МЕТОДЫ ВИБРАЦИОННОГО И ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ ОНСТРУКЦИЙ И ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

УДК 624.01.004.58

ГОУ ВПО «Военно-космическая академия им.А.Ф. Можайского» МО РФ, г.Санкт-Петербург

Козин Пётр Александрович
Доцент кафедры «Инженерно-строительного обеспечения эксплуатации наземных комплексов», доктор технических наук, профессор

Исхаков Шавкат Шамильевич
Доцент кафедры «Инженерно-строительного обеспечения эксплуатации наземных комплексов», кандидат технических наук, доцент, академик МАНЭБ

Васкевич Виктор Михайлович
Начальник кафедры «Инженерно-строительного обеспечения эксплуатации наземных комплексов», кандидат технических наук

Ковалев Фёдор Евгеньевич
Адъюнкт кафедры «Инженерно-строительного обеспечения эксплуатации наземных комплексов»

ГОСТ Р 22.1.12-2005 регламентирует применение стационарных автоматизированных систем мониторинга (СМ) для наиболее ответственных промышленно-опасных и уникальных (с пребыванием большого числа людей) зданий и сооружений [1].

Применительно к объектам космического назначения аналоги подобных СМ в виде систем испытания и долговременного контроля (ИДК) используются, начиная с конца 60-х годов прошлого века. В общем случае системы ИДК создаются в составе геодезического (ГК), тензометрического (ТК) и вибрационного (ВК) контроля на специальных сооружениях (СС) наземных космических комплексов (рис. 1).

Спецификой указанных СС является то, что на ряду со значительными статическими нагрузками они испытывают динамическое воздействие от случайного поля пульсаций давления реактивной газовой струи (рис. 2). Поэтому особое внимание уделяется диагностированию состояния несущих элементов СС (грунтового основания и строительных конструкций) при воздействии указанных динамических нагрузок. Для этих целей в ВКА имени А.Ф. Можайского в 80-х годах прошлого века разработан прибор САК на базе струнного тензометра плюс – 10-канальный регистратор, способный измерять динамические напряжения в грунтовом основании и в арматуре и бетоне железобетонных конструкций (ЖБК), доведённый до промышленных образцов и не имеющий аналогов до настоящего времени (разработчик – доктор технических наук, профессор, академик МАНЭБ Н.Н. Гусев). Вместе

с тем, учитывая небольшой срок службы тензометров, основное внимание в исследованиях академии уделено развитию вибрационного метода диагностирования состояния несущих элементов сооружений [2-4]. При этом приходится учитывать целый ряд факторов, не позволяющих напрямую использовать вибрационные методы диагностирования по традиционной модели «чёрного ящика» (рис. 3). И основным из этих факторов является то, что измерить результирующие входные нагрузки от случайного поля пульсаций давления как от реактивных газовых струй, так и от ветровых и сейсмических нагрузок, никогда не удаётся (рис. 4). В лучшем случае можно измерить пульсационные нагрузки лишь в отдельных точках поля, но их энергетический спектр, к сожалению, физически не сопряжён с колебаниями всего сооружения в целом и вибрациями несущих конструкций (см.рис. 4). В этой связи, в академии разработан нетрадиционный метод вибрационного диагностирования, основанный на выявлении информативных диагностических признаков состояния грунтовых оснований и несущих конструкций, содержащихся в передаточной функции сооружения $\eta(\omega)$, только по спектрам выходных сигналов вибрационных перемещений $G_V(\omega)$ и ускорений и $G_V(\omega)$ (см.рис. 3). При этом в исследованиях академии на базе многолетних натурных данных доказано [2-4], что такими информативными диагностическими признаками являются два параметра передаточной функции $\eta(\omega)$, которые изменяются при изменении (снижении) жёсткости C любой j-й строительной системы, а именно: происходит снижение собственной, резонансной частоты колебаний $\lambda_{i,j}$ этих систем на некоторую величину $\Delta\lambda$ и увеличение резонансного пика передаточной функции $\eta(\omega)$ в какое-то v раз (рис. 5) (где i – номер формы колебаний j-й диагностируемой системы). Поскольку жёсткость строительных систем C является физическим показателем их **несущей способности**, то идентификация снижения жёсткости строительных систем на некоторую величину ΔC по параметрам $\Delta\lambda$ и v, фиксируемым в энергетических спектрах выходных сигналов вибрационных перемещений $G_V(\omega)$ и ускорений $G_V(\omega)$, позволяет судить о снижении **несущей способности** как грунтовых оснований, так и несущих конструкций (см.рис. 5)

Применительно к грунтовым основаниям жёсткость C следует интерпретировать как коэффициенты жёсткости K_Z, K_X, K_φ, принятые в теории расчёта фундаментов под машины с динамическими нагрузками [5, 6] (см. рис. 3, 5). В общем случае, как известно, жёсткость C (несущая способность R) грунтов зависит от большого числа физико-механических характеристик (ФМХ), основными из которых являются модуль упругости E, угол внутреннего трения φ, коэффициент сцепления c:

$$[C, R] = f(E, \varphi, c). \qquad (1)$$

Рис. 1. Система ИДК на СС

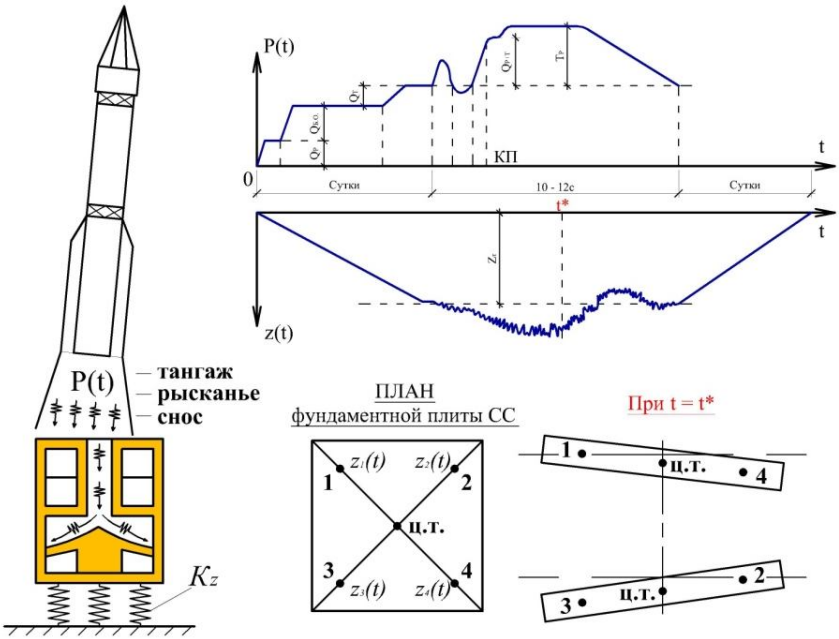


Рис. 2. Динамическое воздействие на СС

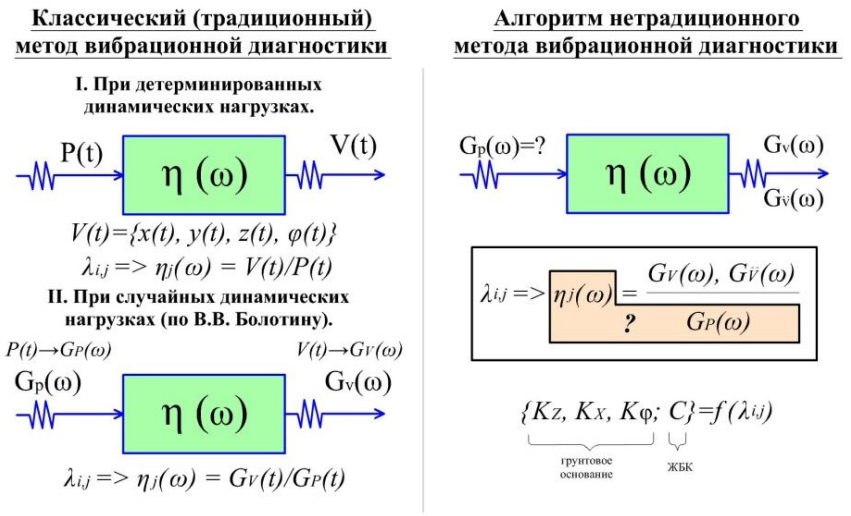


Рис. 3. Методы вибрационного диагностирования

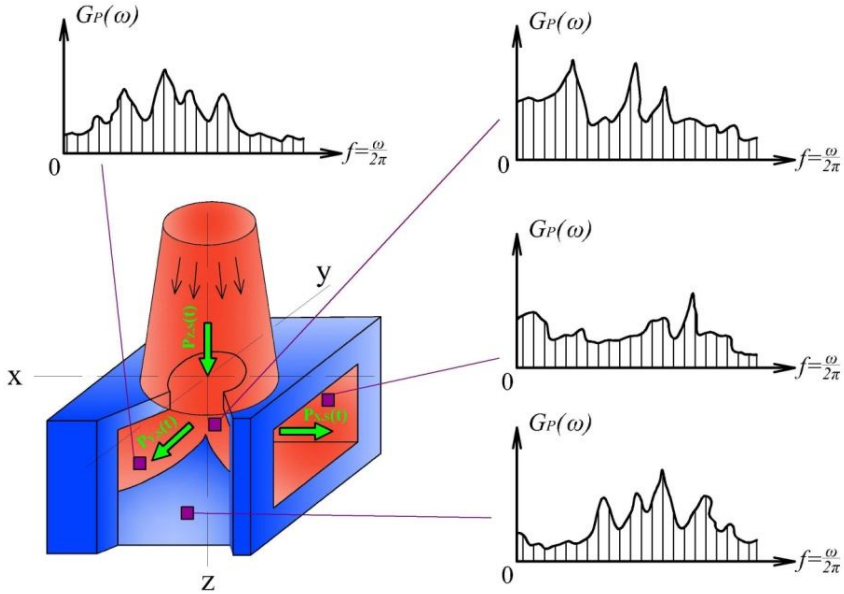


Рис. 4. Основной фактор, указывающий на невозможность использования традиционного метода вибрационного диагностирования (см. рис. 3)

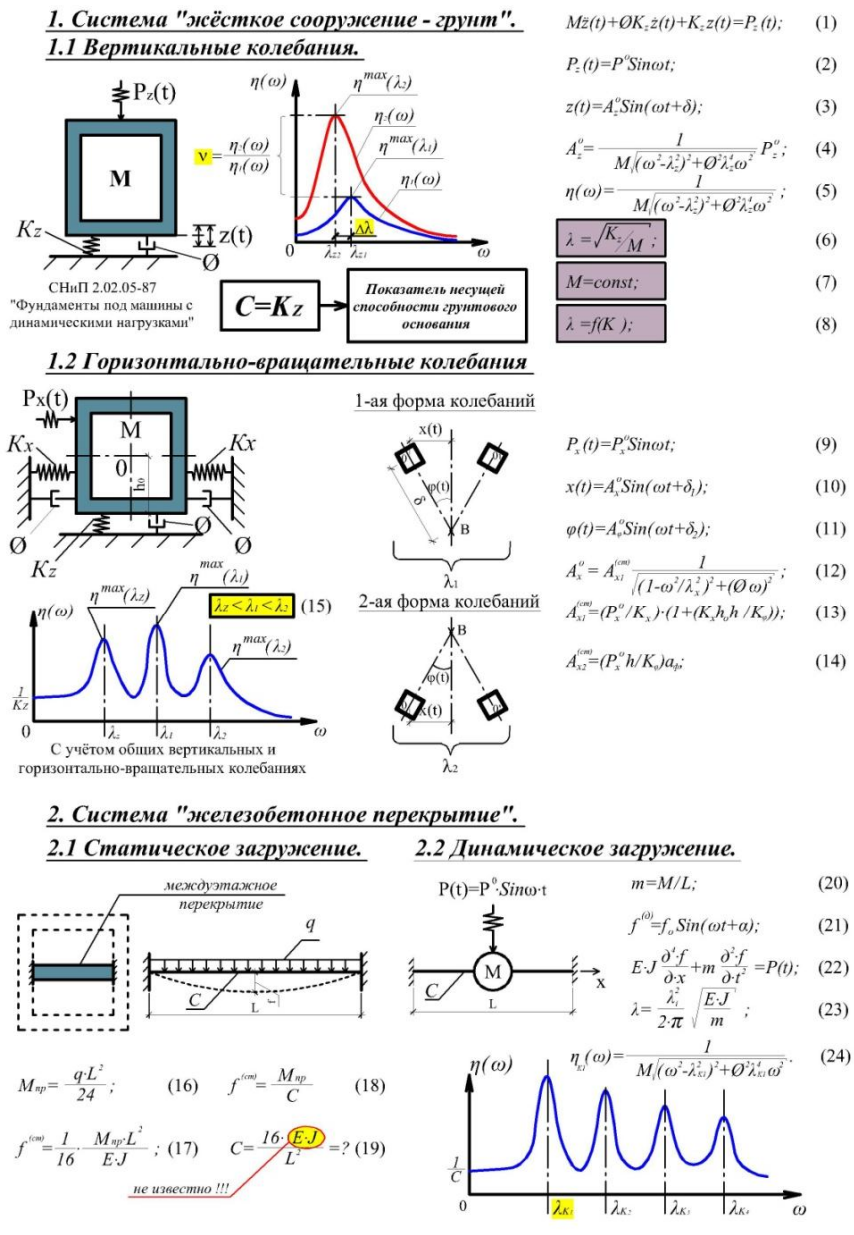


Рис. 5. Теоретическая идентификация условно дискретных *j*-х динамических систем, входящих в состав сооружения

Поэтому сложность идентификации изменения (снижения) несущей способности R грунтовых оснований заключается в том, что способами современных неразрушающих методов контроля (НМК) не удаётся определить ФМХ грунтов, указанные в правой части (1), и их приходиться определять лишь лабораторными методами по образцам грунта при инженерно-геологических изысканиях.

Ещё сложнее оказываются зависимости жёсткости C для несущих ЖБК (рис. 5, п. 2), поскольку приходится учитывать модули упругости E и моменты инерции интересующих нас сечений l как для бетона, так и для арматуры:

$$C = f(E_\sigma, I_\sigma, E_a, I_\sigma). \tag{2}$$

В том случае, когда в обследуемых ЖБК уже имеются трещинообразования бетона, то установка непосредственно какими-либо современными аппаратурными средствами влияния ФМХ ЖБК, указанных в правой части (2), на жёсткость C как для грунтовых оснований (1), так и для несущих строительных конструкций (ЖБК, стальных и т.п.) (2), является комплексным показателем снижения несущей способности, идентифицируемым по снижению жёсткости C на некоторую величину ΔC по диагностическим признакам $\Delta\lambda$ и ν, выявляемым в передаточных функциях $\eta(\omega)$ (рис. 5, п.п. 1.1) по анализу энергетических спектров вибрационных перемещений и ускорений:

$$\Delta C = f(\Delta\lambda, \nu). \tag{3}$$

$$\left.\begin{matrix}\Delta\lambda = 0\\ \nu = 1\end{matrix}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{matrix}\textit{состояние несущих}\\ \textit{элементов стабильно}\end{matrix}\right\}, \tag{4}$$

$$\left.\begin{matrix}\Delta\lambda \succ 0\\ \nu \succ 1\end{matrix}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{matrix}\textit{жесткость (несущая способность)}\\ \textit{элементов снижается}\end{matrix}\right\}. \tag{5}$$

При этом основным диагностическим признаком в (3) – (5) является смещение резонансного пика $\Delta\lambda$, а второй признак ν является вспомогательным (рис. 5, п.п. 1.1), поскольку случай (5) может иметь место не только при снижении жёсткости C, но и при увеличении энергии внешней нагрузки, которую в общем случае (см. рис. 3) при функциональной диагностике мы не знаем.

Из этого следует, что при вибрационной диагностике судить о снижении несущей способности (жёсткости) грунтовых оснований и строительных конструкций только по факту увеличения амплитуд их колебаний (динамических деформаций) физически неправомерно. Необходимо знание главного параметра $\Delta\lambda$ в (3) – (5), который и является основным информативным диагностическим признаком снижения жёсткости (несущей способности) диагностируемых элементов. Вместе с тем анализ в каждом k-м цикле испытаний (измерений) всех возможных комбинаций значений параметров $\Delta\lambda$ и ν в (4), (5) позволяет установить сопровождается ли сниже-

ние жёсткости ΔC (3) (при $v>1$) увеличением энергии нагрузки, или (что ещё опаснее) параметр ΔC (3) проявляется без увеличения энергии динамических нагрузок ($v=1$) в последующих k-х ($k>1$) циклах испытаний. При этом следует иметь в виду, что только по одному (первому, $k=1$) циклу испытаний судить об изменении жёсткости ΔC (3) несущих элементов невозможно: результаты первого цикла испытаний с установленными параметрами передаточных функций $\eta(\omega)$ в энергетических спектрах вибрационных перемещений и ускорений в виде резонансных частот колебаний λ и максимума передаточной функции $\eta^{max}(\lambda)$ (рис. 5, п.п. 1.1) являются «эталонными», по отношению к которым в последующих циклах испытаний (при $k>1$) выявляются диагностические признаки $\Delta\lambda$ и v для оценивания состояния диагностируемых элементов по критериям (3) – (5). Из этого также следует, что при тестовой вибрационной диагностике (например, нанесением удара по конструкциям) по одному циклу испытаний ($k=1$) невозможно судить о состоянии несущих элементов зданий и сооружений; всегда необходимы повторные циклы испытаний ($k>1$) с какой-то периодичностью во времени, чтобы сравнивать результаты повторных циклов испытаний с результатами первого ($k=1$) «эталонного» испытания. Попытки же пользоваться только одним (первым, $k=1$) циклом испытаний путём сравнения фактической резонансной частоты $\lambda_ф$ с расчётной $\lambda_р$ (полученной теоретическим путём) для определения параметра $\Delta\lambda$ как разности между $\lambda_ф$ и $\lambda_р$ физически неправомерны, поскольку расчётные значения $\lambda_р$ заведомо далеки от реальных резонансных частот колебаний как всего сооружения в целом на грунтовом основании (по модели «жёсткое сооружение – грунт», рис. 5, п.1), так и несущих конструкций (рис. 5, п.2) в силу нашего незнания ФМХ, входящих в правые части (1) и (2). Поэтому методы вибрационной диагностики (как тестовые, так и функциональные), использующие критерий

$$\Delta\lambda = \left|\lambda_р - \lambda_ф\right| \tag{6}$$

обладают заведомо совершенно неоднозначной (не поддающейся оценке) достоверностью [4].

Применительно же к критериям (3) – (5) в работах сотрудников ВКА имени А.Ф. Можайского исследована чувствительность, т.е. разрешающая способность рассматриваемого метода вибрационного диагностирования путём проведения целого ряда численных экспериментов на гипотетических моделях сооружений для идентификации снижения жёсткости грунтовых оснований по модели «жёсткое сооружение – грунт» путём выявления зависимости

$$\Delta C \Leftrightarrow \Delta\lambda, \tag{7}$$

(где $C=K_z$) при имитации снижения жёсткости (упругости) грунтового основания K_z при вертикальных колебаниях сооружения (рис. 5, п.п.1.1; рис. 6).

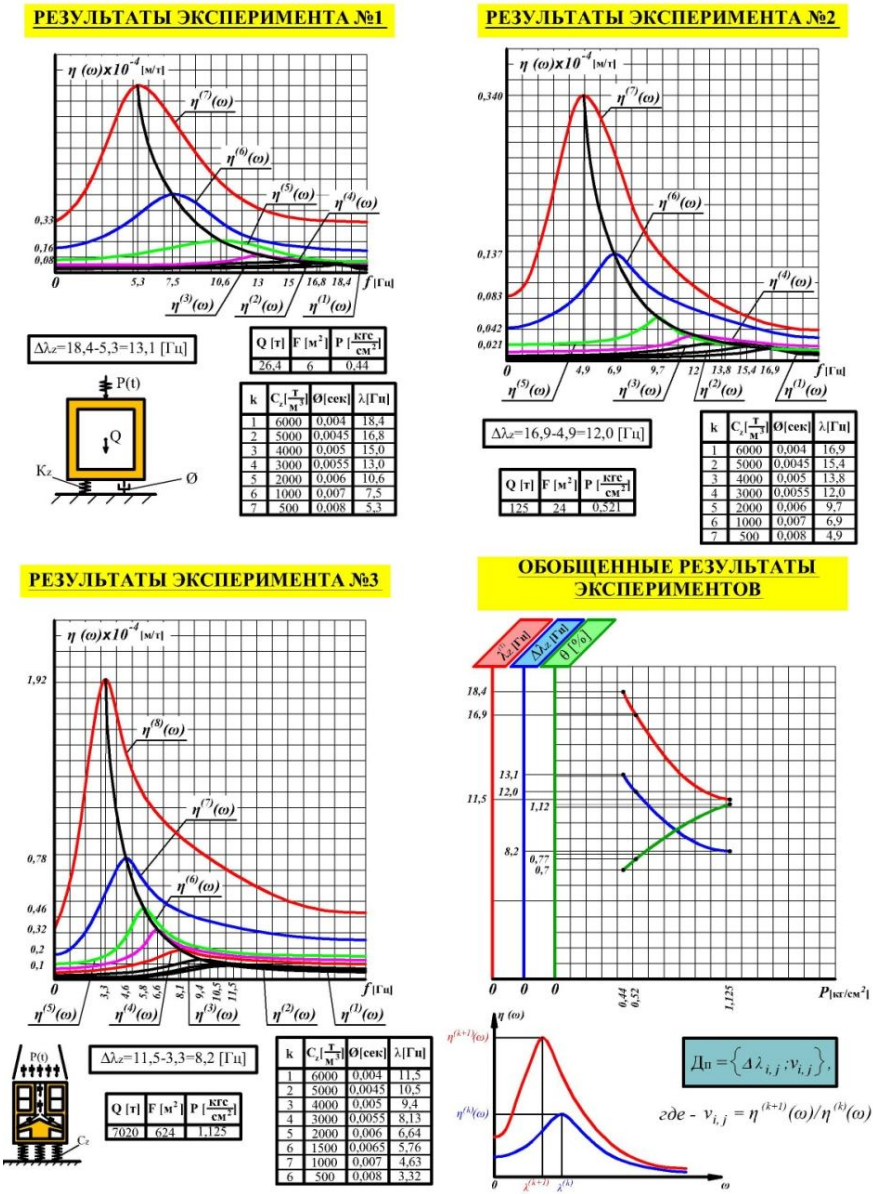
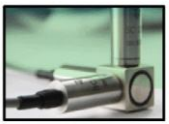


Рис. 6. Результаты исследования чувствительности метода вибрационной диагностики состояния несущих элементов

При этом, если не ставить под сомнение правомерность теоретических зависимостей (1) – (8) на рис. 5, п.п.1.1, апробированных в практике проектирования фундаментов под машины [6] и подтвержденных многочисленными опытами [5], то выполненные численные эксперименты (рис. 6) свидетельствуют об увеличении погрешности θ рассматриваемого метода вибрационной диагностики по критериям (3) – (5) с увеличением статического давления p на грунтовое основание от веса Q зданий и сооружений. При этом установлено (см. обобщённые результаты экспериментов на рис. 6), что даже для очень массивных сооружений погрешность θ самого метода вибрационной диагностики по критериям (3) – (5) не превышает 2%. С учётом современной аппаратурной базы виброметрии общая погрешность идентификации снижения жёсткости несущих элементов сооружений по данному методу вибрационной диагностики составляет порядка 6,7% (рис. 7). Следовательно, доверительная вероятность постановки диагноза данным вибрационным методом составляет $\overline{P}$=0,933 (см. рис. 7).

№ п/п	Наименование элемента измерительного тракта, *n*	Относительные погрешности, ε [%]
1	Акселерометр "*BC 202*"	≤ 4 %
2	Анализатор спектра низкого диапазона "*ZET 017-U8*"	≤ 0,1 %
3	Компьютер	≤ 0,1 %
4	Каналы связи	≤ 5 %



$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{n=1}^{4} \varepsilon_n^2 + \varepsilon_м^2}$$

ε - относительная погрешность;

n - номер элемента по таблице;

$\varepsilon_м$ - погрешность метода вибрационного диагностирования (< 2%);

$\overline{P}$ - вероятность достоверного события.

$$\overline{P} = \left(1 - \frac{\varepsilon}{100\%}\right)$$

ε = 6,7%

($\overline{P}$ = 0,933)

Рис. 7. Обоснование достоверности метода вибрационной диагностики

Следует иметь ввиду, что использование критериев (3) – (5) при мониторинге состояния зданий и сооружений правомерно лишь в тех случаях, когда в процессе мониторинга (в течении всего времени проведения *k*-х циклов испытаний) сохраняется постоянство массы *M* как всего сооружения в целом (см. зависимости (6) – (8) на рис. 5, п.п. 1.1), так и отдельных несущих конструкций (рис. 5, п.2). Такие случаи характерны, если в процессе мониторинга не выполняются реконструкции и технические перевооружения, связанные со значительным изменением объёмно-планировочных и конструктивных схем объекта и весовых характеристик всего сооружения и его отдельных элементов, что требует весь вибрационный мониторинг начинать с начала с первоначальным получением «эталонных» параметров в первом цикле испытаний (k=1) и сравнением с ними результатов последующих испытаний, как это было показано выше.

Поскольку в аналогичных условиях воздействия динамических нагрузок находятся многие здания и сооружения, в том числе высотные, большепролётные и сейсмостойкие, то данный метод вибрационной диагностики может быть применим для мониторинга широкого класса эксплуатируемых строительных объектов (рис. 8). При этом следует иметь в виду, что ряд территориальных нормативных документов (в частности МГСН 4.19-2005 для Москвы и ТСН 31-332-2006 для Санкт-Петербурга) используют в качестве критериев снижения несущей способности высотных зданий и сооружений «линейность – нелинейность» передаточных функций $\psi(\omega)$, под которыми понимается результат деления энергетических спектров вибраций, регистрируемых при воздействии ветровых нагрузок, $G(\omega)$ на разных *n*-х этажах здания (через 3-5 этажей) (см.рис. 8). Однако, с физико-математической точки зрения нетрудно доказать, что при случайности энергетических спектров Фурье $G_Z^n(\omega)$, $G_Z^{n+1}(\omega)$ (см.рис.8) передаточная функция $\psi(\omega)$ всегда является сугубо нелинейной, что подтверждается и многолетними натурными данными на специальных сооружениях (см.рис. 2), получаемых ВКА имени А.Ф. Можайского. Поэтому критерии «линейности – нелинейности» передаточных функций $\psi(\omega)$ (см.рис. 8) при отсутствии критериев степени самой нелинейности при переходе из одного состояния в другое несущих конструкций высотных и большепролётных зданий и сооружений оказываются физически необоснованными.

Авторы данной статьи с большим удовлетворением отмечают совпадение разработанных в ВКА имени А.Ф. Можайского методов вибрационного диагностирования, применяемых на СС объектов ВПК (рис. 2), с концепциями, развитыми в последние годы в Учреждениях РАН [7] по методам сейсмометрического мониторинга зданий и сооружений, также представленных в докладах Круглого стола I Национального Конгресса «Комплексная безопасность в строительстве» и в данном сборнике, что позволяет надеяться на успешное сотрудничество в данной области по совершенствованию методов мониторинга состояния зданий и сооружений.

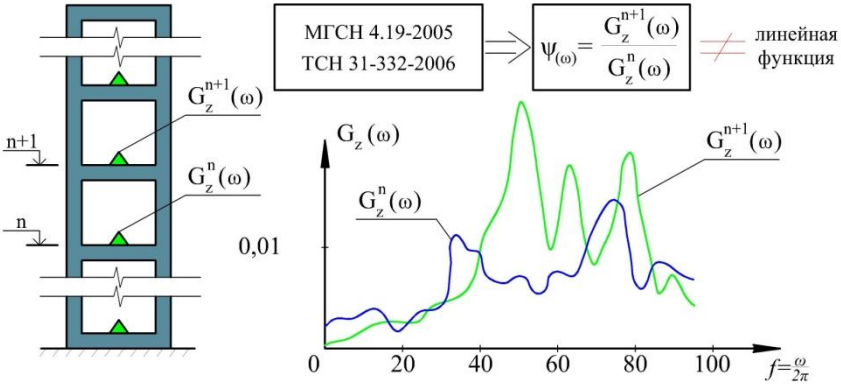


Рис. 8. Сравнительный анализ с методами вибрационной диагностики в смежных областях строительства

Библиографический список

1. ГОСТ Р 22.1.12-2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. – М.: МЧС РФ, 2005. – 22 с.
2. Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е. Принципы идентификации параметров входных и выходных процессов при мониторинге зданий и сооружений, подверженных динамическим воздействиям // Сб. докладов Международных научных чтений «Белые ночи – 2008» / МАНЭБ Ч.2. – СПб., 2008. – С. 343 – 346.
3. Исхаков Ш.Ш. К вопросу о прогнозировании выявления информативных диагностических признаков состояния зданий и сооружений при динамических воздействиях // Сб. докладов Международных научных чтений «Белые ночи – 2008»/ МАНЭБ Ч.2. – СПб., 2008. – С. 346-350.
4. Исхаков Ш.Ш., Васкевич В.М., Ковалев Ф.Е. Особенности вибрационной диагностики высотных сооружений при воздействии ветровых нагрузок // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций / ВИТУ. – СПб., 2009. – С. 48 – 51.
5. Савинов О.А. Фундаменты под машины. – Л., – М.: Государственное изд-во литературы по строительству и архитектуре. – 1955. – 292 с.
6. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. – М.: ГОССТРОЙ СССР (РФ), 1988. – 52 с.
7. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий. – Екатеренбург: УрО РАН, 2007. ISBN 5-7691-1835-0. – 156 с.