

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА
ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Корниенко-Мифтахова И.К., Филоненко С.Ф.

Введение

Мостовые конструкции, в процессе их эксплуатации, испытывают периодические воздействия случайных, как статических, так и динамических нагрузок. Последние обусловлены, например, движением транспортных средств, имеющих различные массы и скорости движения, ветровыми потоками и другими факторами. Естественно, что такие нагрузки приводят не только к развитию дефектов структуры и изменению динамических характеристик конструкций, но и являются источниками возбуждения в них вынужденных и собственных колебаний. При этом в зависимости от условий воздействия, возможно возникновение таких ситуаций, которые ведут, как к возрастанию не контролируемым образом амплитуд возникающих колебаний на резонансных частотах, так и к их перераспределению по модам колебаний. Подобные ситуации являются не штатными режимами работы конструкций, которые, в конечном итоге, могут быть причиной потери их несущей способности. Для предотвращения этого проводятся периодические обследования и испытания мостовых конструкций, по результатам которых формируются заключения об их техническом состоянии [1, 2].

Одним из видов проводимых испытаний являются динамические испытания, в процессе выполнения которых регистрируются вынужденные и собственные колебания мостовых конструкций с использованием различных типов датчиков – тензорезисторных, пьезокерамических, индукционных и других [3]. Регистрируемые колебания выводятся на самописцы для последующего анализа [3] и определения их параметров или обрабатываются электронной аппаратурой – специализированными приборами, а так же измерительными системами [4, 5, 6]. При этом в зависимости от типа датчика, определяющего его частотный диапазон, чувствительность и другие характеристики, возможна регистрация и анализ сигналов ускорения, скорости и смещения.

Обработка сигналов, как собственных, так и вынужденных колебаний позволяет получать достаточно широкий набор параметров, характеризующих динамическое поведение испытываемых конструкций. Так, например, в работе [7] показано, что при использовании индукционного датчика скорости по анализу параметров регистрируемого сигнала колебаний, а так же его спектра можно определять: амплитуду скорости, период и частоту колебаний (резонансную частоту и частоты отдельных мод), затухание, добротность, декремент затухания, амплитуду смещения. Однако при проведении испытаний мостовых конструкций, как правило, осуществляется обработка и анализ ограниченного набора параметров собственных и вынужденных колебаний. В качестве таких анализируемых параметров, в основном, используют резонансную частоту (частоты мод колебаний) и коэффициент затухания (относительное затухание, скорость затухания) [5, 8]. При этом о состоянии конструкции судят по результатам сравнения полученных экспериментальных и теоретических расчетных величин, значения которых не должны иметь отклонения друг от друга, более чем на 20% [2, 9].

Вместе с тем, как показывают результаты исследований [10], одновременное использование всех трех видов сигналов (ускорения, скорости и смещения), регистрируемых во времени, позволяет значительно расширить возможности традиционных методов анализа динамических характеристик конструкций. В первую очередь, это касается нелинейного их поведения или отклонения от заданного. Кроме того, широкий набор параметров обеспечивает возможность формирования изначального “динамического образа”

(паспорта) конструкций, т.е. определять начальные реперные точки отсчетов. Это чрезвычайно важно, как с точки зрения диагностики, так и с точки зрения мониторинга их состояния. Решение подобных задач требует разработки информационно-измерительных систем (ИИС), позволяющих обрабатывать широкий набор параметров сигналов колебаний при использовании всех трех типов датчиков - ускорения, скорости и смещения.

В работе рассматриваются принципы и структура построения ИИС для исследования динамических характеристик конструкций. Показано, что приоритетность программных средств обеспечивает возможность унификации ИИС с адаптацией под тип датчика, используемого для регистрации возникающих колебаний. Так же будут рассмотрены результаты испытаний мостовой конструкции с использованием разработанной ИИС.

Структура построения информационно-измерительной системы для анализа динамических характеристик конструкций

Возможности средств вычислительной техники и современных технологий LabCard позволяют решать задачи по созданию специализированных ИИС с гибкой системой управления, обработки, анализа информации и представления ее результатов. Средства технологии LabCard являются мощными инструментальными средствами, предназначенными для создания измерительных мини лабораторий, систем управления и контроля. Они содержат элементы, необходимые для ввода-вывода аналоговой и цифровой информации в персональный компьютер (ПК), такие как: аналого-цифровые преобразователи (АЦП), цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), счетчики таймеры и другие. Размещение таких инструментальных средств или портов ввода-вывода (ПВВ) на шине ПК обеспечивает сочетание преимуществ цифрового ввода информации с возможностью последующей ее широкой математической обработки. При этом значительно расширяется объем анализируемой информации, скорость ее обработки, а так же принципы и возможности представления результатов анализа.

Все элементы ПВВ имеют программный доступ в управлении, что обеспечивает возможность управления и процессами измерений. Это позволяет перераспределять функции между аппаратными и программными средствами с оптимизацией их структуры, что, в первую очередь, касается минимизации структуры внешних электронных средств (рис.1), работающих по жесткому неизменному алгоритму (внешние электронные средства по отношению к ПК). Структура таких систем может формироваться в одном из следующих основных вариантов. При достаточном уровне выходного сигнала первичного преобразователя (ПП, рис.1) он непосредственно может быть подключен к входу ПВВ. ПВВ осуществляет преобразование сигнала в цифровой код, а последующая его обработка, включая и операции выделения полезного сигнала на фоне помех, производится в персональном компьютере с использованием программных средств (I, рис.1). Если уровень сигнала низкий по отношению к входной чувствительности ПВВ, то в структуре системы может использоваться усилительный тракт (УТ, рис.1), а дальнейшее преобразование и обработка сигнала (II, рис.1) осуществляется, как и в предыдущем случае. Возможен также и вариант использования блока предварительной обработки информации (БПОИ, рис.1) или предварительной обработки регистрируемых сигналов. Например, интеграторы непосредственно встроенные в датчик ускорения для получения сигнала скорости или смещения. Однако, независимо от этого дальнейшее преобразование и обработка информации осуществляется с использованием программных средств, которые во всех случаях имеют приоритетное значение.

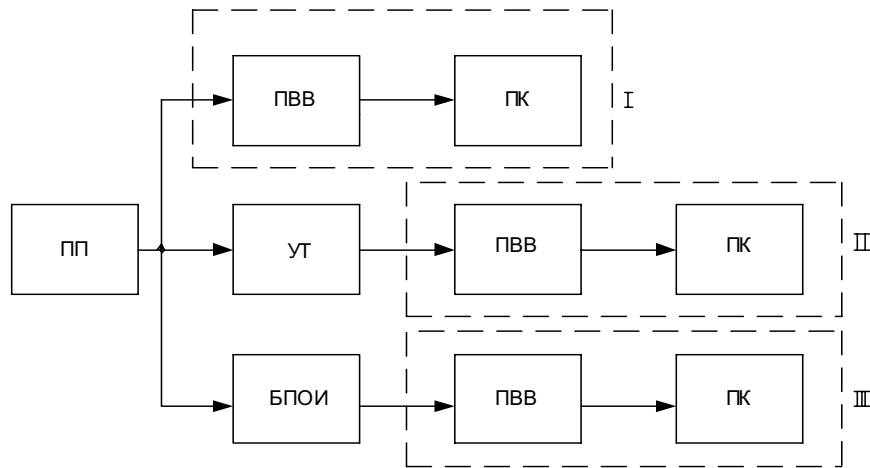


Рис.1. Структуры построения информационно-измерительных систем: ПП - первичный преобразователь; ПВВ - порт ввода-вывода аналоговой и цифровой информации; ПК - персональный компьютер; УТ - усилительный тракт; БПОИ – блок предварительной обработки информации

Приоритет программных средств имеет значительные преимущества, обеспечивающие возможность построения гибких алгоритмов управления всеми элементами систем, а так же обработки информации, ее анализа и вывода результатов. При этом изменение (модификация) программного математического обеспечения или алгоритмов обработки информации возможно осуществлять без изменения внутренней электронной конфигурации систем. Следует также подчеркнуть, что приоритет программных средств позволяет формировать гибкие графические интерфейсы управления системами, контроля состояния их параметров, процессами измерений, процессами прохождения информационных потоков, а также создавать базы данных по результатам проведенных испытаний. Наличие последних, в виде файловых структур, является не только протоколом испытаний, но и обеспечивает возможность неоднократной вторичной обработки хранящейся информации. При этом организация внутренней структуры измерительной системы определяется ее назначением и решаемыми задачами согласно принятой логике преобразования и прохождения информационных потоков.

В соответствии со сказанным общая структура построения ИИС для исследования характеристик колебаний конструкций приведена на рис.2. Внешними элементами системы являются первичные преобразователи механических колебаний в электрический

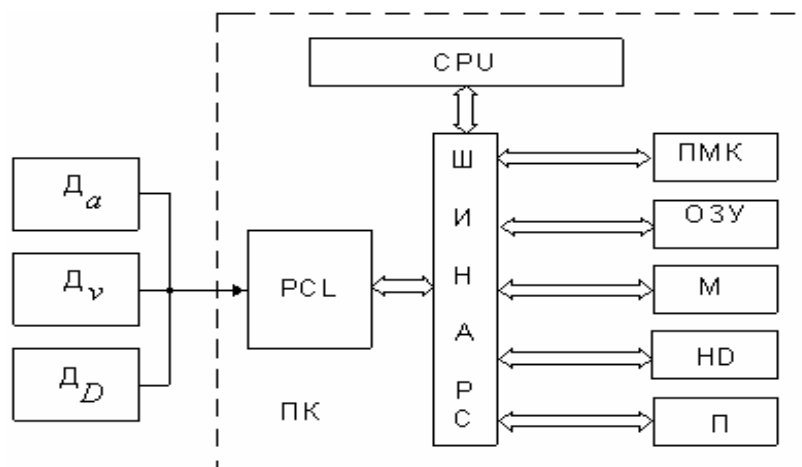


Рис.2 Структура построения информационно-измерительной системы для исследования характеристик колебаний конструкций: D_a - датчик ускорения; D_v - датчик скорости; D_D - датчик смещения; PCL – порт ввода-вывода информации; CPU – процессор; ОЗУ –

оперативное запоминающее устройство; М – монитор; HD – жесткий диск; П – принтер; ПК – персональный компьютер; ПМК – программный математический комплекс сигнал – датчики ускорения, скорости и смещения (D_a, D_v, D_D). Сигнал на их выходе имеет достаточный уровень, что позволяет проводить их непосредственное подключение к ПВВ, размещенному на шине ПК. Управление ПВВ, как и остальными элементами ПК осуществляется программными средствами или программным математическим комплексом (ПМК, рис.2). Фактически проведение процесса измерения, выполнение операций обработки, анализа результатов и их вывод на экран монитора осуществляется только программными средствами. При этом ПМК является интегрированной средой, в которой обеспечивается не только управление элементами системы но и выполнение различных системных функций. Например, поиск, удаление, копирование переименование файлов, просмотр каталогов дисков и других. Весь комплекс выполняемых операций поддерживается через графический интерфейс управления (пользователя). Он имеет многоуровневую организацию с разветвленной архитектурой переходов, что обеспечивает возможность формирования многооконных представлений информации, как по параметрам состояния системы, так и по выполняемым операциям. При этом после выполнения отдельных операций и вывода результатов формируются мини интерфейсы управления, позволяющие проводить экранный графический анализ полученных зависимостей (данных). На рис.3, а показан фрагмент работы ПМК по формированию программного графического интерфейса управления, а на рис.3, б – представление результата работы программы по обработке спектра синусоидального сигнала частотой 10 Гц.

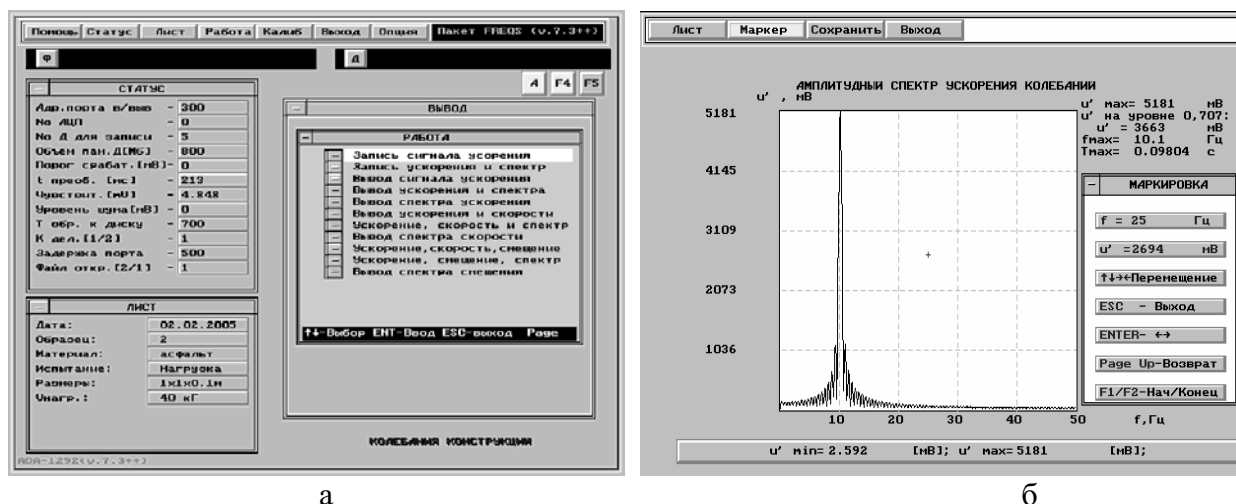


Рис.3. Фрагменты работы программного математического комплекса ИИС: а – общий вид программного графического интерфейса управления; б – результат работы программы по обработке спектра синусоидального сигнала частотой 10 Гц

При проведении испытаний конструкций, обработка и анализ входных сигналов осуществляется с определением параметров регистрируемых колебаний, как по их формам, так и по спектрам. Широкое использование графического экранного анализа выводимых зависимостей позволяет проводить исследования особенностей развивающихся колебаний, которые обусловлены видом динамического воздействия на конструкцию: ударная нагрузка, динамическая перемещаемая нагрузка и т.д. При этом вид применяемой обработки задается автоматически, в зависимости от типа датчика, используемого для регистрации колебаний – датчик ускорения, скорости или смещения. Они же определяет и количество анализируемых параметров. В то же время, использование математических операций, реализующих определенные технологии перехода от ускорения к скорости и смещению, позволяет получать полный набор параметров, необходимых для анализа ди-

намического поведения конструкций. Кроме того, обработка регистрируемых сигналов колебаний, производится с учетом корректировки амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) первичных преобразователей. Данная корректировка осуществляется в области нижних частот и связана с нелинейностью АЧХ датчиков. Такая корректировка обеспечивает не только расширение частотного диапазона анализируемых собственных и вынужденных колебаний, но и повышает достоверность определения их параметров. Так, например, для индукционных датчиков скорости, как показали исследования [11], в области частот ниже резонансной частоты f_m датчика (значение частоты, начиная с которой его АЧХ носит линейный характер) зависимость изменения его коэффициента преобразования описывается выражением вида

$$K_{II} = kf_m^2, \quad 0 < f \leq f_m \quad (1)$$

где k - коэффициент пропорциональности; f_m - резонансная частота.

С учетом коэффициента преобразования K_{II} на резонансной частоте f_m выражение (1) будет иметь вид

$$K_{II} = \frac{K_{II_m}}{f_m^2} f^2. \quad 0 < f \leq f_m \quad (2)$$

Значения f_m и K_{II_m} являются стандартизированными для конкретного типа и марки выпускаемых датчиков. Например, для датчика скорости типа СВ-10Ц они равны: 10 Гц и 19,5 В/м/с. При известных значениях параметров датчиков алгоритмы обработки регистрируемых сигналов колебаний построены таким образом, что анализ их параметров осуществляется только после проведения корректировки коэффициента преобразования, в соответствии с (2).

Метрологическая аттестация разработанной системы показала, что ошибка изменения частоты по спектрам эталонных сигналов в диапазоне частот до 200 Гц не превышает 1%, а ошибки измерения амплитудно-временных параметров сигналов не превышают 0,5%.

Результаты экспериментальных исследований

С использованием разработанной ИИС проводились испытания различного типа мостов: бетонные, железобетонные, вантовые. Результаты проведенных испытаний показали высокую эффективность системы, позволяющей получать большой объем информации, характеризующей динамическое поведение мостовых конструкций, а так же значительно сократить сроки на подготовку и проведение их диагностики. Рассмотрим фрагменты полученных результатов.

Одним из мостов, испытания которого проводили после завершения его строительства, являлся мост, представляющий собой конструкцию, состоящую из шести металлических несущих балок Т-образной формы. Балки связаны между собой жесткими поперечными металлическими соединениями (рис.4, а). Сверху на металлических несущих балках уложено сплошное бетонное, а затем асфальтовое покрытия. Общие габаритные размеры моста составляли: длина пролета 58 м и ширина 17 м.

Исследования состояния мостовой конструкции осуществлялись в процессе проведения его полномасштабных испытаний с использованием статических и динамических видов нагружения, а так же различных систем технической диагностики, одной из которых являлась разработанная система анализа динамических характеристик. Для возбуждения вынужденных и собственных колебаний конструкции использовали два стандартных вида динамического воздействия: проезд груженого грузового автомобиля типа КРАЗ по центральной части моста с различной скоростью, а так же переезд груженого грузового автомобиля типа КРАЗ с различной скоростью через порожек высотой 100 мм (рис.4, б). В первом случае осуществлялось возбуждение вынужденных колебаний, а во втором случае при наличии динамического удара возбуждались и свободные колебания. Масса гружено-

го автомобиля составляла 250 кН, а скорость его движения изменялась в пределах от 5 км/час до 20 км/час.

Для регистрации и преобразования возникающих механических колебаний в электрический сигнал использовали стандартный индукционный датчик скорости вертикальных перемещений типа СВ-10Ц с резонансной частотой 10 Гц. Датчик устанавливался на ниж-

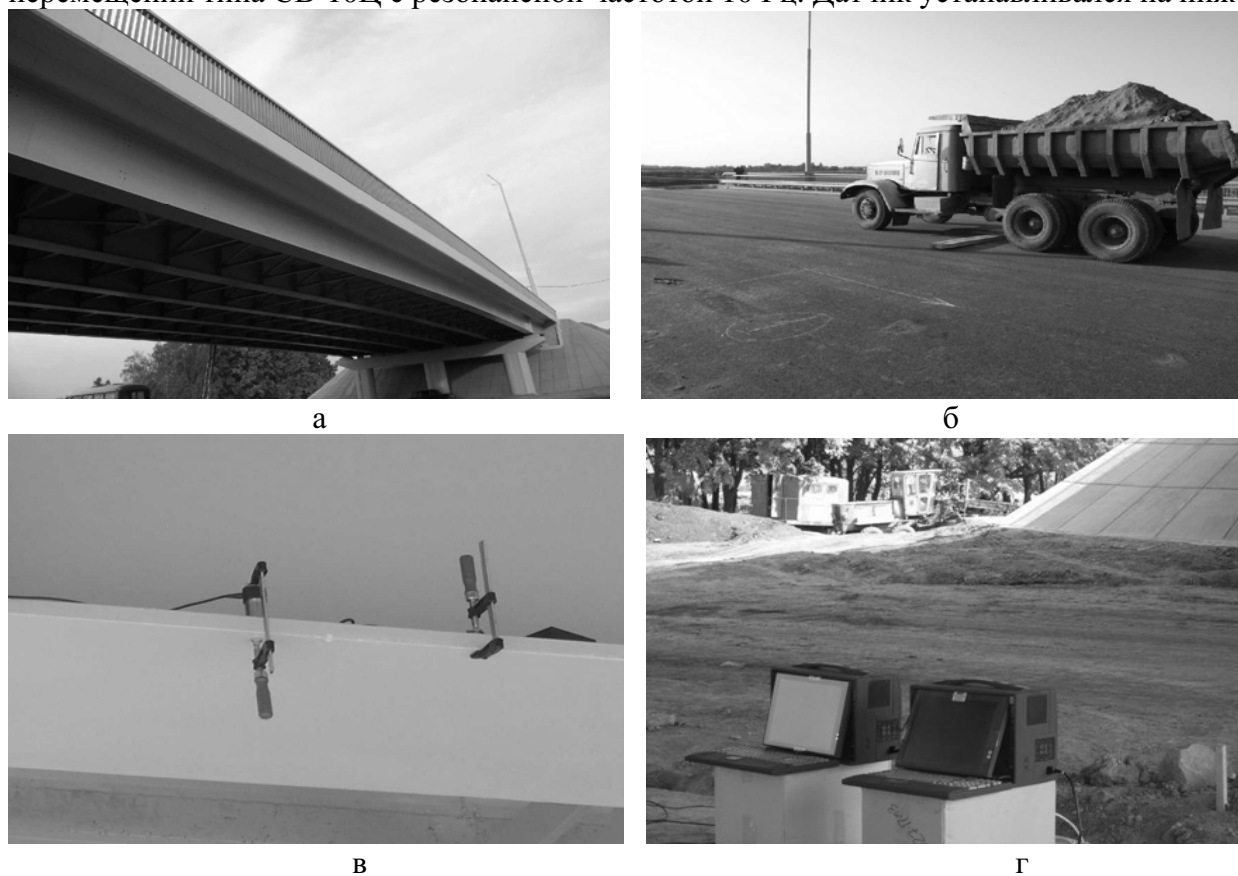


Рисунок 4. Фрагменты испытания моста: а – общий вид мостовой конструкции; б - проезд груженого грузового автомобиля типа КРАЗ через порожек; в - измерительные системы; г - размещение датчика скорости колебаний на нижней Т-образной поверхности несущей балке моста

ней части второй несущей Т-образной балке от края мостовой конструкции и жестко закреплялся на ней с использованием захвата (струбцины) (рис.4, в). Аналоговый электрический сигнал, возникающий на выходе датчика, преобразовывался в цифровой код и обрабатывался с использованием мобильной системы на базе ПК (типа АСМП), предназначенной для эксплуатации в полевых условиях (рис.4, г). По результатам регистрации и обработки сигналов колебаний конструкций проводился анализ полного набора их характеристик, рассмотренных выше. Кроме того, полученные данные, совместно с данными статических испытаний использовались для определения динамического коэффициента мостовой конструкции, в соответствии со СНиП-2.05.03-84 [12].

Фрагменты обработки результатов испытаний в виде спектров регистрируемых колебаний конструкции при ее динамических нагружениях показаны на рис. 5. На рис.5, а приведен амплитудный спектр колебаний, возникающих при движении груженого автомобиля по мосту, а на рис.5, б - амплитудный спектр колебаний, возникающих при переезде груженого автомобиля через порожек. В обоих случаях скорость движения автомобиля составляла 10 км/час. Из полученных результатов видно, что резонансные частоты и частоты отдельных мод в спектрах регистрируемых колебаний имеют близкие значения, несмотря на то, что условия возбуждения колебаний различаются между собой. Однако, резонансная кривая в области максимума при переезде автомобиля через порожек является

более широкой, по сравнению с резонансной кривой в области максимума при простом движении автомобиля по мосту с постоянной скоростью. При этом амплитуды колебаний на резонансе различаются между собой приблизительно в 7 раз. Это связано с тем, что при переезде автомобиля через порожек производится динамический удар, вызывающий собственные колебания конструкции, которые являются превалирующими при развитии колебательных процессов в конструкции. При этом увеличение ширины резонансной кривой в спектре, определяемое возникающими собственными колебаниями

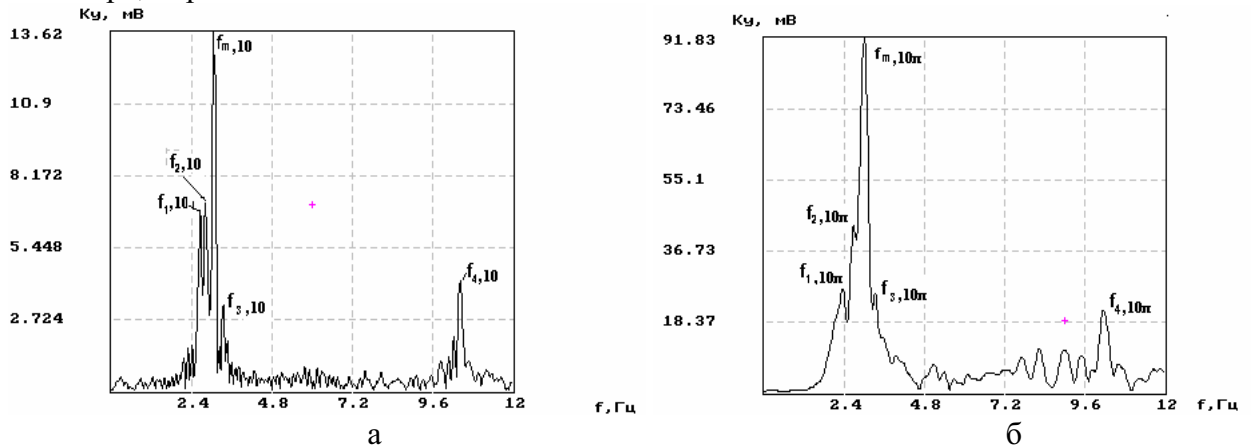


Рисунок 5. Спектры сигналов ускорения колебаний при скорости 10 км/ час: а – при движении автомобиля по мосту; б - при движении автомобиля по мосту с переездом через “порожек”. $f_{1,10}$, $f_{1,10п}$, $f_{2,10}$, $f_{2,10п}$,.....- частоты, соответствующие пикам в спектрах колебаний

конструкции, безусловно, характеризует ее демпфирующие свойства, параметры которых можно определять на уровне 0, 707 либо на уровне 0,5.

В таблице 1 приведены значения частоты f_T отдельных мод колебаний, полученных теоретическими расчетами для исследуемой конструкции моста, а в таблице 2 значения частот $f_Э$, определенных по результатам экспериментальных исследований, в соответствии с рис. 5. Частоты в таблице 2-А соответствуют рис.5, а, а в таблице 2-В – рис. 5, б. Резонансные частоты (пики с максимальной амплитудой) при движении автомобиля по мосту и при его переезде через порожек, соответственно, равны: $f_{Эр}=3,07$ Гц и $f_{Эр}=3,04$ Гц. При этом следует отметить, что при движении автомобиля по мосту в спектре колебаний наблюдаются пики и на частотах 2,16 Гц, 2,28 Гц, 2,4 Гц (рис.5, а), но их амплитуды приблизительно в 8 раз меньше амплитуды резонансной частоты (составляют ~14%). При переезде через “порожек” также наблюдаются пики на частотах 7,72 Гц, 8,24 Гц, 9,0 Гц, 9,52 Гц (рис.5, б, но их амплитуды приблизительно в 9 раз меньше амплитуды резонансной частоты (составляют ~12%).

Таблица 1

Расчетные значения частот отдельных мод колебаний мостовой конструкции

f_T , Гц	2,33	2,97	3,07	4,94	5,09	6,3	2,58	8,55	10,2
------------	------	------	------	------	------	-----	------	------	------

Таблица 2

Экспериментальные значения частот колебаний мостовой конструкции

A	$f_Э$, Гц	2,64	2,84	3,07	3,36	10,4
B	$f_Э$, Гц	2,36	2,68	3,04	3,36	10,2

Из результатов проведенных исследований видно, что в спектре реальных колебаний, фиксируются частоты близкие к расчетным значениям. Причем, моды колебаний с частотами 3,07 Гц и 10,2 Гц имеют хорошее совпадение с экспериментальными величинами. При этом в заданных условиях нагружения конструкции ее резонансная частота 3,07 Гц и 3,04 Гц соответствует третьей моде колебаний. В то же время, наблюдается ряд промежуточных частот. Их наличие, очевидно, связано с несовершенством методики проводимых испытаний, в которой динамическое нагружение конструкции осуществляется с использованием перемещаемой нагрузки (движение автомобиля), в то время как, в теоретических расчетах производится анализ мод свободных затухающих колебаний. Естественно, что с изменением скорости движения автомобиля (скорости перемещения динамической нагрузки) будет происходить изменение условий испытаний, что должно проявляться в изменениях спектров возникающих колебаний.

Заключение

Таким образом, разработанная информационно-измерительная система для исследования динамических характеристик конструкций на базе мобильного компьютера и средств технологии LabCard построена с распределением функций между аппаратными и программными средствами. Приоритетным в управлении элементами системы, операциями измерений, обработки информации и представлении результатов анализа является программный математический комплекс. Система позволяет проводить исследования динамических характеристик конструкций, оперативно и гибко модифицировать методы обработки регистрируемой информации, а также адаптировать систему под тип применяемого датчика без изменения ее внутренней электронной конфигурации. С использованием разработанной системы проведены экспериментальные исследования вынужденных и собственных колебаний модельных образцов и мостовых конструкций. Полученные результаты показали возможность обработки, как параметров регистрируемых сигналов, так и их спектров. Анализ экспериментальных данных при проведении диагностики мостовых конструкций после завершения их строительства показал хорошее согласование полученных результатов с результатами теоретических расчетов.

The principles of design and structure the system for research of constructions dynamic characteristics and results of its application to tests the bridges are considered. It is shown, that the developed system and analysis technique of constructions dynamic characteristics allows to process parameters, both forms, and spectra of arising oscillations with use the transducers of acceleration, speed and displacement.

1. Барашиков А.Я., Малышев А.М. Оценка технического состояния строительных конструкций, зданий и сооружений .- К.: НМЦ Держнаглядохоронпраці України, 1998.-232 с.
2. Делидзе Д.Е. Испытания конструкций и сооружений.-М.:Высшая школа, 1975.-252 с.
3. Лучко Й.Й., Коваль П.М., Дем'ян М.Л. Методи дослідження та випробувань будівельних матеріалів і конструкцій.-Львів: Каменяр, 2001.- 436 с.
4. Conceptual bases of technical diagnostics of bridges constructions/ V.M. Kartopoltsev, A.G. Borovikov and other.// Proceedings Int. Conf."VSU'2002". Sofia, Bulgaria, 2002.-V.1.-P.148-53.
5. Ren W.X., Blandford G.E., Harik I.E. Roebling suspension bridge. I: Finite-element model and free vibration response// J. of Bridge Eng.-ASCE(March/April), 2004.P.110-118.

6. Редченко В.П. Оцінка просторової роботи прогонової будови моста за результатами її випробувань рухомим навантаженням// Автомобільні дороги та дорожнє будівництво.-№69, 2004.-С.210-214
7. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М., Корниенко-Мифтахова И.К. Информативность параметров сигналов низкочастотных колебаний при использовании индукционных датчиков скорости //Технологические системы.- №2(28).-2005.-С.19-23
8. Бочкарев Н.Н., Картопольцев А.В. Исследования динамики работы композиционных мостов с конечными вибрациями пролетов //Вестник Томского университета архитектуры и строительства.-№2.-2001.-С.145-154
9. Bochkarev N.N., Kartopolzev A.V., Selivanova T.V. “Vibrations of transport superstructures under influence of random traffic stream”// XV Session of the Russian Acoustical Society Nizhny Novgorod – 2004.-P.527-531
10. Волкова В.Є. Метод визначення динамічних характеристик пружних механічних систем за часовими процесами // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво.-№ 69, 2004.-С.29-32.
11. Бабак. В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М. Определение динамических характеристик конструкций по анализу скорости низкочастотных колебаний //Технологические системы.-№ 1 (27), 2005.-С.35-40
12. СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы / Госстрой СССР.-М.:ЦИТП, 1985.-200 с.