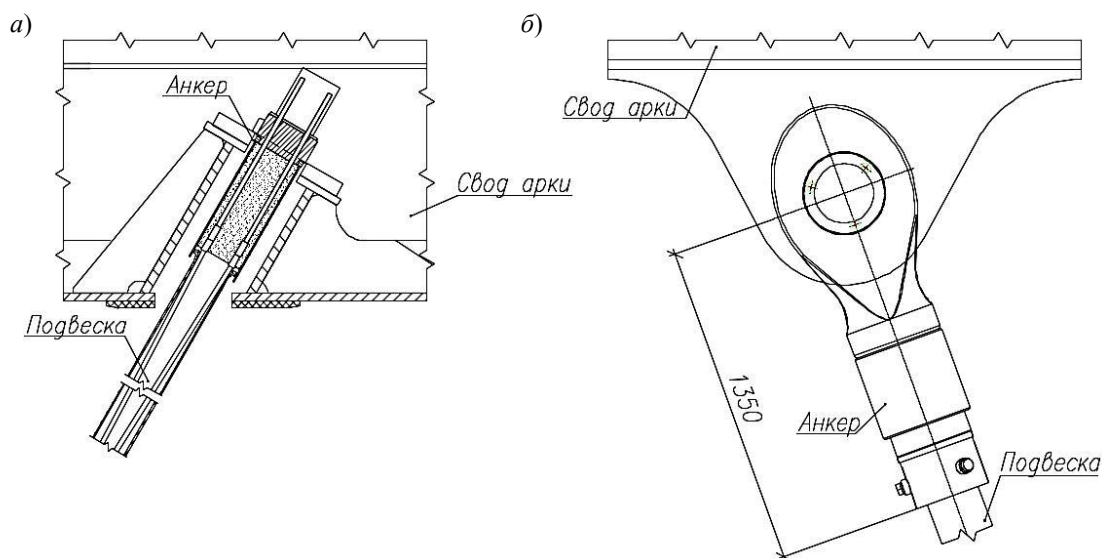


Рис. 4. Конструкции анкеров на своде арки:

а – на Бугринском мосту через р. Обь в г. Новосибирске; *б* – на мосту через р. Иртыш на обходе г. Павлодара

лового пролетного строения моста на обходе г. Павлодара сооружены защитные антивандальные конструкции, не позволяющие установить тензометры на рабочей конструкции анкера. Кроме того, необходимо учитывать разные расчетные длины анкеров и длины самих вант (на Бугринском мосту 156 вант длиной от 8,22 до 82,53 м, на мосту на обходе г. Павлодара 172 ванты длиной от 4,80 до 49,39 м). Большое количество самих вантовых элементов и их собственных частот колебаний требует значительных затрат времени при обработке результатов измерений в неавтомати-

ческом режиме, т. е. необходима автоматизация процесса выделения собственных кратных частот колебания вант.

Автоматизация процесса выделения собственных частот колебаний позволяет ускорить процесс обработки результатов измерений (рис. 5), в том числе оценить диссипацию энергии колебаний и демпфирование. При анализе диссипации энергии колебаний используется свойство кратности собственных частот поперечных колебаний натянутой нити: сравнивается величина первой частоты собственных колебаний вантовой подвески

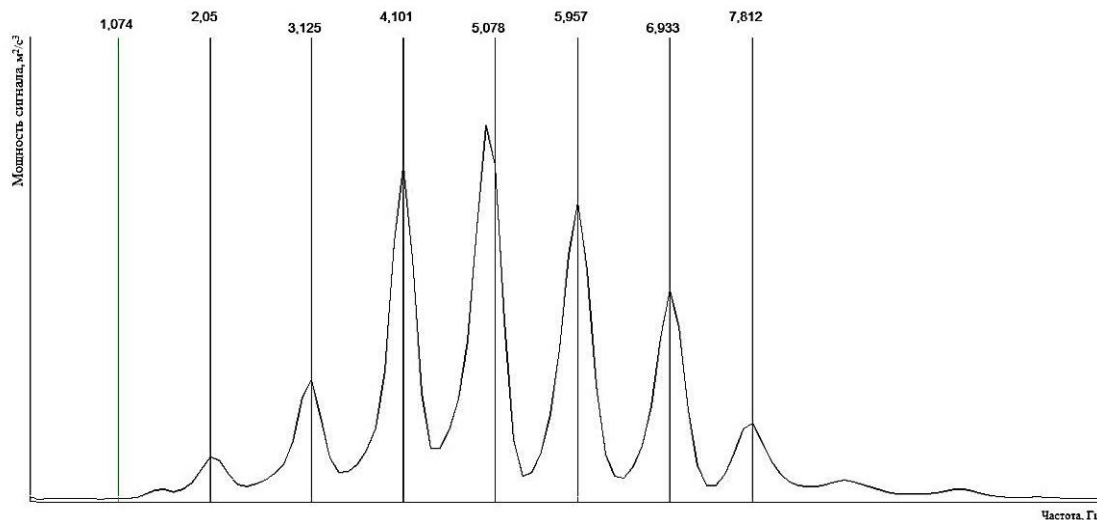


Рис. 5. Пример автоматизированного определения частот собственных колебаний вантовых подвесок

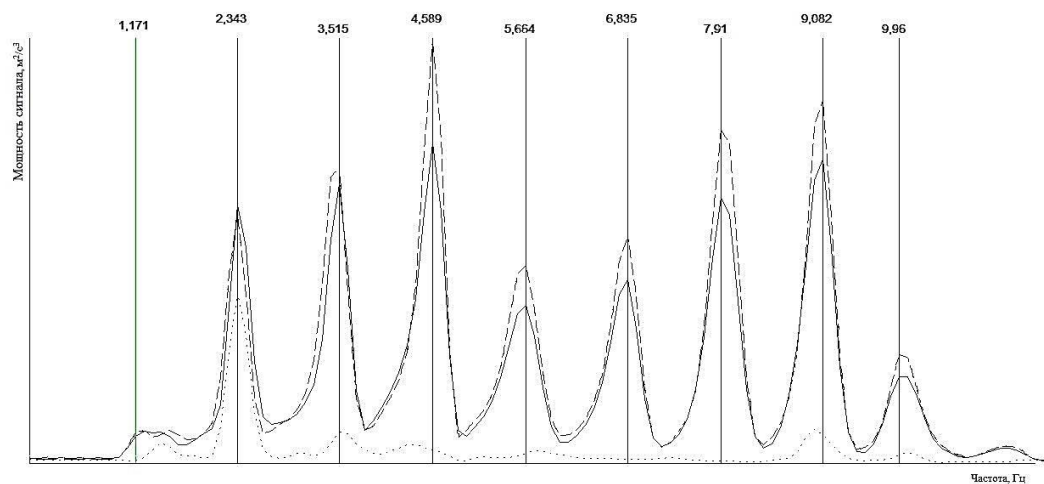
с последующими, деленными каждая на свой порядковый номер. Заметим, что полученные значения должны уменьшаться с увеличением порядкового номера, так как чем выше частота, тем больше рассеивание энергии. Однако при близких значениях частот собственных колебаний вантовых подвесок с фоновыми частотами колебаний (частота колебаний пролетного строения, внешние периодические воздействия и пр.) может происходить смещение частоты собственных колебаний в сторону фоновых значений, что затрудняет определение истинной собственной частоты. В целом по результатам исследований зафиксировано снижение частот собственных колебаний высших форм: для второй частоты в среднем на 3 %, для третьей – на 5,5 %. Однако на отдельных вантах, наоборот, отмечено увеличение частот собственных колебаний: для второй частоты в среднем на 2 %, для третьей – на 2,5 %. Поэтому основной сложностью стала необходимость автоматически разделить близкие частоты и, соответственно, виброграммы колебаний по частотам.

Наличие шумовых воздействий широкого спектра частот может приводить к выделению «ложных» частот, близких к истинным собственным частотам вантового элемента. В результате возможно появление дополнительных погрешностей в определении усилия (до 5 % случаев из общего числа измерений). Для уменьшения фоновых составляющих в спектрах частот предложено два следующих алго-

ритма. С помощью первого алгоритма выделяются и группируются участки «малых» воздействий в отдельную виброграмму с последующим определением спектра частот с помощью преобразования Фурье (рис. 6). А второй заключается в автокорреляции виброграмм. При получении спектра частот с автокоррелированной виброграммы случайные недлительные воздействия отфильтровываются и более выраженными оказываются собственные частоты колебаний (рис. 7).

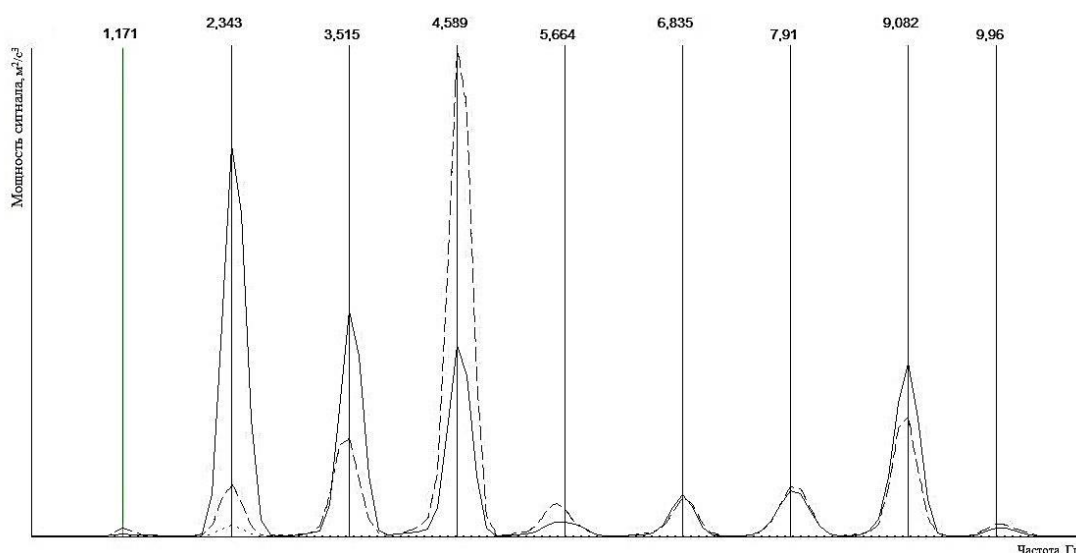
Основными «шумовыми» составляющими спектра частот колебаний для вантовых подвесок являются вертикальные частоты собственных колебаний балки жесткости пролетного строения. Значительное влияние частот вертикальных колебаний пролетного строения зафиксировано на длинных (50...80 м) вантах, расположенных в середине пролета. «Малые» воздействия [5] в данном случае не позволяют создать амплитуды колебаний ванты в горизонтальной плоскости моста, достаточные для выделения их на фоне значительных вертикальных амплитуд колебаний балки жесткости, вызываемых фоновыми воздействиями (например, ветром, проезжающим автотранспортом и т. п.).

Рассмотрено несколько вариантов решения данной проблемы. Во-первых, проведение измерений при отсутствии на мосту транспорта, вызывающего значительные колебания пролетного строения. Однако это сложно осуществить в реальных условиях эксплуатации



- — — — — график спектра частот исходной виброграммы;
- - - - - график спектра частот исходной виброграммы сгруппированных участков «малых» воздействий;
- спектр частот исходной виброграммы фоновых колебаний

Рис. 6. Спектр частот исходной виброграммы



- — — — — график спектра частот автокоррелированной виброграммы;
- - - - - график спектра частот автокоррелированной виброграммы сгруппированных участков «малых» воздействий;
- спектр частот автокоррелированной виброграммы фоновых колебаний

Рис. 7. Спектры частот автокоррелированной виброграммы

городских и автодорожных мостов. Во-вторых, использование фильтра для удаления собственных частот пролетного строения из спектра частот вант. Но в этом случае при совпадении частот собственных колебаний вантовых подвесок с частотами вертикальных колебаний пролетного строения можно удалить важные данные и получить ошибочные результаты. Только разделив виброграмму колебаний на составляющие, можно избавиться от

«шума» в спектре частот. Такое разделение также поможет достовернее определять характеристики затухания колебаний, особенно при наличии в спектре близких частот.

Обычно для пролетных строений в качестве характеристики затухания используют логарифмический декремент затухания ∂ [7–10], определяемый по формуле

$$\partial = \frac{1}{N} \ln \frac{A_n}{A_{n+N}}, \quad (1)$$

где N – количество волн на участке затухания; A_n – начальная амплитуда; A_{n+N} – конечная амплитуда.

Количество волн N при этом должно быть определено для одной частоты, на которой волновой график идеализирован и не имеет помех. Однако при сложении близких частот затруднительно определить количество волн N между начальной амплитудой A_n и конечной амплитудой A_{n+N} участка затухания при определении логарифмического декремента затухания. Конечно, можно попробовать разделить спектр частот на составляющие частоты с помощью фильтра низших и высших частот и определить для каждой ее собственный логарифмический декремент затухания. Но при этом значение логарифмического декремента будет определено с большими погрешностями, поскольку применяемые преобразования на основе разложения в ряд Фурье имеют «лепесток» (область в пределах пика) для каждой частоты. Например, на рис. 6 для частоты 2,343 Гц ширина «лепестка» составит около 0,6 Гц (на уровне 20 % от значения мощности сигнала). Следовательно, значения частот будут получены с погрешностями. Также выделение логарифмического декремента для каждой частоты не будет характеризовать общую скорость затухания конструкции. Поэтому

вместо логарифмического декремента затухания для пролетных строений мостов и их элементов решено использовать общий коэффициент затухания β , определяемый по следующей формуле (рис. 8):

$$\beta = \ln \frac{A_n}{A_k} / \Delta t, \quad (2)$$

где A_n – максимальная начальная амплитуда на участке затухания; A_k – минимальная конечная амплитуда; $\Delta t = t_k - t_n$ – время затухания (t_k – время в точке A_k , конец участков на рис. 8; t_n – время в точке A_n , начало участков на рис. 8).

В процессе проведения исследований изучены дополнительные факторы, влияющие на результаты измерений. Одним из таких факторов является хаотичность движения транспортного потока, создающая шумовые помехи при записи виброграмм колебаний. На основе анализа результатов измерений усилий в вантовых элементах экспериментально получено минимально необходимое время фиксации динамических параметров (длина записи) 90 с, обеспечивающее возможность выделения собственных частот колебаний (рис. 9, а). В дальнейшем планируется разработка автоматизации процесса измерений усилий для комплексной системы мониторинга (см. рис. 9, б).

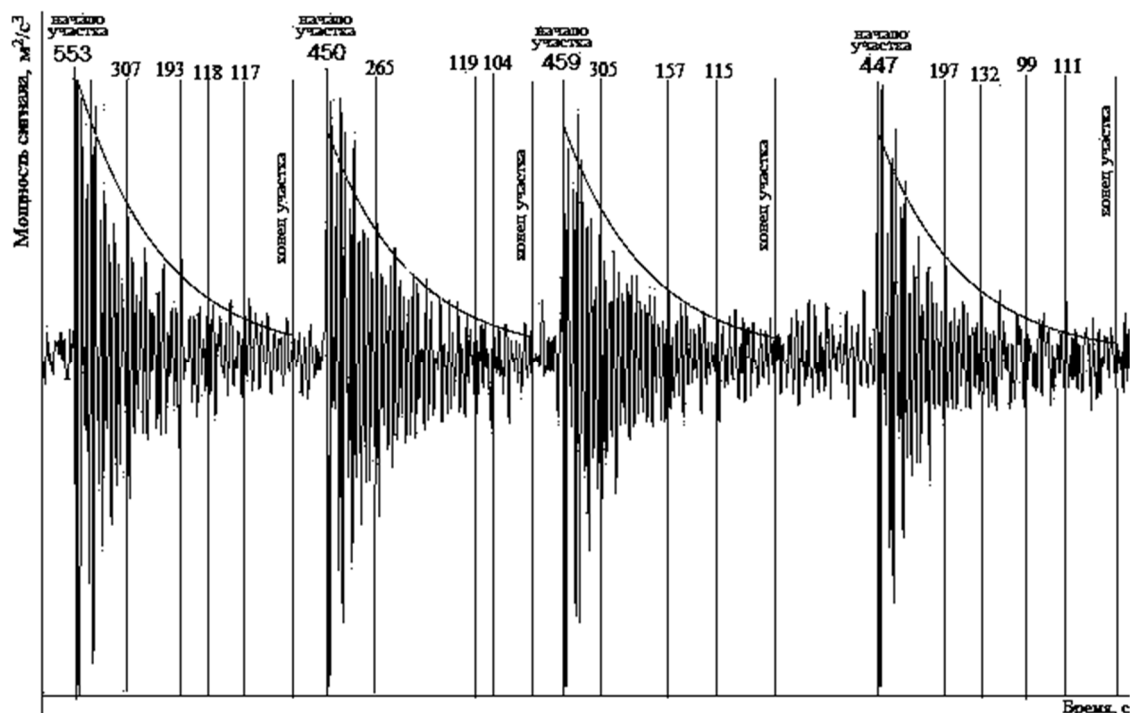
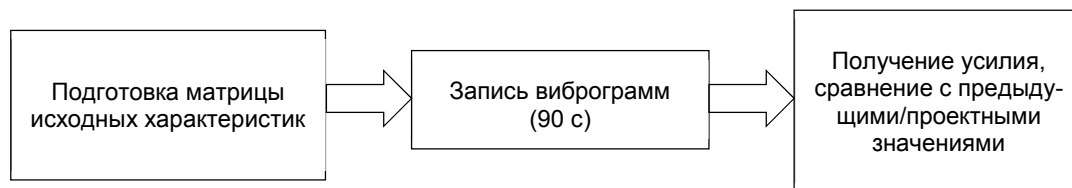


Рис. 8. Пример автоматизированного выделения участков затухания после «малых» воздействий

а)



б)

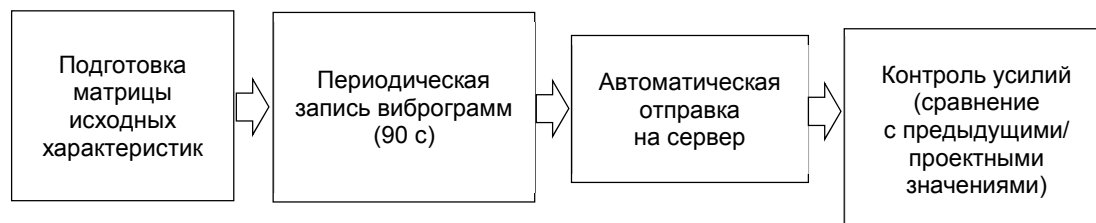


Рис. 9. Варианты применения методики определения усилий в натянутых вантовых подвесках по частотам их собственных колебаний:

а – схема работы в полевых условиях; б – схема работы в процессе мониторинга

Результаты исследований свидетельствуют о сложной динамической работе вантовых элементов в составе мостовых конструкций. Выполненные исследования позволили усовершенствовать методику определения усилия натяжения в вантовых элементах по частотам собственных колебаний. Предложены алгоритмы для автоматизации процесса обработки и повышения точности определения собственных частот колебаний вантовых подвесок. Особенно следует выделить алго-

ритм для разделения спектра собственных частот и фоновых/внешних частот. Такой подход позволяет выделить посторонние притоки внешней случайной энергии и исключить их влияние на спектр частот. Предложенные алгоритмы для автоматизации процесса обработки позволят осуществлять мониторинг по динамическим параметрам в режиме реального времени и могут быть использованы не только для вантовых элементов, но и для мостовых конструкций в целом.

Библиографический список

1. Предпусковое обследование, испытания и паспортизация мостовых сооружений по титулу «Мостовой переход через р. Обь по Оловозаводскому створу в г. Новосибирске. Участок от ПК 83+70 до ПК 138+52.57». Бугринский мост через р. Обь: Заключительный научно-технический отчет / Сиб. гос. ун-т путей сообщения; Рук. А. Н. Яшнов; Отв. исполн. И. И. Снежков, И. В. Чаплин и др. Новосибирск, 2014. 194 с.
2. Технический отчет по мониторингу напряженно-деформированного состояния конструкций арочного пролетного строения в процессе надвижки свода арочного пролетного строения протяженностью 380 п. м. по объекту: «Мостовой переход через р. Обь по Оловозаводскому створу в г. Новосибирске» (завершение работ) / Сиб. гос. ун-т путей сообщения; Рук. А. Н. Яшнов; Отв. исполн. И. И. Снежков, И. В. Чаплин и др. Новосибирск, 2014. 60 с.
3. Исполнительные съемки при проведении мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций моста через р. Иртыш в составе объекта «Строительство (реконструкция) автомобильной дороги «Обход г. Павлодар», 3 участок – Мостовой переход через реку Иртыш с регуляционными сооружениями» / Сиб. гос. ун-т путей сообщения; Рук. А. Н. Яшнов; Отв. исполн. И. И. Снежков, И. В. Чаплин и др. Новосибирск, 2016. 17 с.
4. Пат. 2613484 Российская Федерация. МПК G 01L 1/10, G01L 5/04. Способ определения усилий натяжения вантового элемента моста / Яшнов А. Н., Чаплин И. В., Снежков И. И. [и др.]; Заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщения. № 2015134616; Заявл. 17.08.2015; Оpubл. 16.03.2017, Бюл. № 6. 2 с.
5. Поляков С. Ю., Чаплин И. В., Яшнов А. Н. Методика определения напряженно-деформируемого состояния вантовых подвесок Бугринского моста через р. Обь // Справочник инженера. 2014. № 10. С. 56–63.
6. Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО / И. И. Снежков, А. В. Слюсарь, А. Н. Яшнов и др. // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 9. С. 25.

7. Чаплин И. В. Вибродиагностика мостовых сооружений и их элементов / Рук. А. Н. Яшнов // Наука и молодежь СГУПС в третьем тысячелетии: Сб. науч. ст. аспирантов-стажеров. 2015. № 4. С. 56–63.
8. Динамика железнодорожных мостов / Н. Г. Бондарь, И. И. Казей, Б. Ф. Лесохин и др. М.: Транспорт, 1965. 412 с.
9. Зусман Г. В., Барков А. В. Вибродиагностика. М.: Спектр, 2011. 215 с.
10. ГОСТ Р 54859–2011. Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний. М.: Стандартинформ, 2012. 19 с.

Y. S. Ivanov, I. I. Snezhkov, I. V. Chaplin, A. N. Yashnov

Automation Process of Determining the Force in the Cable Elements of Bridges Over Own Frequencies of Vibrations

Abstract. Provides information on the development of an improved method of determining the forces in the tensioned cable elements own frequencies of transverse vibrations. The technique has been tested in the measurement of the tension of cable-stayed suspension Bugrinskiy Bridge in Novosibirsk and monitoring efforts in the cables during the construction of the bridge over the Irtysh River on the bypass of Pavlodar, Kazakhstan. Marked features of the technique and the analysis of the dynamic operation of cable elements in the bridge structures. To determine the natural frequencies of the suspension elements in the free vibration mode was applied tenzosensors and small-sized vibration sensors measuring complex "Tensor MS". The process of allocation of forms of natural oscillations of the suspension elements is automated. Analyzed parameters of cable elements vibration attenuation characteristics. Defined relative value of energy dissipation by the first three mode shapes of cable-stayed elements. To eliminate the random components in the frequency spectrum of the proposed use transform the original vibrogram based on autocorrelation. The algorithm for the selection and grouping of plots varying from "small effects" and background oscillations in individual vibrogram was worked out. Given the preconditions for the development of a new method of converting the original signal in the frequency range with the separation of the components. Offered to develop software to automate the process of identifying the actual effort in the cable elements. Justified the need to use the attenuation characteristics for structures with a wide frequency range total attenuation coefficient. Provided examples of application methods for both the diagnosis and in the organization of integrated monitoring system.

Key words: *diagnostics of bridges; the dynamic parameters; cable-stayed element; the force in the cable-stayed element; natural frequency; monitoring.*

Иванов Юрий Сергеевич – студент 1-го курса факультета «Бизнес-информатика» СГУПС. E-mail: nosdormas95@gmail.com

Снежков Игорь Иванович – старший научный сотрудник НИЛ «Мосты» НИДЦ СГУПС. E-mail: igor.i.s@mail.ru

Чаплин Иван Владимирович – аспирант кафедры «Мосты», инженер-технолог 1-й категории НИЛ «Мосты» НИДЦ СГУПС. E-mail: ivannumber1_chaplin@mail.ru

Яшнов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты» СГУПС, ведущий научный сотрудник НИЛ «Мосты» НИДЦ СГУПС. E-mail: yan@stu.ru