

УДК 534.1

А.Н. Дербасов
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ ВИБРОДИАГНОСТИКА
КОНСТРУКЦИЙ С ТРЕЩИНОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предлагается конечно-элементный анализ конструкции, трещина в которой моделируется Гар-элементами, для выявления вибродиагностических признаков появления усталостной трещины. Приведены тестовые расчеты на примере балки-стенки без трещины и при наличии трещины, которые подтвердили правильность описания динамического процесса. Приведены результаты натурального эксперимента по выявлению диагностических признаков присутствия трещины в конструкции. Сопоставление численного и натурального экспериментов показывает их качественное совпадение: уменьшение собственной частоты, появление комбинационных частот и рост амплитуд на них с увеличением глубины трещины.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, Гар-элемент, отклик, спектр отклика, комбинационные частоты.

Введение

Вибродиагностика является преимущественно экспериментальной областью знаний, в рамках которой возникновение дефекта и выявление его признаков производится при эксплуатации механизма или конструкции опико-визуальными методами. Однако, если повреждение находится под обшивкой или в труднодоступном месте, то нет возможности диагностирования из-за отсутствия доступа к зоне контроля. Отмеченного недостатка лишены методы вибродиагностики, при которых необходимо применять математические модели. В работе [1] рассматривается кусочно-линейная модель трещины в применении к стержневым конструкциям. Отмечается, что наиболее эффективным является конечно-элементный подход. В работах [2,3] представлена конечно-элементная модель вынужденных колебаний стержня с закрывающейся трещиной. Эквивалентность жесткости элемента с трещиной определяется на основе баланса энергии деформации. В статье [4] исследуются вынужденные колебания консольно-закрепленного бруса, где на примере балочного конечного элемента, имеющего трещину, предлагается алгоритм решения нелинейного конечно-элементного уравнения и отмечается, что при его реализации наблюдается появление высших гармоник в спектре отклика. Таким образом, во всех вышеприведенных работах объектом исследования является простейшая консольно-закрепленная балка.

В настоящей работе для определения диагностических признаков наличия трещины предлагается конечно-элементный подход, основанный на использовании Гар-элемента при динамическом воздействии на объект [5]. В качестве инструмента предлагается использовать профессиональные конечно-элементные пакеты. При этом задача значительно расширяется, т. к. можно моделировать вибро-акустические процессы в телах любой сложности и при наличии любого количества, как трещин, так и зазоров, имеющих место в любой конструкции при ее эксплуатации.

Постановка задачи

Как известно, при подаче гармонического сигнала на нелинейное устройство, в спектре на выходе должны присутствовать комбинационные частоты [6]. В качестве такого устройства выступает конструкция, подлежащая диагностированию. Если конструкция не имеет трещины (зазора), то на спектре должны наблюдаться только заданные гармоники. При появлении трещины конструкция становится нелинейной в силу ее переменной жесткости и в спектре должны присутствовать комбинационные частоты, по величине амплитуд которых можно судить о глубине трещины. Объектом конечно-элементного исследования в данной

работе была выбрана стальная прямоугольная балка-стенка с размерами $1 \times 0,1 \times 0,01$ м. Динамическое поведение упругой конструкции при отсутствии в ней трещин моделируется матричным дифференциальным уравнением

$$[M]\{\ddot{W}\} + [D]\{\dot{W}\} + [K]\{W\} = \{P_{(t)}\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[D]$, $[K]$ – постоянные матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно; $\{W_{(t)}\}$ – вектор узловых перемещений; $\{P_{(t)}\}$ – вектор узловой нагрузки.

Численное решение уравнения (1) дает дискретные значения вибропараметров на заданном временном интервале. При натурном эксперименте также получают дискретные значения аналогового сигнала вибропараметров с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В обоих случаях при спектральном анализе имеет место ограниченный спектр [6]. Поэтому для выбора временного шага интегрирования уравнения (1) предлагается воспользоваться теоремой Котельникова В.А., согласно которой «любую функцию $f(t)$, состоящую из частот от 0 до f_c , можно передавать с любой точностью при помощи чисел, следующих друг за другом через $1/2f_c$ секунд» [6]. Упругая конструкция без трещины является линейной. При гармоническом воздействии на неотклик должен быть гармоническим на той же частоте, но с другими амплитудой и начальной фазой [6].

Матричное уравнение (1) в этом случае приобретает вид

$$[M]\{\ddot{W}\} + [D]\{\dot{W}\} + [K]\{W\} = \{P\}\sin \omega t. \quad (2)$$

Результаты численного анализа

На рис. 1-4 приводятся схема нагружения, виброперемещения узла 21 и его спектр при различных вынужденных колебаниях.

Из рис. 1 видно, что линейчатый спектр воздействия на входе остается линейчатым и на выходе, что подтверждает адекватность конечно-элементного моделирования реальному динамическому процессу.

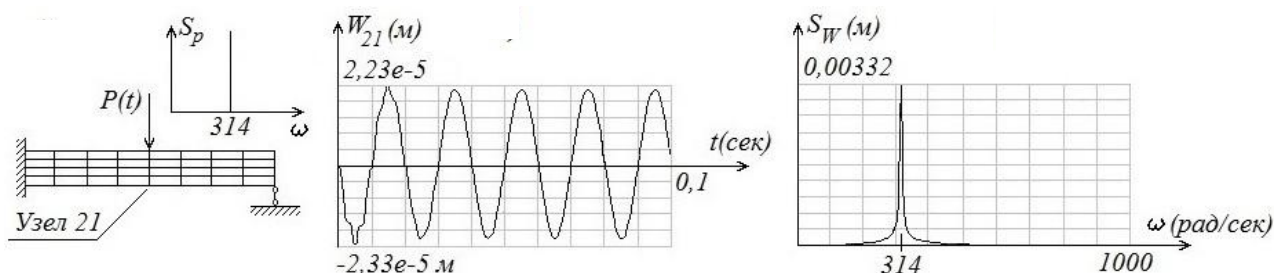


Рис. 1. Одночастотное воздействие

На рис. 2 продемонстрирован результат воздействия двухчастотного гармонического сигнала $P_{(t)} = 394 \sin(314t) + 394 \sin(200t)$ при произвольно заданных частотах.

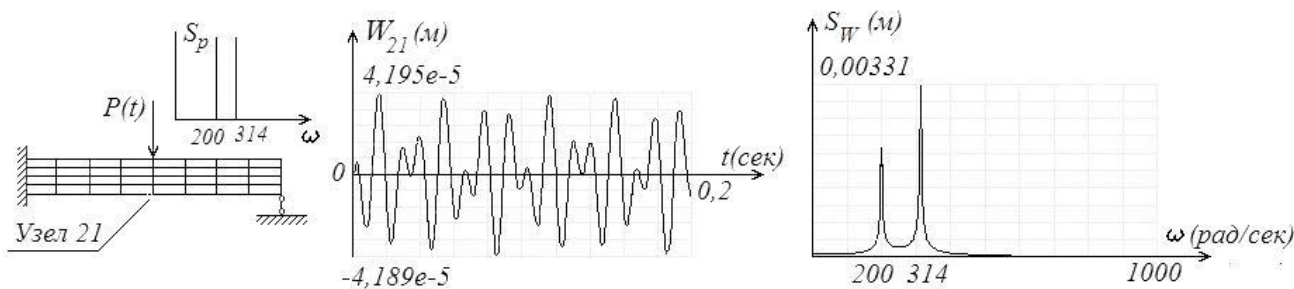


Рис. 2. Двухчастотное нагружение

При воздействии двухчастотным сигналом с близкими частотами ω_1 и ω_2 , удовлетворяющими условию $|\omega_1 - \omega_2| \ll \omega_1 + \omega_2$, и $P(t) = A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t$ должны иметь место биения [7], период которых определяется по формуле

$$T_{\text{биений}} = \frac{2\pi}{|\omega_1 - \omega_2|} = 0,251 \text{ сек,}$$

что при $\omega_1=100$ рад/сек и $\omega_2=125$ рад/сек совпадает с конечно-элементным моделированием (рис.3). При этом амплитуды гармоник имели значения $A_1 = A_2 = 394$ Н.

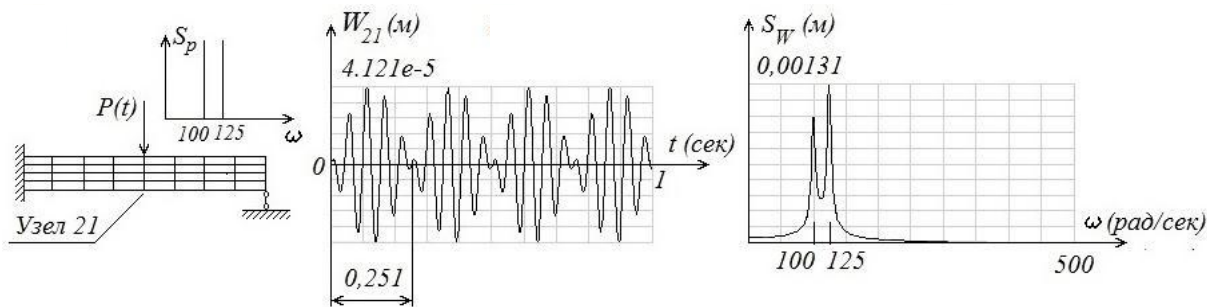


Рис. 3. Двухчастотное нагружение при близких по величине частотах (биение)

Результат аддитивного взаимодействия двух гармонических сигналов, значительно удаленных по частоте друг от друга, ($\omega_1=150$ рад/сек и $\omega_2=14$ рад/сек, $A_1=A_2=394$ Н) при прохождении через конечно-элементную модель представлен на рис. 4.

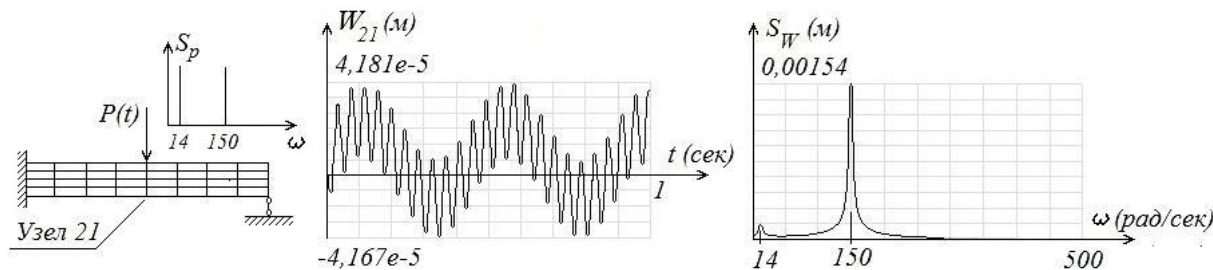


Рис. 4. Аддитивное взаимодействие

При наличии трещины конструкция становится нелинейной в силу переменной жесткости при открытии и закрытии трещины: при деформации балки-стенки в направлении закрытия трещины жесткость конструкции равна бездефектному состоянию, при деформации балки-стенки в направлении раскрытия трещины жесткость ее уменьшается и зависит от

глубины трещины (рис. 6). В этом случае динамическое поведение КЭ-модели при гармоническом одночастотном воздействии описывается нелинейным матричным уравнением (3), где глобальная матрица жесткости становится зависимой от перемещений узлов и, следовательно, от времени.

$$[M]\{\ddot{W}\} + [D]\{\dot{W}\} + [K(W)]\{W\} = \{P\}\sin \omega t. \quad (3)$$

Учитывать закрытие и открытие трещины в процессе динамического процесса деформирования КЭ-модели предлагается с помощью двухузловых Гар-элементов, работающих на сжатие. На рис. 5 показаны результаты конечно-элементного моделирования ситуации, когда в одном из опорных закрепления появилась трещина, т. е. произошло полное разрушение опоры. Разрушенная опора моделировалась Гар-элементом.

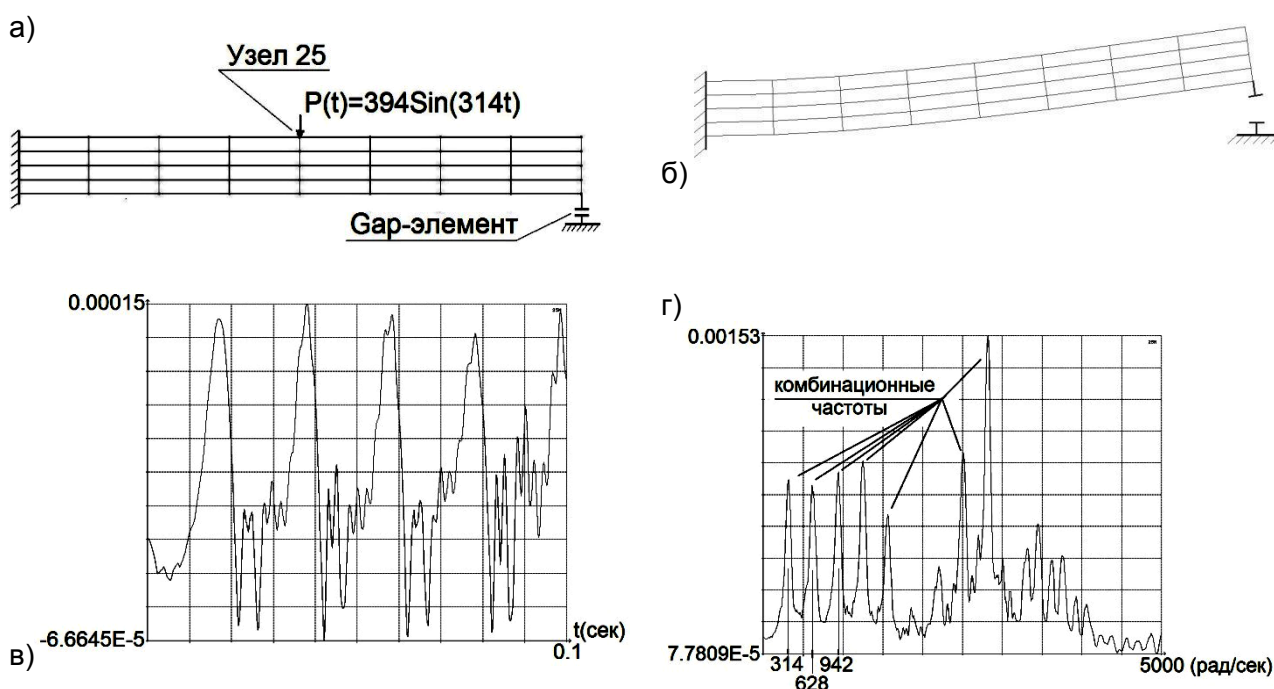


Рис 5. Одночастотное воздействие на балку-стенку при разрушенной опоре:
а) нагрузка балки-стенки; б) деформированный вид при движении вверх;
в) виброперемещения узла 25; г) спектр виброперемещений узла 25

На рис. 6 приведенные конечно-элементные расчеты при вынужденных колебаниях демонстрируют, как в колебательном процессе ведет себя трещина (закрытие-открытие) и как изменяется отклик наблюдаемого узла и его спектр по мере увеличения длины трещины. Двух-узловые Гар-элементы располагались между соответствующими узлами на противоположных берегах трещины, тем самым препятствуя «наползанию» их друг на друга. Анимация колебательного движения конечно-элементной модели показывает, что берега трещины при ее закрытии не наползают друг на друга, что свидетельствует о правильной работе Гар-элементов. Возникающие в них усилия дают возможность оценить напряженно-деформированное состояние в окрестности трещины. Появление гармоник, кратных основной частоте свидетельствует о наличии трещины, а их увеличение говорит о увеличении глубины трещины, что позволяет принять эти параметры за диагностические признаки.

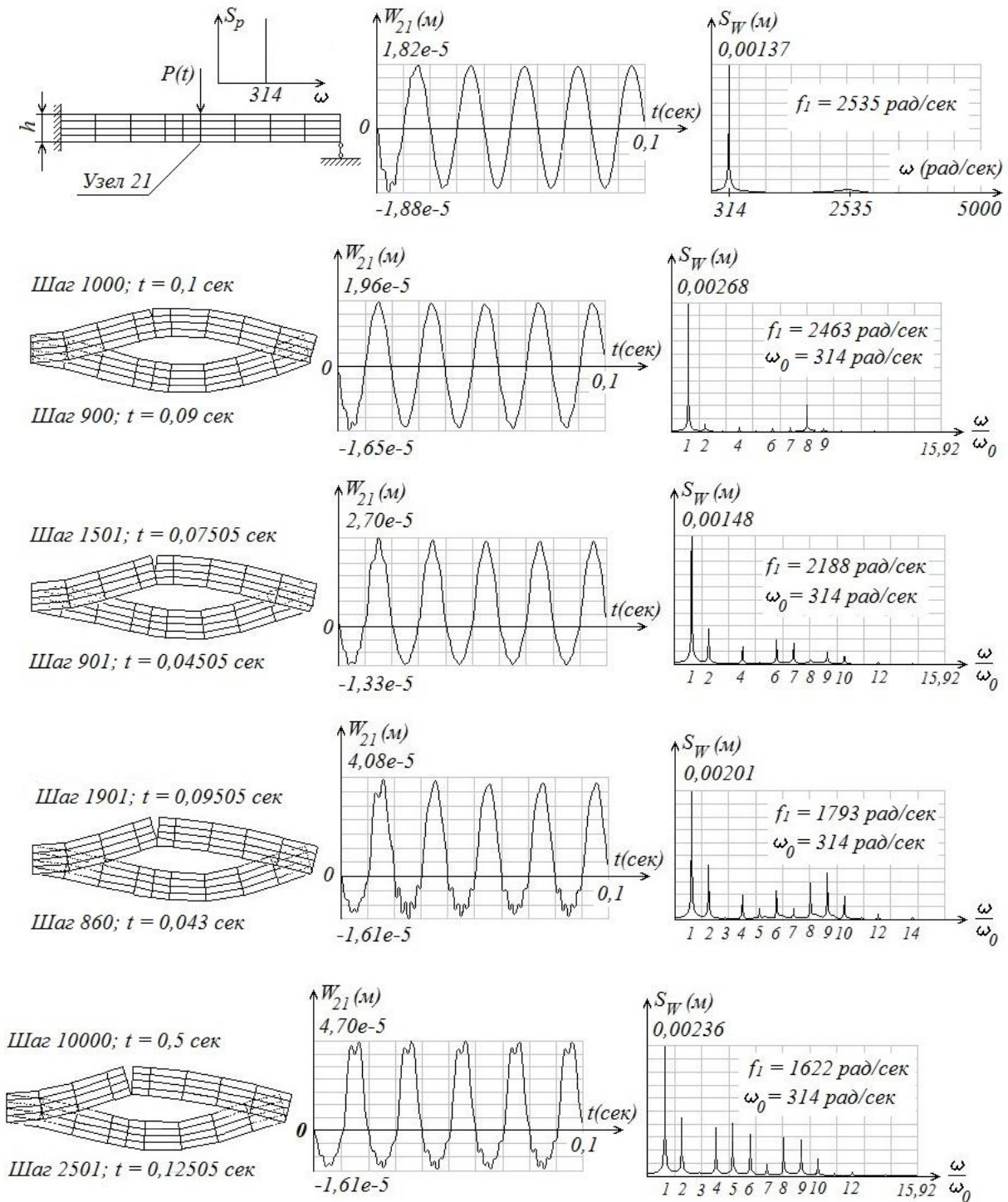


Рис. 6. Изменение отклика и его спектра в зависимости от глубины трещины

Результаты натурного эксперимента

Высказанные ранее предположения и выполненные конечно-элементные исследования были проверены экспериментально на консольнозакрепленной пластине, имеющей груз на свободном конце и совершающей вертикальные свободные колебания (рис. 7).

Нагружение осуществлялось вручную путем отклонения груза и резким его отпуском. Величина отклонения подбиралась опытным путем, чтобы наблюдалось полное закрытие прорези (трещины) на первых циклах колебаний. В результате сосредоточенная масса и пластина совершали свободные затухающие колебания. В районе сосредоточенной массы был установлен пьезометрический вибродатчик Д-19. Преобразование аналогового сигнала

с вибродатчика в цифровую форму осуществлялось с помощью платы L-305. Для цифровой обработки сигнала с целью получения амплитудно-частотного спектра применялось программное обеспечение «PowerGraf». По спектру определялась основная частота свободных колебаний при каждой глубине трещины. Также при каждой глубине трещины h с помощью твердотельного моделирования определялись собственные частоты, сравнение которых приводится на рис. 7,б.

На рис. 8 представлены спектры свободных колебаний балки имеющей прорези (трещины) различной глубины. Толщина пластины равна 8 мм. Прорезь осуществлялась с помощью обыкновенного ножовочного полотна по металлу и имела глубины 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм, 5 мм, 6 мм и 7 мм. Из рис. 7 видно, что при появлении трещины (прорези) в спектре появляются гармоники, амплитуды которых растут с увеличением глубины прорези.

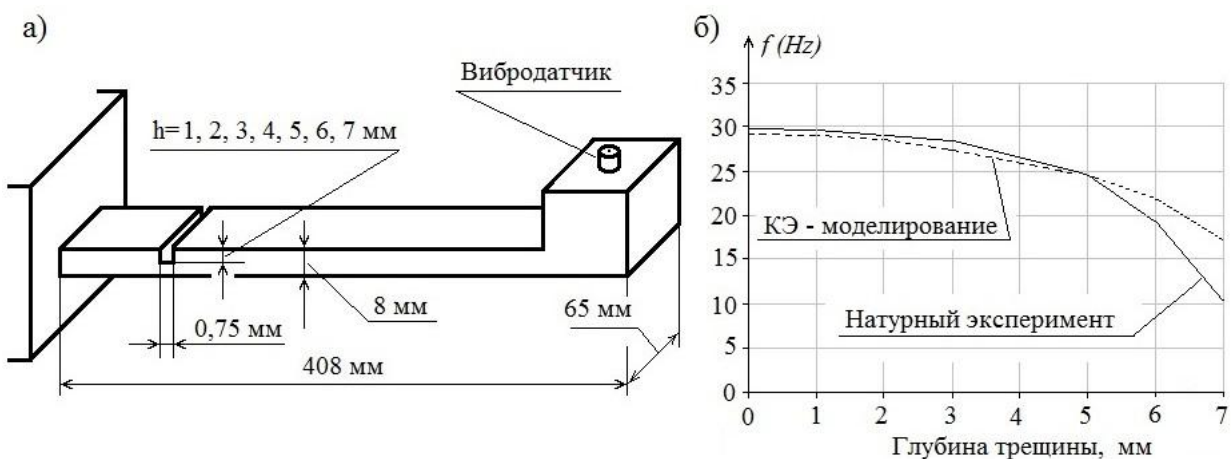


Рис. 7. Схема установки и частотные характеристики:

а) экспериментальная установка;

б) собственные частоты из конечно-элементного и натурального экспериментов

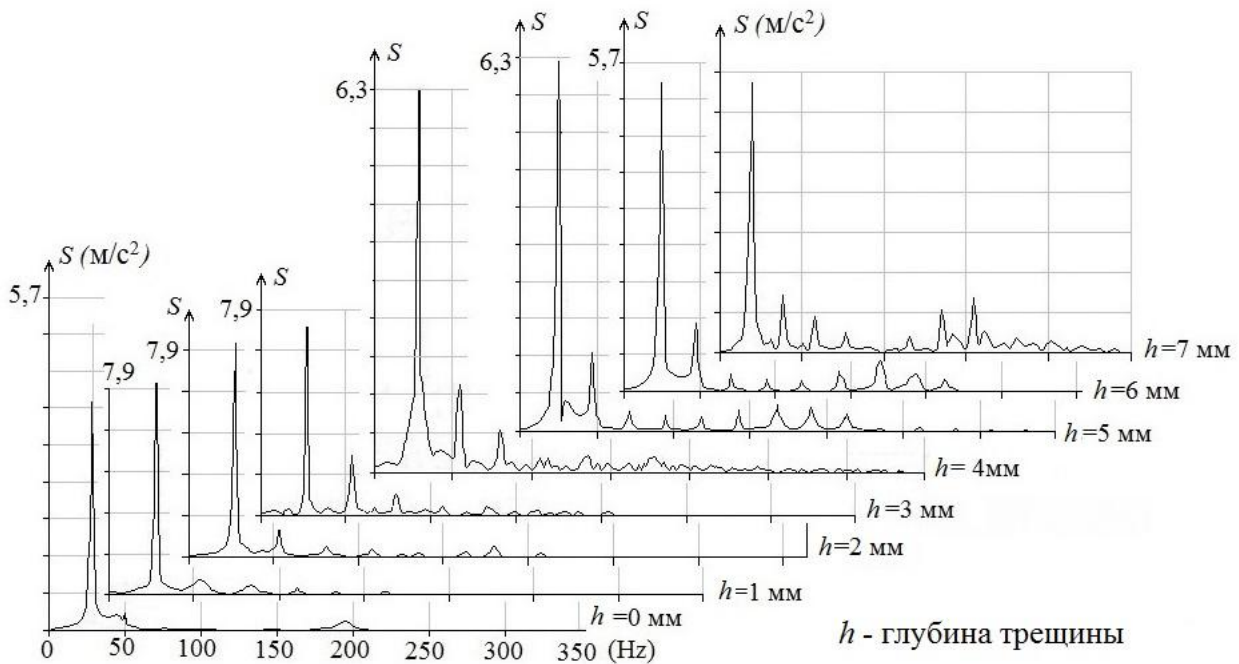


Рис. 8. Спектры свободных колебаний при различных глубинах трещины

На рис. 8 видно, как изменяется спектр ускорений с увеличением глубины прорези (трещины): с появлением трещины в конструкции в спектре появляются гармоники (комбинационные частоты при одной нулевой частоте), кратные основной частоте (частоте свободных колебаний). При вынужденных колебаниях основной частотой является частота возбуждения. Сравнение спектров на рис. 6 и 8 показывает, что они качественно совпадают.

Выводы

Проведенное теоретико-экспериментальное исследование показало, что имеется возможность для определения диагностических признаков появления трещин в конструкции применять конечно-элементное моделирование с использованием Гар-элементов, минуя дорогостоящий натурный эксперимент. При этом конструкция может быть любой конфигурации, с любым количеством и ориентацией трещин и при любом нагружении.

Сопоставление численного и натурального экспериментов показало их качественное совпадение: уменьшение собственной частоты, появление комбинационных частот и рост амплитуд на них с увеличением глубины трещины.

Библиографический список

1. Бересневич, В.И. Сопоставительный анализ математических моделей усталостной трещины [Текст] // Вестник научно-технического развития. 2009. №12 (28). С. 12-19.
2. Бовсуновский, О.А. Конечноэлементная модель для исследования колебаний стержня с закрывающейся трещиной [Текст] // Проблемы прочности. 2008. №5(395). С. 114-120.
3. Бовсуновский, А.П. Вибрационные характеристики усталостного повреждения стержневых элементов конструкций [Текст] / А.П. Бовсуновский, В.В. Матвеев // Проблемы прочности. 2002. №1 (355). С. 52-69.
4. R. Ruotolo, C. Surace, P. Crespo, D. Storer. Harmonic analysis of the vibration of a cantilevered beam with a closing crack // Computers & Structures. 1996. Vol. 61. No. 6. Pp. 1057-1074.
5. Дербасов, А.Н. Практика применения конечно-элементного анализа в преподавании дисциплины «Основы вибродиагностики конструкций и машин // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5.
6. Харкевич, А.А. Спектры и анализ [Текст] / А.А. Харкевич. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 216 с.
7. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов [Текст] / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.