

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ УДАРЕ ПО СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЕ

Шимановский А. О.

Белорусский государственный университет
транспорта, Гомель, Беларусь

На крупных предприятиях с целью очистки отработанных газов применяют электрофильтры, которые можно рассматривать как системы стержней с пересекающимися осями. По мере осаждения загрязнений на электродах их необходимо периодически отряхивать от налипшей пыли. Для этой цели чаще всего используют специальные механизмы, ударом возбуждающие волну деформаций [1]. Современные программные средства позволяют численно решать задачи о распространении волн в стержневых системах, однако процедура таких расчетов весьма длительна. Поэтому актуальна разработка аналитических методов расчетов, позволяющих, возможно с некоторой погрешностью, но быстро оценить параметры колебаний конструкции [2, 3].

Для анализа продольных движений стержней использовано классическое волновое уравнение, а поперечные движения описывались моделью Тимошенко, записанного в виде системы двух дифференциальных уравнений относительно углов:

$$\begin{aligned} \rho_i F_i \ddot{u}_i - E_i F_i u_i'' &= 0; \\ \rho_i F_i \ddot{\gamma}_i - \frac{G_i F_i}{k_i} \gamma_i'' &= -\rho_i F_i \ddot{\psi}_i; \\ \rho_i I_i \ddot{\psi}_i - E_i I_i \psi_i'' &= \frac{G_i F_i}{k_i} \gamma_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где u_i , γ_i , ψ_i – продольные перемещения, углы сдвига и поворота поперечных сечений; ρ_i , E_i , G_i – плотность и модули упругости материала; F_i , I_i , k_i – площадь, момент инерции, коэффициент формы поперечного сечения i -го стержня. Точками обозначено дифференцирование по времени t , а штрихами – по продольной координате Z . Функция прогибов при этом получается в результате интегрирования по координате суммы углов γ_i и ψ_i .

Решение системы уравнений (1) с применением преобразования Лапласа по времени по методике, описанной в работах [4, 5], показало, что при малой длительности удара уравнения Тимошенко в пространстве изображений могут быть представлены эквивалентным образом относительно углов сдвига и поворота поперечных сечений. В таком случае динамическая модель балки может рассматриваться как совокупность двух волноводов со взаимной нагрузкой, отражающей их взаимодействие.

Проведенное решение уравнений Тимошенко с использованием итерационного подхода показало, что удержание только одного члена ряда в выражениях изображений углов γ_i и ψ_i позволяет получить значения максимальных ускорений с

погрешностью, не превышающей 3% от точного решения. Погрешность расчета скоростей деформаций составляет 5–7%, а поперечных смещений – до 20%. Тем самым показано, что простейшая сдвиговая модель позволяет с достаточной для технических расчетов точностью осуществлять расчет ускорений при анализе распространения волн изгиба в стержнях. Проведенное конечноэлементное моделирование распространения волн в стержнях постоянного поперечного сечения, выполненное на основе трехмерных моделей, также подтвердило правильность полученных результатов.

Выявлена структура изображений внутренних сил, а также перемещений, скоростей и ускорений точек осей стержней при прохождении волн через узел стержневой системы. Это позволило предложить алгоритм определения значений коэффициентов отражения и преломления для случаев соединения стержней в узле при произвольных значениях углов между ними.

Выполнен расчет прохождения волн через типовой плоский узел, представляющий собой соединение четырех стержней разных поперечных сечений, оси которых взаимно перпендикулярны.

Показано, что последовательное применение выведенных формул коэффициентов преломления и отражения к нескольким узлам дает возможность полного расчета стержневой системы. В этом случае выражения изображений кинематических характеристик и внутренних силовых факторов не зависят от параметров системы в целом, а являются произведением коэффициентов, соответствующих пройденным узлам. Таким образом расчет может быть выполнен локально, без учета характеристик всех элементов конструкции. Это позволяет значительно сократить время расчетов по сравнению с существующими численными методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Санаев Ю. И. Обеспыливание газов электрофильтрами. – Семибратово: Кондор-Эко, 2009. – 163 с.
2. Гузаев В. А. Влияние долговечности механического оборудования на эффективность электрофильтров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 7. – С. 29–31.
3. Antes H., Schanz M., Alvermann S. Dynamic analyses of plane frames by integral equations for bars and Timoshenko beams // Journal of Sound and Vibration. – 2004. – v. 276, N 3–5. – P. 807–836.
4. Мещеряков В. Б., Шимановский А. О., Исаев В. И. Приближенные модели для определения реакции балки на действие кратковременной сосредоточенной силы // Исследования по механике строительных конструкций и материалов. – Л.: ЛИСИ, 1990. – С. 71–76.
5. Shimanovsky A. O. Elastic wave propagation in plane rod system // Proceedings of ICoEV 2015 (International Conference on Engineering Vibration, Ljubljana, 7–10 September). – Ljubljana : Faculty for Mechanical Engineering, 2015. – P. 1682–1691.