

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ПОДАТЛИВОСТИ ОПОРНЫХ УЗЛОВ

**Столповский Г.А., канд. техн. наук, доцент, Герц В.А., Романюк П.В.
Оренбургский государственный университет**

При проектировании производственных зданий и сооружений, конструкции которых помимо статических нагрузок воспринимают также динамические нагрузки (например, от технологического оборудования), во всех случаях необходимо проведение частотного анализа в составе более общего динамического анализа.

Суть частотного анализа заключается в определении частотных характеристик собственных колебаний строительных конструкций, соответствующих определенным формам колебаний, и сравнении их с частотными характеристиками динамической нагрузки. Во избежание явления резонанса, приводящего к разрушению конструкций, диапазон частот динамической нагрузки не должен попадать в область частот собственных колебаний конструкций.

Проводимые в [1, 2] исследования позволяют говорить о том, что значительное влияние на частотные характеристики собственных колебаний оказывает наличие пластических шарниров, а также податливых соединений. Поэтому актуальной темой становится исследование влияния податливости опорных закреплений на частоту собственных колебаний элементов строительных конструкций.

На сегодняшний день в строительной отрасли применяется широкая номенклатура конструкций. Всем этим конструкциям соответствуют те или иные конструктивные решения узлов их сопряжения, а также закрепления конструкций на опоре. Методы расчета опорных узлов, состоящих из множества деталей, представляющих собой пластины конечной изгибной и сдвиговой жесткости, существенно отличаются от методов расчета элементов постоянного по длине сплошного сечения за счет учета податливости механических связей, соединяющих между собой элементы опорных узлов.

В настоящее время расчет несущих конструкций на статические и динамические нагрузки осуществляется отдельно без учета существующих взаимосвязей между физико-механическими параметрами конструкций, характерных для каждого вида воздействия внешних нагрузок.

Новый подход к исследованию данных взаимосвязей был предложен профессором В.И. Коробко, который выявил фундаментальную закономерность в строительной механике для упругих изотропных сплошных пластин, основу которой представляет функциональная взаимосвязь между максимальным прогибом нагруженных пластин и их основной частотой колебаний в ненагруженном состоянии.

Рассматривая две пластины, входящие в состав произвольного узла и соединенные податливыми связями, указанная закономерность имеет вид системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} D_C \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) - q(x, y) = 0, \\ D_C \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) + m \frac{\partial^4 W}{\partial t^4} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где D_C - цилиндрическая жесткость составной пластинки, которая определяется в зависимости от цилиндрической жёсткости цельной пластинки D_M :

$$D_C = \psi \cdot D_M = \psi \cdot \frac{E \cdot (2h)^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}. \quad (2)$$

Коэффициент ψ напрямую зависит от коэффициента жесткости сопряжения пластин, и очевидно:

$$\psi = \frac{\sigma_C}{\sigma_M} < 1. \quad (3)$$

В системе уравнений (1) выразим функцию прогибов в виде произведения максимального прогиба W_0 на единичную функцию $f(x, y)$. Затем подставим это выражение в дифференциальные уравнения поперечного изгиба и свободных колебаний пластин:

$$W(x, y) = W_0 f(x, y). \quad (4)$$

$$\begin{cases} D_C \cdot W_0 \cdot \Delta^2 \cdot \Delta^2 \cdot f - q(x, y) = 0, \\ D_C \cdot \Delta^2 \cdot \Delta^2 \cdot f + \omega^2 \cdot m \cdot f = 0, \end{cases} \quad (5)$$

Если пластина воспринимает равномерно распределенную нагрузку q , то проинтегрировав уравнения (4) и (5) по всей площади пластины, после необходимых преобразований получим:

$$W_0 = K_w \frac{q}{D_C} \cdot \frac{A^2}{K_f^2 + B \cdot K_f}; \quad \omega^2 = K_\omega \frac{D_C}{m} \cdot \frac{K_f^2 + B \cdot K_f}{A^2}. \quad (6)$$

Умножив выражения (6) друг на друга, получим:

$$W_0 \cdot \omega^2 = K_w \cdot K_\omega \cdot \frac{q}{m} = K \cdot \frac{q}{m}, \quad (7)$$

где W_0 – максимальный прогиб пластины,

ω – частота собственных колебаний,

K , K_w и K_ω – коэффициенты пропорциональности, зависящие от формы пластинок и вида граничных условий,

q – равномерно распределенная нагрузка,
 m – масса единицы площади пластинки.

Поскольку коэффициенты K , K_w и $K\omega$ зависят от граничных условий и очертаний пластины, то из выражения (7) следует важная закономерность: для упругих изотропных пластин одинаковых форм с однородными граничными условиями произведение максимального прогиба от действия равномерно распределенной нагрузки на квадрат их основной частоты колебаний в ненагруженном состоянии с точностью до размерного множителя q/m есть величина постоянная.

Однако, учитывая, что в приведенной закономерности взаимосвязь произведения максимального прогиба на квадрат основной частоты колебаний не зависит от жесткостных характеристик пластин, можно предположить, что эта закономерность будет справедлива и для составных пластин на податливых связях, которыми фактически и являются целый ряд опорных узлов элементов строительных конструкций. Таким образом, наблюдается наличие функциональной связи как максимального прогиба составной пластинки от коэффициента жесткости сопряжения элементов опорного узла, так и основной частоты колебаний. Для подтверждения этих предположений требуется проведение комплекса дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Следует отметить, что математическая модель указанной закономерности легла в основу нового научного направления, связанного с развитием динамических (вибрационных) методов диагностики и контроля качества строительных конструкций, в том числе и находящихся в условиях эксплуатации, при использовании которых существенно уменьшается трудоемкость эксперимента как за счёт значительного сокращения подготовительного периода по сравнению со статическими испытаниями, так и за счёт проведения самих испытаний. При использовании описанной выше фундаментальной закономерности для изотропных пластин во многих случаях достаточно проводить только динамические испытания при определении критериев жесткости.

Еще одной задачей, которую возможно решить вибрационными методами, является уточнение расчетных схем конструкций, находящихся в эксплуатации. Так, при расчете и проектировании конструкций используют идеализированные расчетные схемы, однако, при эксплуатации они не отражают действительных условий опирания, а само понятие «жесткое сопряжение» не всегда приемлемо.

Для изотропных пластин различного очертания использование взаимосвязи максимального прогиба и частот собственных колебаний позволяет упростить решения многих инженерных задач. Однако для расчета именно опорных закреплений строительных конструкций указанная фундаментальная закономерность еще не применялась, что обуславливает актуальность изучения данного вопроса.

Сложность расчета податливых узлов, состоящих нескольких пластин, обусловлена неопределенностью значений их изгибной жесткости вследствие

неопределенности жесткости поперечных связей и связей сдвига. Это обстоятельство выражено в первую очередь податливостью связей, соединяющих эти пластины. Для определения действительной податливости связей и совместности работы слоев для составных пластин необходимым становится проведения ряда экспериментов. На сегодняшний день это практически единственно доступный вариант решения поставленной задачи.

Таким образом, разработка динамических методов исследования опорных узлов элементов строительных конструкций с учетом податливости может найти широкое применение при проектировании, а также при усилении и обследовании зданий и сооружений.

Список литературы

1. Жаданов В.И. Исследование поглощающих свойств материала строительных конструкций на примере железобетонной перемычки / Жаданов В.И., Нестеренко А.М., Нестеренко М.Ю., Столповский Г.А. // Известия высших учебных заведений. Строительство, Новосибирск, №9 (693), 2016 г., с.76-86.

2. Нестеренко М.Ю. Обследование зданий и сооружений методом сейсмического зондирования / М.Ю. Нестеренко, А.М. Нестеренко // Электронный журнал «Бюллетень Оренбургского научного центра», № 2/2014. С-5.

3. ГОСТ Р 54859-2011. Определение параметров основного тона собственных колебаний. – Введ. 2012-07-01 – М.: Стандартинформ, 2012.

4. Турков, А.В. Способы учета податливости жесткого защемления при проведении эксперимента [Текст] / А.В. Турков, К.В. Марфин // Строительство и реконструкция. – 2015. – №1. – С. 62-64 (0,20 / 0,15 п.л. автора).

5. Дарков А.В. Строительная механика: Учеб. для строит. спец. вузов. — 8-е изд., перераб. и доп. / А.В. Дарков, Н.Н. Шапошников // М.: Высш. шк., 1986. — 607 с.: ил.

6. Марфин К.В. Взаимосвязь максимальных прогибов и частот собственных колебаний двухслойных изотропных пластин в зависимости от количества связей сдвига / К.В. Марфин // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов IV Международного симпозиума. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2012.