

УДК 630.432

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

В.П. СЕРГИЕНКО<sup>1</sup>, кандидат технических наук,  
В.В. СВИРИДОВА<sup>2</sup>, кандидат физико-математических наук,  
С.Н. БУХАРОВ<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup> ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Беларусь.

<sup>2</sup> УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины», г. Гомель, Беларусь

Проанализированы физические методы диагностики, применяемые для обеспечения безопасности; отмечены преимущества методов неразрушающего контроля для прогнозирования техногенных чрезвычайных ситуаций. Показана актуальность использования бесконтактных средств измерений для определения технического состояния объектов. Изложена базовая концепция вибродиагностики, мониторинга и оценки рисков эксплуатации сложных объектов контроля с помощью лазерного доплеровского виброметра.

**Ключевые слова:** техническая диагностика, виброметрия, модальный анализ, лазерный виброметр, прогнозирование.

**Введение.** Прогнозирование техногенных чрезвычайных ситуаций и обеспечение безопасности сооружений, зданий, предприятий и т.д. невозможно без применения специальных средств технической диагностики, базирующейся на теории, методах и приборах определения технического состояния объектов. Особенностью развития средств технической диагностики в настоящее время является интеллектуализация диагностических операций, переход на обязательное определение остаточного ресурса и рисков эксплуатации технически и экологически опасных объектов, использование данных измерений для моделирования поведения этих объектов и предсказания развития ситуации. Современные методы обеспечения техногенной безопасности основываются на неразрушающем контроле, при котором не должна быть нарушена пригодность объекта контроля к эксплуатации или применению.

Физические методы и средства диагностирования являются наиболее универсальными и оперативными методами обеспечения техно-, эко- и

терробезопасности. В таблице 1 приведены основные физические методы диагностики безопасности, которые базируются на наиболее широко используемых в мире стандартах ISO, EN, а также нормах ASTM и ASME в области технической диагностики [1].

Таблица 1 – Физические методы диагностики безопасности

Физические поля, излучения, методы	Техногенная диагностика			Экологическая диагностика				Террористическая диагностика				Медицинская диагностика
	Производство	Эксплуатация	Хранение	Земля	Вода	Воздух	Космос	Ценные бумаги	Оружие	Взрывчатые вещества, наркотики	Сооружения	
Низкочастотные (0... 10 <sup>3</sup> Гц)	+	+	+	+					+			
Радиоволновые (10 <sup>4</sup> ... 10 <sup>10</sup> Гц)	+	+	+	+		+	+		+	+	+	+
Инфракрасные (10 <sup>11</sup> ... 4·10 <sup>14</sup> Гц)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Видимые (4·10 <sup>14</sup> ... 7,5·10 <sup>14</sup> Гц)	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
Ультрафиолетовые (7,5·10 <sup>14</sup> ... 3·10 <sup>16</sup> Гц)	+	+	+			+	+	+				+
Рентгеновские (3·10 <sup>16</sup> ... 3·10 <sup>20</sup> Гц)	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+
Гамма-излучение (3·10 <sup>19</sup> ... 3·10 <sup>22</sup> Гц)	+			+			+		+	+		+
Космические (3·10 <sup>23</sup> Гц)	+						+	+				+
Корпускулярное, излучение (нейтронов, фотонов, электронов, позитронов)	+			+			+	+		+		+
Постоянное магнитное поле	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+
Электрическое поле	+	+	+	+	+			+			+	+
Ультразвуковое поле	+	+	+	+	+			+			+	+
Вибрация, шум, удар	+	+	+	+	+			+			+	+
Измерение механических и химических параметров (время, размеры, сила, давление, масса, концентрация, сравнительная масса молекул)	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Капиллярный контроль	+	+	+	+				+				+

Как видно из приведенных данных, виброметрия и измерение шума, который является результатом вибраций, применяется во всех четырех направлениях

диагностики. Следует отметить важную роль методов и средств виброметрии для оценки техногенной опасности объектов. Существуют различные измерительные устройства для определения параметров вибрации, включая акселерометры, датчики силы и ударные молотки [2]. Перечисленные датчики вибрации обладают высокой точностью измерений, однако для их использования требуется непосредственный контакт с объектом, что в случае транспортных или промышленных сооружений не всегда гарантирует целостность и достаточную для дальнейшего теоретического анализа информативность вибрационных измерений. Поэтому проблема использования бесконтактных датчиков для вибромониторинга объектов контроля и интерпретации полученных результатов для прогнозирования техногенных чрезвычайных ситуаций весьма актуальна.

**Лазерная виброметрия конструкций.** В ИММС НАН Беларуси имеется лазерный доплеровский виброметр (ЛДВ) фирмы Брюль и Кьер (Дания). ЛДВ является высокоточным прибором для бесконтактного измерения вибраций, применяемых в случаях когда установки контактных датчиков на исследуемый объект невозможна или нежелательна. Широкий диапазон измерений (до 500 мм/с) делает ЛДВ универсальным датчиком, находящим применение практически во всех областях измерения вибрации, в том числе, для контроля вибраций зданий, мостов, платформ, дымовых труб, электрических столбов при ветровой нагрузке и т.д. ЛДВ используется для определения параметров вибрации, модального анализа и рабочих форм колебаний [3]. Лазерные виброметры обладают высоким разрешением (до 0,02 мкм/с) в широком частотном диапазоне (0,51 Гц-22 кГц), что позволяет оперативно получать поля механических колебаний объектов контроля и моделировать их динамическое поведение. ЛДВ созданы на основе интерферометра Майкельсона, в котором лазерный луч разделяется на эталонный и сигнальный лучи. Принцип действия лазерного виброметра заключается в частотной модуляции исходного лазерного излучения вибрацией поверхности исследуемого объекта и регистрации модулированного отраженного излучения на фотодетекторе при помощи оптико-акустических устройств (например, ячеек Брэгга), генерирующих соответствующий электрический сигнал. Скорость и амплитуда вибрирующего объекта определяет частоту и фазу модуляции согласно эффекту Доплера. Луч, отраженный от объекта, подвергается небольшому изменению частоты, которая называется частотой

Доплера  $f_D$ . Частота Доплера является функцией компоненты виброскорости  $V$  в направлении объекта:

$$f_D = 2 \frac{V}{\lambda},$$

где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения. Ячейка Брэгга регистрирует смещения частоты  $f_B$  лазерного луча. После суперпозиции измеряемого и испускаемого луча, в фотодетекторе регистрируется результирующий электрический сигнал с мгновенной частотой  $f_c(t)$ :

$$f_c(t) = f_B + f_D(t) = f_B + 2 \frac{V(t)}{\lambda},$$

где  $f_c(t)$  – частота сигнала, модулированного частотой Доплера  $f_D(t)$  несущей частоты  $f_B$ . Далее осуществляется цифровая демодуляция сигнала  $f_c(t)$ , в результате которой получаем информацию о скорости механических колебаний объекта  $V(t)$ . Такой подход позволяет обеспечить превосходные метрологические характеристики измерений. Дальнейшая обработка сигнала осуществляется системой сбора и анализа данных, в результате которой получаем информацию, необходимую для определения динамических характеристик исследуемой конструкции (рисунок 1).

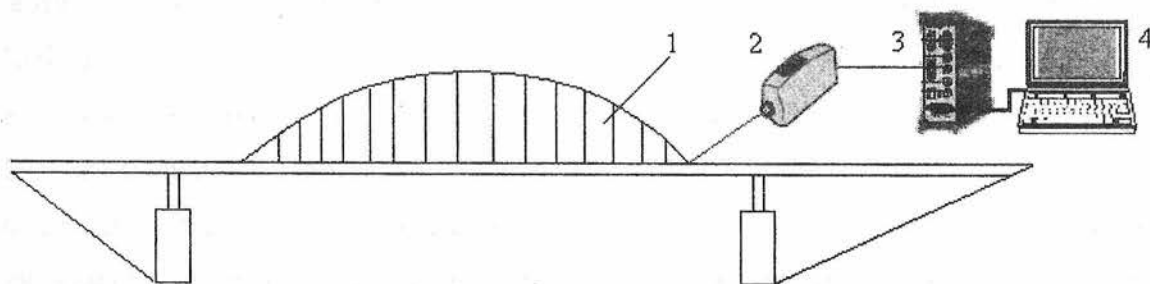


Рисунок 1 – Схема вибрационных измерений: 1 – объект контроля; 2 – ЛДВ; 3 – система сбора и анализа данных; 4 – персональный компьютер

Существуют различные виды анализа вибрационного сигнала. Наиболее распространенными для вращающихся конструкций (например, турбин) является модальный, порядковый и кепстральный анализ, для гражданских сооружений (например, мостов) – модальный и анализ рабочих форм колебаний. Определение характеристик резонансных вибраций, что является важнейшим элементом прогнозирования техногенных чрезвычайных ситуаций, например, при эксплуатации мостов, осуществляется методами модального анализа, позволяющими вычислить моды исследуемых конструкций. Моды характеризуются тремя параметрами:

собственной частотой колебаний, собственной формой колебаний и коэффициентом затухания [4]. Таким образом, не прибегая к резонансному нагружению конструкции, можно вычислить частоты, на которых в данной конструкции возникают резонансные колебания, представляющие опасность для эксплуатации и целостности любой конструкции. В этом случае основная задача прогнозирования сводится к моделированию условий внешнего динамического воздействия на конструкцию, при которых возникает резонанс. Например, в марте 1975 г. на пешеходном мосту через р. Сож в г. Гомеле в результате прохождения большого количества людей, возникли вынужденные колебания моста, близкие к резонансным. Модальный анализ как раз и предназначен для прогнозирования таких опасных ситуаций.

Существует два метода модального анализа – традиционный и операционный. В традиционном модальном анализе создается контролируемое внешнее возбуждение и проводится анализ вибрационного отклика в зависимости от входного воздействия. Источником внешних воздействий является ударный молоток со встроенным датчиком силы или калиброванная электродинамическая установка. Анализ мод колебаний является эффективным экспериментальным методом определения динамических характеристик конструкций на основе результатов одновременных измерений датчиком усилия и ЛДВ вынуждающей динамической силы и результирующих механических колебаний исследуемой конструкции. Такой метод оптимален на этапе проектирования и изготовления какого-либо изделия, когда каждый элемент конструкции может быть подвергнут контролируемому воздействию и на основе информации о динамических характеристиках в проектируемую конструкцию могут быть внесены изменения. В реальных условиях эксплуатации для сложных конструкций с многомодовыми колебаниями, например, мостов, зачастую не имеется возможности провести традиционный модальный анализ. Операционный модальный анализ (ОМА) позволяет провести расчеты, используя только измеренный выходной отклик конструкции, т.е. её эксплуатационные колебания [5]. ОМА также позволяет проводить испытания конструкций, когда ее трудно возбудить искусственно и когда невозможно экспериментально определить действующие на конструкцию силы. Определение модальных параметров в рабочем режиме обладает высокой информативностью,

поскольку полученная модальная модель показывает фактические уровни вибрации при истинных граничных условиях.

Оценка модальных параметров использовалась при виброиспытаниях моста, изготовленного из стали и бетона [5]. Обнаружено, что для первой и третьей моды характерны изгибные колебания, а для второй – поперечно-крутильная форма колебаний моста. Первая мода возникает на частоте 3,88 Гц, вторая – на частоте 4,82, третья – на частоте 9,72 Гц. Соответственно коэффициенты демпфирования составляют 0,77%, 1,64% и 1,65%. Моды двух устойчивых форм колебаний, являющиеся общими при испытаниях с использованием внешнего возбуждения для активации моста и при испытаниях без внешнего возбуждения исследуемой структуры, приведены на рисунке 2. Приложение внешних воздействий на частотах мод с малыми коэффициентами демпфирования, являющихся резонансными для данной конструкции, может привести к резкому возрастанию амплитуды колебаний моста и его разрушению.

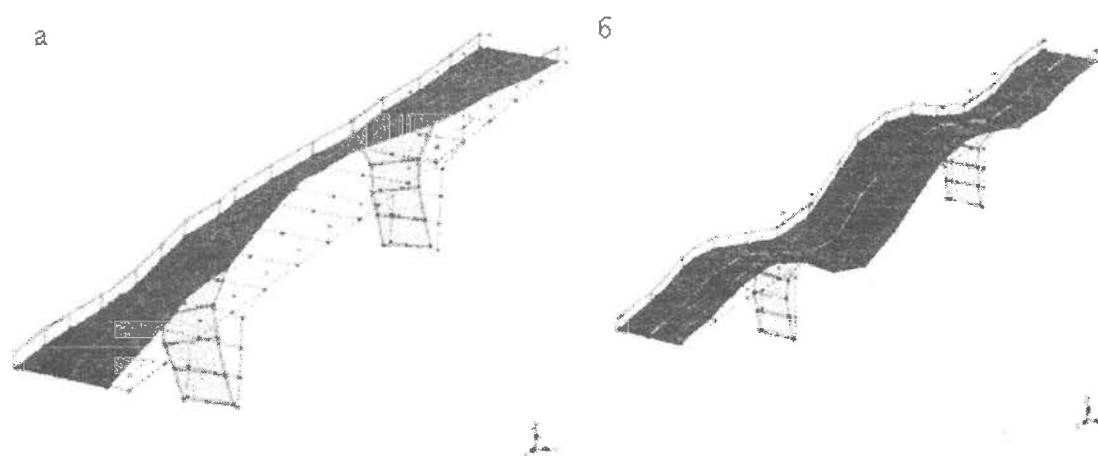


Рисунок 2 – Рабочие формы колебаний (3 D) моста на частотах:  
а – 4,82 Гц; б – 9,77 Гц

**Заключение.** Таким образом, параметры вибрации конструкции могут быть использованы для определения динамических характеристик контролируемых объектов и прогнозирования их поведения вплоть до возникновения чрезвычайной ситуации.

### Литература

1. Ключев В.В. Глобализация технической диагностики и неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика №8. 2004, С. 3-6.
2. Richardson M. Structural Dynamic Measurements, Structural Dynamic: Current Status and Future Directions // Research Studies Press, Ltd. 2000. – 341p.
3. Schell J., Johansmann M., Schüssler M., Oliver D. Three Dimensional Vibration Testing in Automotive Applications Utilizing a New Non-Contact Scanning Method // SAE paper 2006-01-1095.
4. Richardson M. and Schwarz B. Modal Parameter Estimation from Operation Data// Sound and Vibration/January 2003. – P.1-8.
5. Peeteres B. and Ventura C. Comparative Study of Modal Analysis Techniques for Bridge Dynamic Characteristics // Mechanical Systems and Signal Processing, 2000. – P. 37-43

*Поступила в редакцию 15.01.2008.*

**V.P. Sergienko, V.V. Sviridova, S.N. Bukharov.**

#### **APPLICATION OF LASER VIBROMETRY FOR PREDICTION TECHNOGENOUS EMERGENCY SITUATIONS.**

Physical diagnostic methods used for safety provision have been analyzed. As a result, certain advantages of non-destructive methods have been distinguished in predicting technogenous situations. In particular, it has been pointed out that the usage of contactless means in monitoring operation conditions of various objects is highly actual. A basic concept of vibrodiagnostics, monitoring and risk assessment is described for supervising operation of complex objects on the base of Doppler vibrometer.