

Опыт применения мультипликативного резонансного метода определения упругих свойств бетона компактных элементов конструкций

Власова Т. А., Комиссарова Н. С., Ольхова Ю. А.
Научный руководитель – Снежков Д. Ю., к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Акустические методы испытаний бетонных и железобетонных конструкций основаны на зависимости параметров распространяющихся в них упругих волн как от интегральных упруго-прочностных показателей бетона – модуля упругости E_c и прочности на сжатие f_c , так и от наличия и локализации макродефектов в массиве конструкции, и от концентрации и характера структурных микродефектов. В сравнении со склерометрическими методами одним из сильных преимуществ акустических методов контроля является значительно бóльшая – на два, три порядка – пространственная протяженность захватываемой контролем области испытаний материала – бетона [2].

Физической основой резонансных методов испытаний является формирование стоячих волн в массиве образцов материалов и конструкций в целом. Наиболее простой вариант метода свободных колебаний – так называемый *Impact-Echo* метод (ИЕМ). ИЕМ приобрел популярность в Германии, Англии, Японии, Чехии и США [2]. Физическая основа ИЕМ заключается в зависимости *амплитудно-частотных* параметров акустического отклика на кратковременное ударное воздействие с небольшой энергией, от физико-механических параметров испытуемого материала – бетона. Основными косвенными параметрами метода являются длительность отклика и соотношения основных частотных составляющих спектра колебаний. Для визуализации акустического сигнала и его анализа, как правило, используют спектральные методы, и соответствующие компьютерные программы на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). В странах СНГ получил распространение аналог ИЕ метода – виброакустический метод, которым (если отвлечься от формально-юридической стороны вопроса) является и сам ИЕМ. Приборы диагностики свай «Спектр-1/2/3» являются упрощенными версиями приборов ИЕ метода. Упрощение определяется меньшим измерительным диапазоном – максимальная частота рабочего спектра прибора «Спектр-3.0» – 23 кГц. Поэтому основное использование приборов этого типа – контроль дефектности протяженных

изделий: свай, колонн и других, для контроля которых эффективны низкочастотные зондирующие сигналы.

Информация о размерах и физико-механических свойствах контролируемого образца содержится во временных и частотных показателях акустической волны. Поэтому для анализа акустических волн рассматриваемых методов широко используют спектральные методы, позволяющие рассматривать процесс не во временной области развития, а в частотной. В основе спектральных методов лежит преобразование Фурье (ПФ)

$$F(\omega) = \int f(t) \cdot \exp(-i\omega t) dt, \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int F(\omega) \cdot \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (2)$$

где $F(\omega)$ – преобразование Фурье (частотный спектр); $f(t)$ - исходный сигнал во временном представлении; ω – круговая частота.

Выражение (1) – прямое преобразование Фурье, выражение (2) – обратное преобразование. Математический смысл преобразования Фурье состоит в представлении сигнала $f(t)$ в виде бесконечной суммы синусоид и косинусоид. Обратное преобразование Фурье переводит спектральное отображение $F(\omega)$ в исходный сигнал $f(t)$. Для преобразования Фурье разработан эффективный алгоритм, получивший название быстрое преобразование Фурье (БПФ), реализуемый во многих программах математической обработки данных (Excel, MathCad и др.).

Возбуждение колебаний в бетоне обычно производится специальным ударным механизмом, либо вручную, - нанесением удара металлическим шариком малой массы по поверхности конструкции. Прием колебаний осуществляется пьезоэлектрическими или электродинамическими датчиками. При отсутствии дефекта, после ударного воздействия в зоне контроля образуется акустическое поле, основные составляющие которого имеют частоты, кратные частоте полуволновых колебаний, которая является опорной $f_{1,T}$ и связана со скоростью распространения продольной волны c и расстоянием T соотношением.

$$f_{1,T} = \frac{c}{2T}, \quad (3)$$

ИЕМ и виброакустический метод обеспечивает приемлемую точность контроля только так называемых протяженных конструкций и элементов – фундаментных блоков, плит, стен, свай, – у которых один размер как минимум в 5 раз меньше, либо в 5 раз больше остальных геометрических размеров. При контроле компактных конструкций, у которых два или все габариты одного порядка, акустическое поле становится многочастотным

за счет многократной трансформации различных типов волн при их отражении от граней образца. Соотношение частотных составляющих начинает зависеть от координат положения приемного сенсора и точки возбуждения колебаний. Данное обстоятельство значительно затрудняет контроль компактных изделий из бетона, делая его, в ряде случаев, невозможным. На рис. 1 и рис. 2 приведены частотные спектры акустического отклика в точках на двух смежных гранях бетонного блока габаритами 119 x 58 x 31 см, при ударном возбуждении одной и той же точки, полученные с использованием прибора «Спектр-3.0». Разметка точек установки акустического сенсора показана на рис. 3.

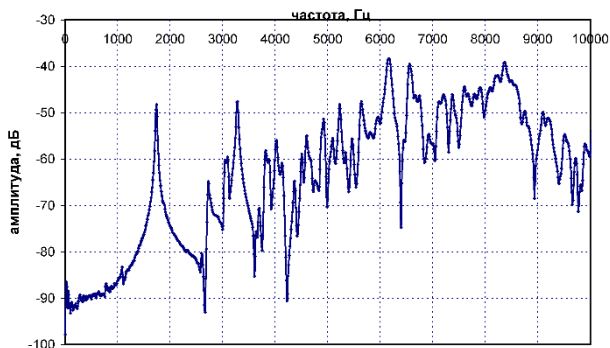


Рис. 1 Спектр акустического сигнала в точке 3; ударное возбуждение в точке 1

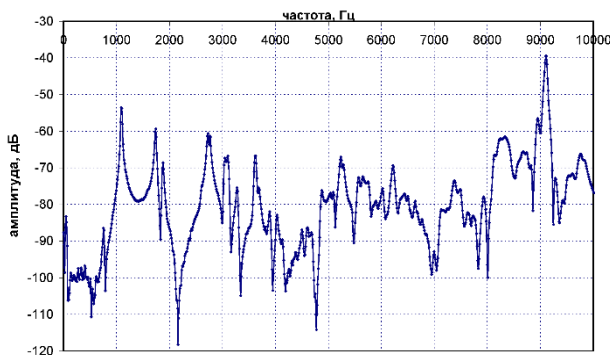


Рис. 2 Спектр акустического сигнала в точке 8; ударное возбуждение в точке 1

Положение ряда спектральных пиков на рис. 5 и 6 совпадают на оси частот, но их амплитуды могут отличаться на порядок и более.

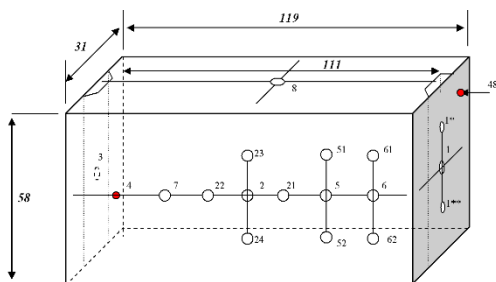


Рис. 3 Разметка точек контроля испытуемого бетонного образца

В этой связи, перспективным выглядит многоканальный мультипликативный метод [1]. Метод реализует многоканальный контроль с мультипликативной обработкой резонансных частотных характеристик. Предполагается, использование одновременно нескольких приемных преобразователей, либо последовательную установку одного преобразователя в N различных точках на поверхности объекта контроля.

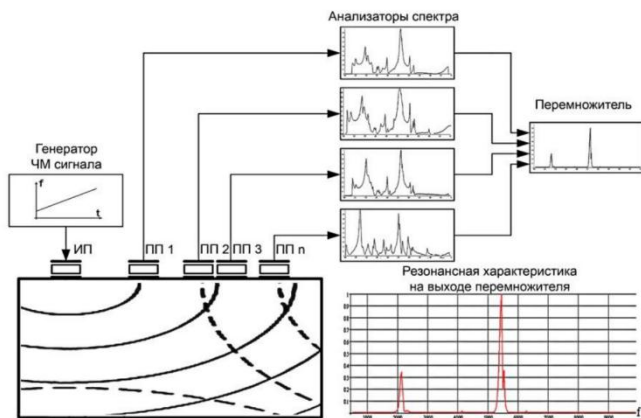


Рис. 4 Схема измерений частотной резонансной характеристики бетонного изделия резонансно-мультипликативным методом [1]

Указанный метод позволяет значительно упростить анализ частотного спектра контролируемой бетонной и железобетонной конструкции, снизив количество характеристических частот. Частотный спектр становится более «гладким» с меньшим количеством выраженных спектральных составляющих. На рис.5 приведены спектр полученный перемножением 9 спектров для точек 2, 21, 22, 23, 3, 5, 51, 52, 8 и спектр для точки 5. Устойчивые

составляющие сохраняются, составляющие, имеющие стохастический характер, особенно в высокочастотной области спектра, сглаживаются.

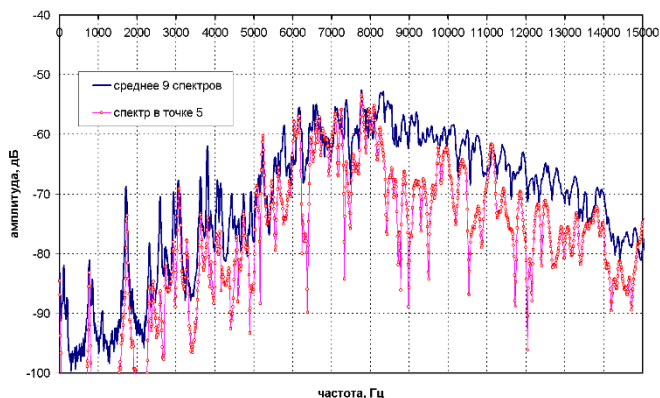


Рис. 5 Частотные спектры: мультипликативный и одинарный

Наиболее мощная спектральная составляющая имеет частоту 1705 Гц, что обусловлено стоячей продольной волной по длине образца. По формуле (1) рассчитываем скорость продольной волны c_l

$$c_l = f_{l,T} \cdot 2T = 1705 \cdot 2 \cdot 1.19 = 4058 \text{ м/с} , \quad (4)$$

Кроме того, этот метод позволяет, в сравнении с другими методами, получить более точную оценку скорости распространения акустического импульса в массиве бетона. Достоинством этого метода, как и ИЕМ, является возможность проводить контроль строительных конструкций из бетона толщиной до нескольких метров, но в отличие от ИЕМ многоканальный мультипликативный метод можно считать безэталонным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов, В. К. Многоканальный мультипликативный метод акустического контроля крупногабаритных компактных строительных конструкций из бетона / В. К. Качанов, И. В. Соколов // Дефектоскопия. – 2008. - № 12. - С. 23-37.
2. Снежков, Д. Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д. Ю. Снежков , С. Н. Леонович - Минск: БНТУ, 2016. - 330 с.