

Методика идентификации конечно-элементной модели строительных конструкций

¹Живаев А.А., ²Болдырев Г.Г.

¹ООО «НПП Геотек»

²Пензенский государственный университет архитектуры и
строительства

Идентификация или калибровка конечно-элементной (КЭ) модели - это процесс подбора параметров КЭ модели с целью наилучшего описания моделью результатов измерений (эксперимент) в процессе мониторинга строительных конструкций [1]. Идентификация позволяет повысить достоверность одновременно результатов расчета и результатов измерений (ускорение колебаний). Без сопоставления измеренных данных и данных расчета невозможно с достаточной степенью достоверности утверждать, что полученные динамические характеристики, например, частоты собственных колебаний конструкций, действительно относятся к свойствам самой конструкции.

В общем виде процесс идентификации параметров КЭ модели осуществляется в несколько этапов.

Этап 1. Выбор домена данных, в котором представляются результаты расчетов и эксперимента. В динамике конструкций различают домен времени, частот и модальный домен (домен форм колебаний).

Этап 2. Определение параметров модели, значения которых в дальнейшем будут корректироваться.

Этап 3. Выбор целевой функции, зависящей от корректируемых параметров.

Этап 4. Выполнение процедуры оптимизации с целью идентификации значений параметров, которые минимизируют значение целевой функции.

Ниже на практическом примере рассмотрена методика идентификации, которая применима к различным объектам, в том числе и к зданиям АЭС.

1. Постановка задачи идентификации КЭ модели

Рассмотрим последовательность решения данной задачи на примере анализа данных измерений динамического поведения трибун ледовой арены, в городе Омске. Решение данной задачи включает 4 этапа, отмеченные выше. Первым является этап выбора одной из динамических характеристик для анализа результатов измерений и расчетов.

2. Выбор домена представления данных

Для задачи идентификации КЭ модели одной из секций трибун были выбраны данные частотного домена - частоты собственных колебаний

конструкций. Домен частот выбран потому, что при оценке технического состояния конструкций трибуны используются частоты собственных колебаний, а КЭ модель, описывающая состояние конструкции должна иметь в результатах такой же формат данных. Частоты собственных колебаний определялись методом SSI [2]. Из общего массива собственных частот выбирались несколько первых частот. Типичный спектр отклика точки конструкции трибуны от естественного вибрационного фона показан на рис. 1.

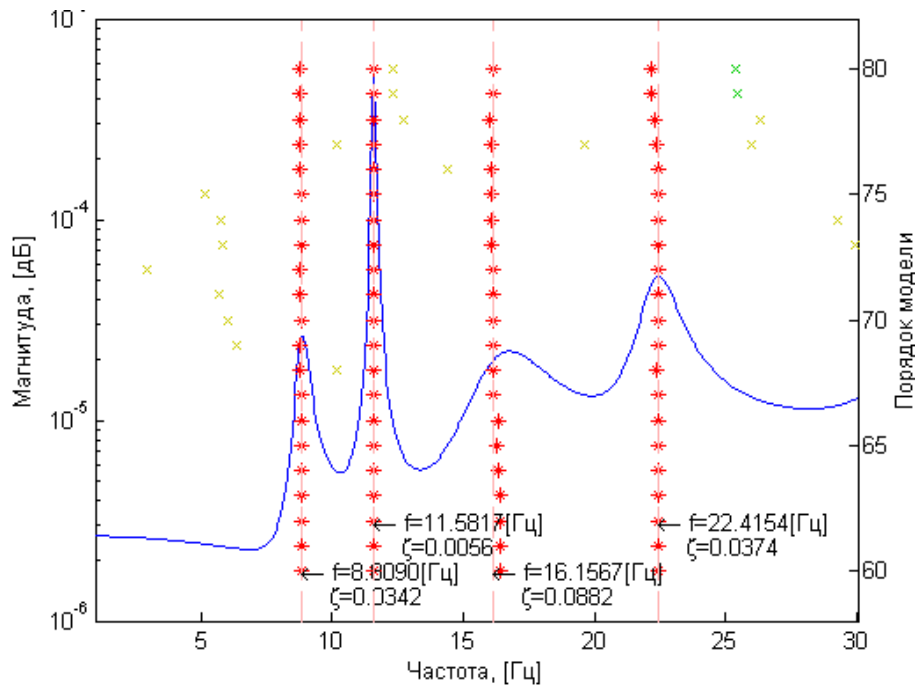


Рис. 1. Типичный спектр отклика конструкции трибун от естественного вибрационного фона

На рис. 1 звездами выделены собственные частоты колебания конструкции, которые используются в процедуре идентификации КЭ модели.

3. Выбор параметров для оптимизации

Имеются как минимум два параметра КЭ модели, от величины которых зависит различие между результатами расчета и эксперимента. Эти параметрами являются модуль упругости материала железобетонной конструкции трибун и плотность железобетона.

4. Выбор целевой функции

В качестве целевой функции аналогично работе [3] была выбрана следующая функция:

$$F_{obj} = \sqrt{\sum (f_{meas} - f_{FEM})^2}, \quad (1)$$

где F_{obj} - величина целевой функции; f_{meas} и f_{FEM} - векторы измеренных и расчетных значений собственных частот колебания конструкции.

5. Оптимизация целевой функции

Под оптимальностью понимается максимальность или минимальность [4]. В данном случае рассматривается минимальность меры ошибки между результатами эксперимента и КЭ моделью, т.е. целевой функции (1). Для решения задачи оптимизации был использован пакет оптимизации и вероятностного анализа LS-OPT [5].

Пакет LS-OPT реализует технологию метамодельного построения целевой функции. Это означает, что для определения минимума (максимума) целевой функции значения указанной функции аппроксимируются другой функцией, и далее происходит поиск экстремума метамодели. Это позволяет вместо оригинальной целевой функции вычислить суррогат, обладающий подобными свойствами. В качестве аппроксимирующей функции LS-OPT использует полиномиальную функцию (линейную, квадратичную, эллиптическую), нейронную сеть, кригинг интерполяцию или пользовательские аппроксиматоры.

В данной работе использована нейронная сеть с радиальной передаточной функцией (radial basis function network). Указанная аппроксимирующая модель обладает достаточной гибкостью для описания целевой функции (1). Используемая нейронная сеть имеет всего один скрытый слой. Топология сети показана на рис. 2.

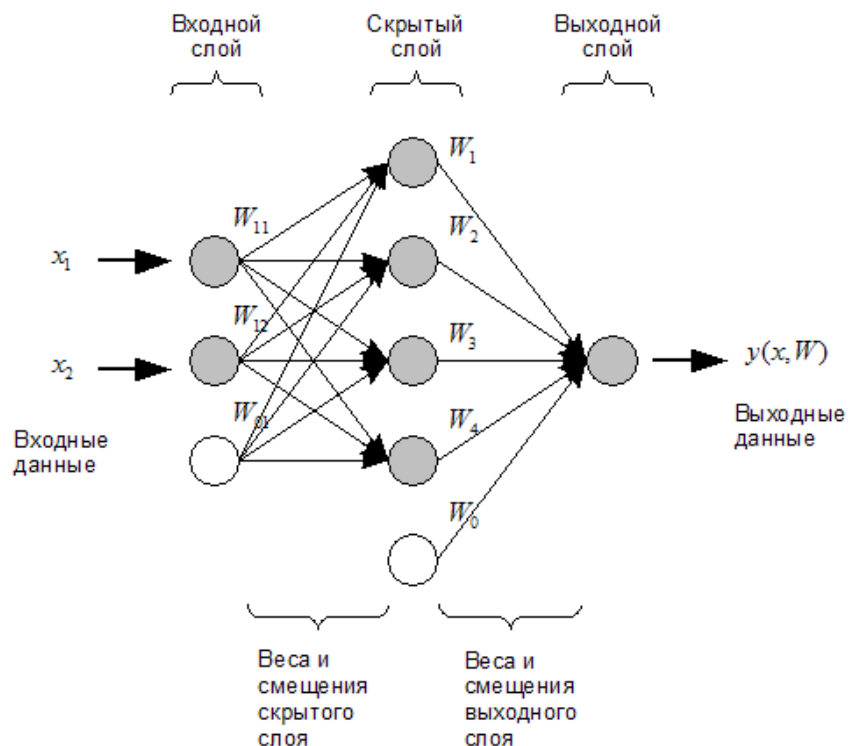


Рис. 2. Топология нейронной сети

Для поиска оптимума LS-OPT использует стохастические, градиентные и гибридные методы. В данной работе применен гибридный адаптивный алгоритм отжига (hybrid adaptive simulated annealing - hybrid ASA). Используемый алгоритм позволяет находить глобальный минимум, используя стохастический алгоритм ASA и градиентный скачковый оптимизатор (leapfrog optimizer). В гибридном методе алгоритм ASA находит локальные области с минимумом из области определения целевой функции, а оптимизатор определяет минимум для заданной локальной области.

6. Создание конечно-элементной модели

Для численного расчета был применен пакет КЭ анализа ANSYS 11.0 [6]. Для поставленной задачи идентификации указанное программное средство позволяет построить КЭ модель, выполнить модальный анализ и вычислить спектры отклика конструкции на заданное возбуждение.

Для анализа был выбран типовой фрагмент трибуны в осях 6-7_C-D конструкции трибун спортивного комплекса «Арена-Омск». Схема размещения акселерометров (красный цвет) на конструкции показана на рис. 3.

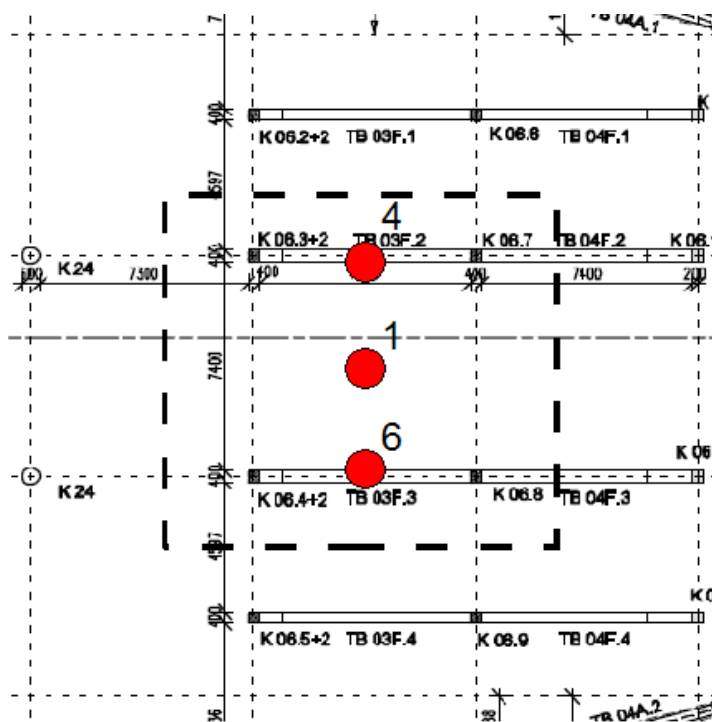


Рис. 3. Фрагмент трибуны в осях 6-7_C-D

Модель, составленная в ANSYS, содержит следующие типы конечных элементов: SOLID186, CONTA174, TARGE170. Для моделирования трибунных элементов, балок трибун, закладных деталей применен конечный элемент SOLID186. Для моделирования контактов между элементами конструкций применены конечные элементы CONTA174 и TARGE170.

Модель фрагмента трибуны в осях 6-7_C-D была составлена для выполнения спектрального анализа.

Ввиду симметричности задачи была рассмотрена половина фрагмента трибуны. Общий вид КЭ модели представлен на рис. 4.

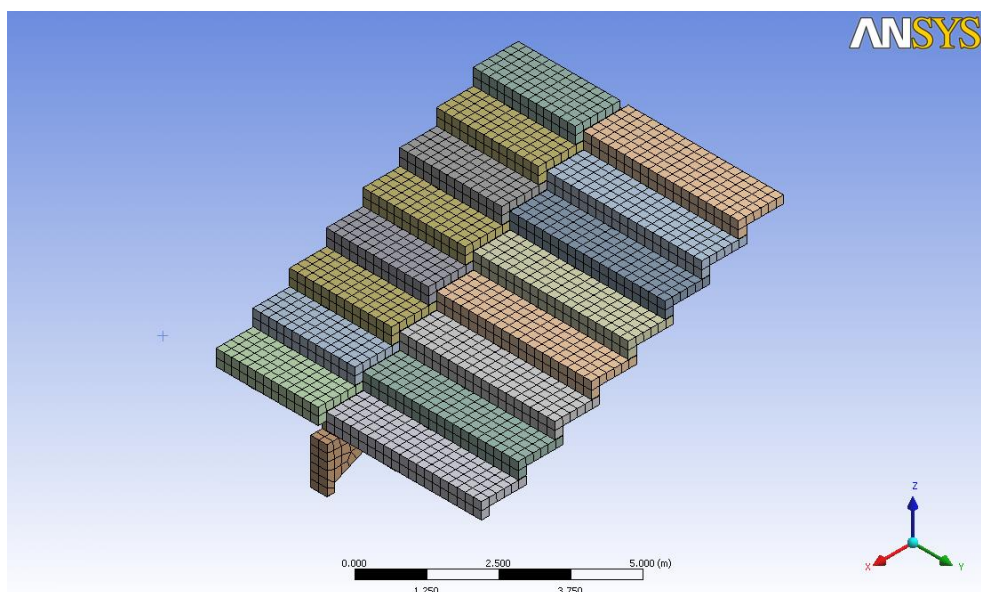


Рис. 4. КЭ модель половины фрагмента трибуны

Для выявления действительной работы конструкций фрагмента трибуны были составлены две КЭ модели. Первая модель имела жесткий контакт по всем закладным деталям, а вторая – жесткий контакт только в опорных закладных. Спектры отклика указанных КЭ моделей и экспериментальных данных представлены на рис. 5 (значения параметров КЭ моделей одинаковые).

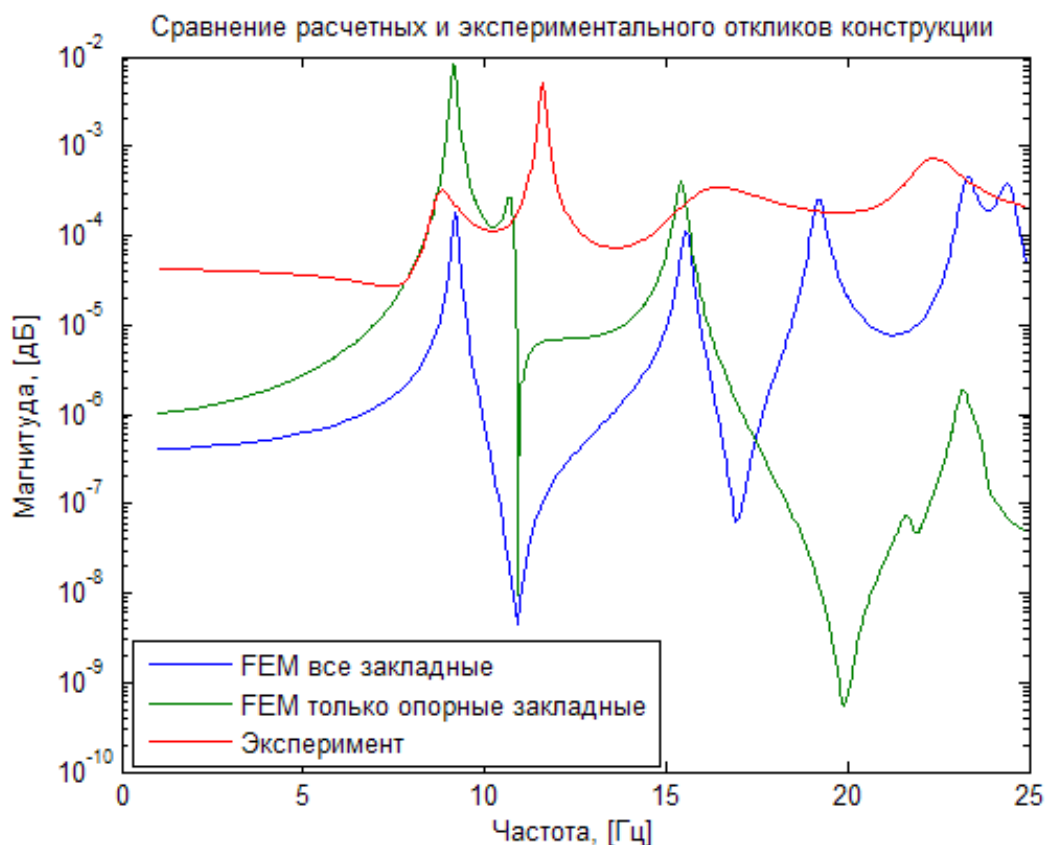


Рис. 5. Спектры мощности откликов КЭ моделей и эксперимента

Из рис. 5 видно, что спектры двух КЭ моделей резко отличаются друг от друга при одних и тех же параметрах. КЭ модель, в которой работают все закладные детали, имеет более высокую первую собственную частоту. Это связано с большей изгибной жесткостью указанной модели. Отличия амплитуд в спектре (вертикальная ось) вызвано отсутствием информации (невозможностью получения информации) о параметрах воздействия. Поэтому в расчете была принята нагрузка, приближенная к общему уровню зафиксированной вибрации. Далее для идентификации параметров КЭ модели были использованы только величины собственных частот. Что касается отличия величин собственных частот КЭ моделей и эксперимента, то это отличие можно уменьшить, выполнив процедуру оптимизации целевой функции.

Рассмотрим более подробно алгоритм расчета спектров в ANSYS, процедуру и результаты идентификации.

7. Алгоритм расчета спектров отклика КЭ модели в ANSYS

Рядовой пользователь ANSYS имеет возможность использовать, по крайней мере, два интерфейса для взаимодействия с расчетным ядром ANSYS - графический интерфейс и интерфейс командной строки. В зависимости от ситуации выгодно использовать оба способа, как показано далее.

Алгоритм расчета спектров в ANSYS:

1. Создание геометрической модели с последующим экспортом данных в формат SAT (Standard ACIS Text). Для данных целей подходит популярная среда черчения AutoCAD [7].

2. Создание КЭ модели в среде ANSYS Workbench с применением графического интерфейса:

2.1. Импорт геометрической модели файлом *.SAT в Ansys.

2.2. Назначение материалов элементам и ввод их параметров.

2.3. Задание граничных условий.

2.4. Модальный анализ. Определение необходимого количества собственных форм колебаний в зависимости от требуемого диапазона частот для вычисления спектра отклика, сохранение КЭ модели в *.db файл ANSYS.

3. Вычисление спектров отклика расчетным ядром ANSYS в фоновом режиме (batch):

3.1. Загрузка КЭ модели из *.db файла, созданного средой ANSYS Workbench.

3.2. Задание спектральной плотности нагрузки.

3.3. Вычисление факторов форм колебаний (participation factors).

3.4. Расчет спектров отклика для заданных точек модели (результаты показаны на рис. 7).

3.5. Экспорт спектров в текстовый файл *.csv.

Следует отметить, что при выполнении процедуры оптимизации параметров п. 1 и п. 2 описанного алгоритма выполняются один раз. Пункт 3 процедуры выполняется при каждом шаге оптимизации. Спектральная нагрузка имеет плоский спектр в интересующем диапазоне частот от 1 Гц до 25 Гц.

8. Реализация процедуры оптимизации

Для более наглядного представления процедуры идентификации на рис. 6 приведена диаграмма потока данных.

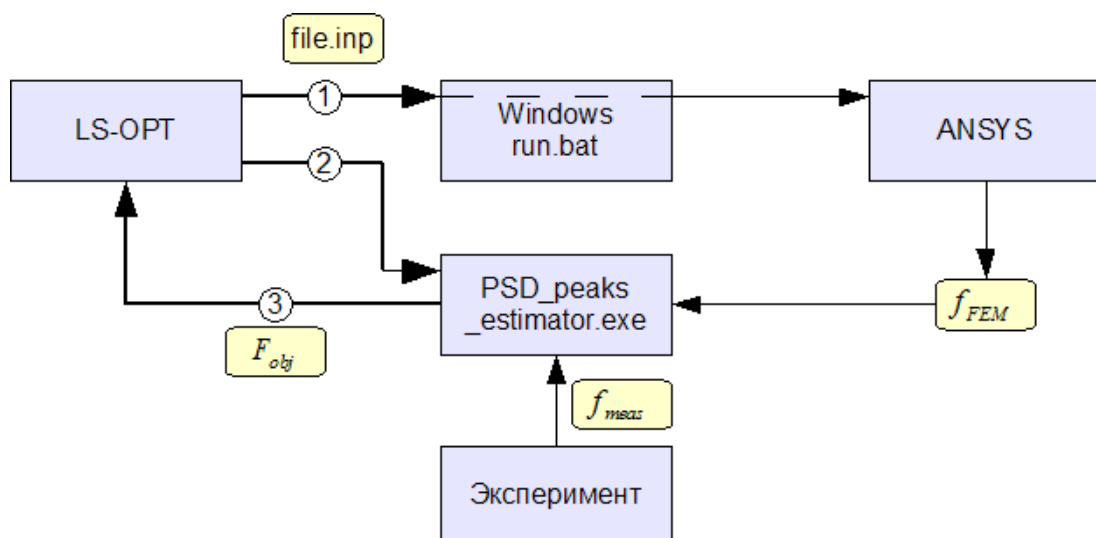


Рис. 6. Диаграмма потока данных процедуры идентификации КЭ модели

Следует отметить, что процедура идентификации – это итерационный процесс с заранее заданным количеством итераций. В данном случае было задано максимальное количество итераций, равное 15 (подбирается опытным путем), и максимальное значение различия целевой функции между итерациями, равное 0,1.

В начале оптимизации в LS-OPT загружается файл конфигурации расчета «file.inp». В этом файле содержится набор команд на языке APDL для постановки задачи расчета в ANSYS. Далее вводятся переменные (в данном случае E - модуль упругости железобетона, ρ – плотность железобетона) и их область допустимых значений, определяющая разумные пределы возможных изменений параметров. На этапе решения выполняются три задачи, которые показаны стрелками с кружками и номерами на рис. 6:

1. Измененный файл «file.inp» передается в командный файл, исполняемый операционной системой Windows «Windowsrun.bat». В результате выполнения командного файла запускается расчет КЭ модели в ANSYS с параметрами, установленными для каждого шага LS-OPT. ANSYS, выполнив расчет, сохраняет вектор отклика точки конструкции в файле «f_fem».

2. LS-OPT, получив информацию о факте окончания расчета КЭ модели, направляет результаты расчета КЭ «f_fem» и данные эксперимента «f_meas» в программу «PSD_peaks_estimator.exe». Указанная программа разработана специально для решения задач процедуры оптимизации. «PSD_response_estimator.exe» находит пики в спектрах КЭ модели и эксперимента, а затем вычисляет значение целевой функции.

3. Вычисленное значение целевой функции передается в LS-OPT.

9. Результаты идентификации

В процедуре идентификации использовалась модель, имеющая жесткий контакт только в опорных закладных. В процессе решения было выполнено 15 итераций, в каждой итерации по шесть расчетов, плюс один контрольный расчет. Весь цикл расчетов включал 91 расчет. Спектры отклика идентифицированной КЭ модели и экспериментального отклика для точки 1 (см. рис. 3) показаны на рис. 7.

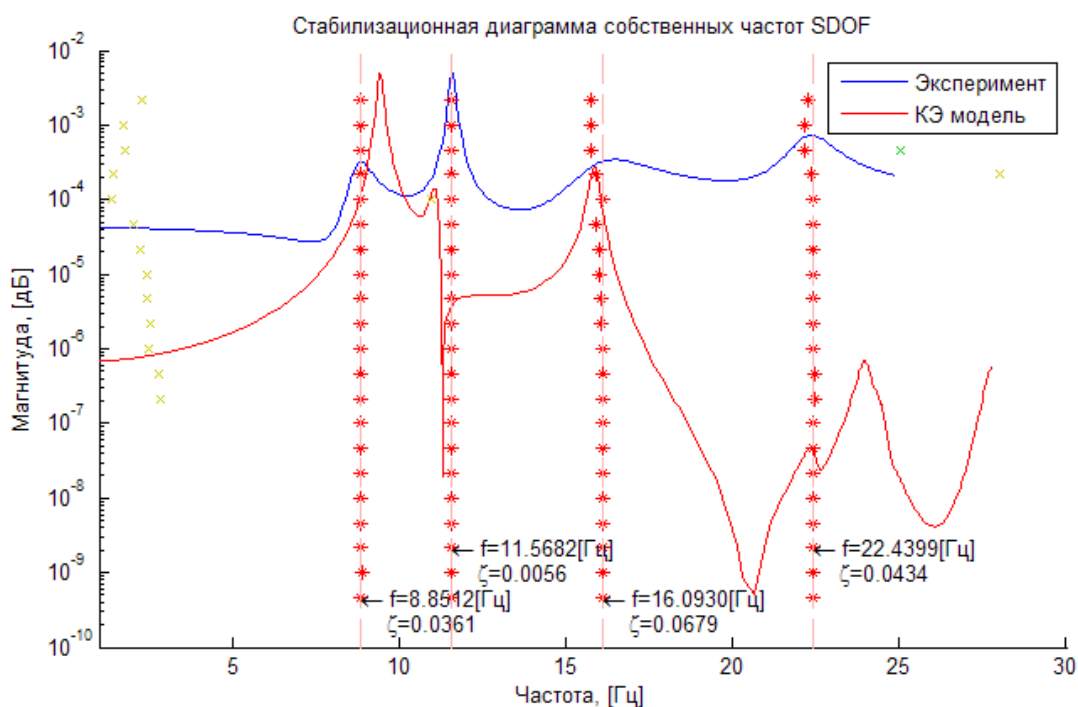


Рис. 7. Спектры отклика калиброванной КЭ модели и экспериментального отклика

В результате выполнения процедуры калибровки были идентифицированы следующие параметры:

- интегральный модуль упругости железобетона $E_{\text{mod}}=36,8$ ГПа;
- плотность железобетона $\rho=2695$ кг/м³.

Модуль упругости железобетона получился больше, чем начальный модуль упругости бетона, равный 32,5 ГПа, это более верно, так как сечения бетонных элементов содержат арматуру. Плотность железобетона получилась также несколько больше, чем обычно принимается в расчетах (2500 кг/м³), т.к. в модели не было учтено заполнение пустот между трибунными элементами, масса стяжки и масса сидений. В целом результаты получились адекватными, идентифицированная КЭ модель дает значения собственных частот, схожие с экспериментом, по крайней мере, в трех первых пиках спектра отклика, как показано на рис. 7.

Отличие величин амплитуд между моделью и экспериментом вызвано тем, что в действительности нагрузка на конструкцию трибун, строго говоря, не является «белым шумом» и изменяется во времени. Более того, в окрестностях частоты собственных колебаний 11,57 Гц зафиксирована гармоника, т.е. имеет место явление резонанса от воздействия двигателя с частотой вращения вала 700 об./мин. Ввиду слабого воздействия вибрации резонанс не опасен. Различия величин идентифицированных частот между моделью и экспериментом обусловлены отличием действительной работы конструкции фрагмента трибуны от предполагаемой работы, заложенной в КЭ модель.

Рассмотренная методика идентификации позволяет создать математическую модель здания или сооружения, калиброванную данными измерений, которую можно использовать в дальнейшем для прогноза изменения технического состояния конструкций во времени.

Список литературы

1. Marwala, T. Finite-element-model Updating Using Computational Intelligence Techniques. Applications to Structural Dynamics [Text] / T. Marwala. – UK: Springer-Verlag London Limited, 2010. – 254 p.
2. Structural vibration solutions A/S. Software for operational modal analysis. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.svibs.com> (дата обращения: 27.12.2008).
3. Livermore Software Technology Corp. LS-Opt [Электронный ресурс] – URL: <http://www.lsoptsupport.com>. (дата обращения: 07.02.2011).
4. Гилл, Ф. Практическая оптимизация [Текст] / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт; под. ред. А.А. Петрова – М.: Мир, 1985. – 509 с.
5. Stander, N. LS-OPT® User's Manual. A design optimization and probabilistic analysis tool for the engineering analyst [Text] / N. Stander, W. Roux, T. Goel et al. – Livermore software Technology Corporation, 2010. – 523 p.
6. Release 11.0 Documentation for ANSYS. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/ansys.set.html>. (дата обращения: 17.09.2010).
7. Autodesk, Inc. [Электронный ресурс] – URL: <http://usa.autodesk.com> (дата обращения: 02.05.2010).