УДК 539.3

DOI 10.37153/2687-0045-2021-14-96-97

Применение САПР, расчетное моделирование при проектировании зданий (сооружений)

**ОБОБЩЕННЫЙ ЛИНЕЙНО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ДЛЯ РАСЧЕТА
ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ И ВЕТРОВЫЕ
ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**GENERALIZED METHOD OF RESPONSE SPECTRA FOR CALCULATION OF
LINEAR AND NONLINEAR SYSTEMS FOR SEISMIC AND WIND IMPACTS**

Лебедев В.Л., к.т.н., Семенов В.А., д.т.н., проф.

(ООО Техсофт, Москва, Россия)

Lebedev V.L., Semenov V.A.

(Techsoft Ltd., Moscow, Russia)

Аннотация. В настоящей работе предложено обобщение линейно-спектрального метода расчета конструкций на сейсмические и ветровые воздействия. Это обобщение существенно расширяет область применения линейно-спектральной методики и позволяет использовать этот метод для расчета нелинейных систем. Под нелинейными системами здесь понимаем конструкции для определения положения равновесия которых необходимо использовать нелинейный статический расчет. Представленные методики и алгоритмы реализованы в программном комплексе MicroFE-СтаДиКон.

Ключевые слова: сейсмостойкость, демпфирование, нелинейность, линейно-спектральный анализ

Abstract. In this paper, we propose a generalization of the method of response spectra of structural analysis to seismic and wind effects. This generalization significantly expands the scope of the linear-spectral technique and makes it possible to use this method to calculate nonlinear systems. By non-linear systems here we mean constructions to determine the equilibrium position of which it is necessary to use a nonlinear static calculation. The presented methods and algorithms are implemented in the MicroFE-StaDiCon software package.

Keywords: seismic resistance, damping, nonlinearity, response spectra method

Предполагаем, что исходная конструкция находится под действием статических нагрузок в положении равновесия. Считаем, что к опорным узлам конструкции приложено кинематическое (сейсмическое) воздействие или к свободным узлам конструкции приложено динамическое (ветровое) воздействие. Для определения оценок максимальных перемещений и усилий в элементах конструкции будем использовать линейно-спектральный метод (ЛСМ). Напомним, что слово «линейно» в данном методе означает только лишь то, что рассматриваются малые колебания относительно статического положения равновесия конструкции при кинематическом воздействии (сейсмическое воздействие является частным случаем кинематического воздействия) или любом другом динамическом воздействии (ветровое воздействие является частным случаем динамического воздействия). Слово «спектральный» означает лишь то, что вместо перемещений рассматривают оценки их максимальных значений в некотором интервале изменения времени, а также оценки максимальных значений усилий в сечениях элементов конструкции. Для получения оценок максимальных значений перемещений и усилий используются основные динамические характеристики конструкции – ее спектр (т.е. частоты и формы ее свободных колебаний). Так как, при ручных (или полу-автоматизированных) расчетах несколько десятилетий назад для выполнения статических и динамических расчетов применялись различные по степени детализации (дискретизации) расчетные схемы, невозможно было использовать усилия из ЛСМ для суммирования с усилиями от статических

расчетов. Поэтому в процедуре ЛСМ было предусмотрено вычисление и оценки максимальных нагрузок, которые можно было перенести в расчетную схему для вычисления оценок усилий от сейсмического или ветрового воздействия и легко просуммировать их со статическими усилиями для получения суммарных усилий. Таким образом, в теории колебаний (в том числе и в динамике сооружений) линейно-спектральный метод никак не связан со статическим расчетом, причем линейным. Линейно-спектральный метод позволяет определить усилия в конструкции, возникающие от сейсмического воздействия вообще без выполнения статического расчета. К сожалению, достаточно часто, название метода ошибочно связывают с линейным статическим расчетом конструкции. При этом такие ошибки пытаются навязать для использования при проектировании конструкций проектировщикам всей страны. Примером этого является ситуация с Изменением №1 СП14.13330.2018 «СНиП II-7-81* СТРОИТЕЛЬСТВО В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ» (<https://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/fab/Izm1-k-SP-14.pdf>). Так в п.3.21 дается ошибочное определение ЛСМ, которое не только не позволяет эффективно использовать ЛСМ для анализа сейсмостойкости линейных систем, но и явно запрещает применять этот высоко эффективный метод для проектирования всех нелинейно работающих конструкций. Таким образом, фактически отменяются многие результаты современной теории колебаний. Заметим, что наличие в нормах такого определения не позволило бы запроектировать многие объекты в сейсмоопасных районах, успешно эксплуатируемые уже много десятилетий, не говоря уже о современных конструкциях. В работе показано, как можно с более высокой эффективностью, чем сегодня принято, применять ЛСМ при проектировании как линейных, так и нелинейных систем. Под нелинейными системами здесь понимаем конструкции для определения положения равновесия которых необходимо использовать нелинейный статический расчет.

При расчете на сейсмические и ветровые воздействия в рамках линейно-спектрального метода обычно определяют квазистатические нагрузки для каждой из учитываемых форм свободных колебаний системы относительно положения равновесия и расчетной ориентации воздействия. Таким образом, если учитываем N форм свободных колебаний системы, то для одной ориентации воздействия получаем N дополнительных статических нагружений. Нами для линейно-спектрального расчета предлагается использовать подход, основанный не на определении квазистатических нагрузок, а непосредственно на определении перемещений и усилий в элементах конструкции, соответствующих формам свободных колебаний конструкции. Эти перемещения и усилия полностью соответствуют квазистатическим нагрузкам для линейных систем. Отсутствие квазистатических нагрузок и возможность использования непосредственно усилий в элементах конструкций позволяет применять этот подход для широкого круга нелинейных систем.

Литература

1. Солдатов А.Ю., Лебедев В.Л., Семенов В.А. Анализ устойчивости строительных конструкций с учетом физической нелинейности методом конечных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. №6. С. 60-65.
2. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с
3. Семенов В. А., Лебедев В. Л. Солдатов А.Ю. Об учете демпфирования при расчетах пространственных сооружений на сейсмические воздействия// Справочник. Инженерный журнал. М.: Спектр. 2013. № 5. стр.12-20.
4. Свод правил СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия». Издание официальное. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. 2016.