

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ, ПРОГРАММНОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СПОРТИВНЫХ СООРУЖЕНИЙ

д.т.н. Болдырев Г.Г.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

д.т.н. Муйземнек А.Ю.

Пензенский государственный университет, CAE-Services

аспирант Живаев А.А.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Современные системы мониторинга спортивных сооружений представляют собой автоматизированные системы, основными функциями которых являются контроль и прогнозирование технического состояния сооружения, поиск решений при возникновении проблем с техническим состоянием сооружения, минимизация ущерба при возникновении чрезвычайной ситуации.

Проектирование многих современных спортивных сооружений осуществляется одновременно с проектированием устанавливаемых в них систем мониторинга. Проектирование системы мониторинга может осуществлять подрядчик или субподрядчик. Для минимизации затрат на установку системы мониторинга её монтаж осуществляется одновременно со строительством сооружения. В ряде случаев это единственно возможный способ её установки.

Разработка системы мониторинга имеет несколько этапов. На начальных стадиях разработки требуется найти вероятные неблагоприятные сценарии изменения технического состояния сооружения под действием внешних факторов, осуществить моделирование процессов изменения технического состояния по каждому из сценариев, выявить наиболее уязвимые элементы конструкций, выбрать рациональные места размещения элементов системы мониторинга. При этом использование тех же математических моделей, методов и алгоритмов, соответствующего программного обеспечения, что и при проектировании сооружения, существенно сокращает затраты времени и средств на решение данных задач, но ввиду их отличия от задач, возникающих при проектировании сооружения, не всегда обеспечивает их решение.

При моделировании процесса изменения технического состояния оправданным является использование математических моделей, образующих некоторую иерархию, а также субмоделей, позволяющих более детально изучить наиболее опасные элементы конструкции. Для каждого типа специальных сооружений иерархия моделей уникальна. Для достаточно большой группы спортивных сооружений, строительство которых интенсивно ведётся в настоящее время, может быть использована следующая иерархия моделей:

– модель каркаса сооружения, построенная в балочном приближении;

- модель каркаса сооружения, построенная в балочном и оболочечном приближении;

- модели каркаса сооружения и оборудования, построенные в балочном и оболочечном приближении;

- модели основания, фундамента, каркаса сооружения и оборудования, построенные в балочном, оболочечном и твёрдотельном приближении.

Последовательная разработка перечисленных моделей позволяет решить типовые задачи инженерного анализа:

- расчёт напряженно-деформированного состояния несущих конструкций под действием собственного веса, ветровой и снеговой нагрузки, веса технологического оборудования и зрителей;

- расчёт напряжённо-деформированного состояния несущих конструкций с учётом неравномерного смещения колонн, вызванного осадкой основания, а также перепада температур;

- расчёт собственных частот и форм колебания несущих конструкций;

- расчёт напряженно-деформированного состояния несущих конструкций под действием гармонического возмущения, передаваемого на элементы конструкции от технологического оборудования;

- расчёт среднего ресурса наиболее нагруженных металлических элементов несущей конструкции по критерию усталости;

- расчёт коэффициента запаса устойчивости несущих конструкций;

- расчёт напряженно-деформированного состояния несущих конструкций под действием сейсмического возмущения;

- расчёт напряженно-деформированного состояния несущих конструкций при динамическом нагружении, например, при падении с кровли снега или внезапном импульсном воздействии на несущие элементы конструкции.

Многие факторы, определяющие техническое состояние сооружения, имеют вероятностный характер. Прежде всего, это: величины механических и температурных нагрузок, приложенных к элементам конструкции; физико-механические свойства элементов конструкции, основания и фундамента; сейсмическая активность региона; расположение этого региона и грунтово-геологические условия на площадке. Поэтому при постановке и решении перечисленных задач детерминированный подход должен использоваться совместно с вероятностным подходом.

Большинству требованиям, предъявляемым к программному обеспечению, используемому при разработке системы мониторинга, удовлетворяет программа ANSYS. Особое внимание заслуживает реализованный в программе спектральный метод [1], использование которого при сейсмическом расчёте сооружений регламентировано действующими нормативными документами.

В качестве примера рассмотрим одну из простейших математических моделей каркаса сооружения, включающую покрытие, колонны и трибуны, построенную в балочном и оболочечном приближении.

Основой для создания соответствующей компьютерной модели явились чертежи спортивного сооружения и его элементов, схема нагружения и величины нагрузок, характеристики механических свойств материалов рассматриваемых элементов конструкции. Геометрическая и конечно-элементная модели спортивного сооружения были полностью созданы в программе ANSYS.

Геометрическая модель включала 2983 точки, 4283 линии и 263 поверхности. Конечно-элементная модель конструкции, показанная на рис. 1, включала 48082 узла и 25065 элементов.

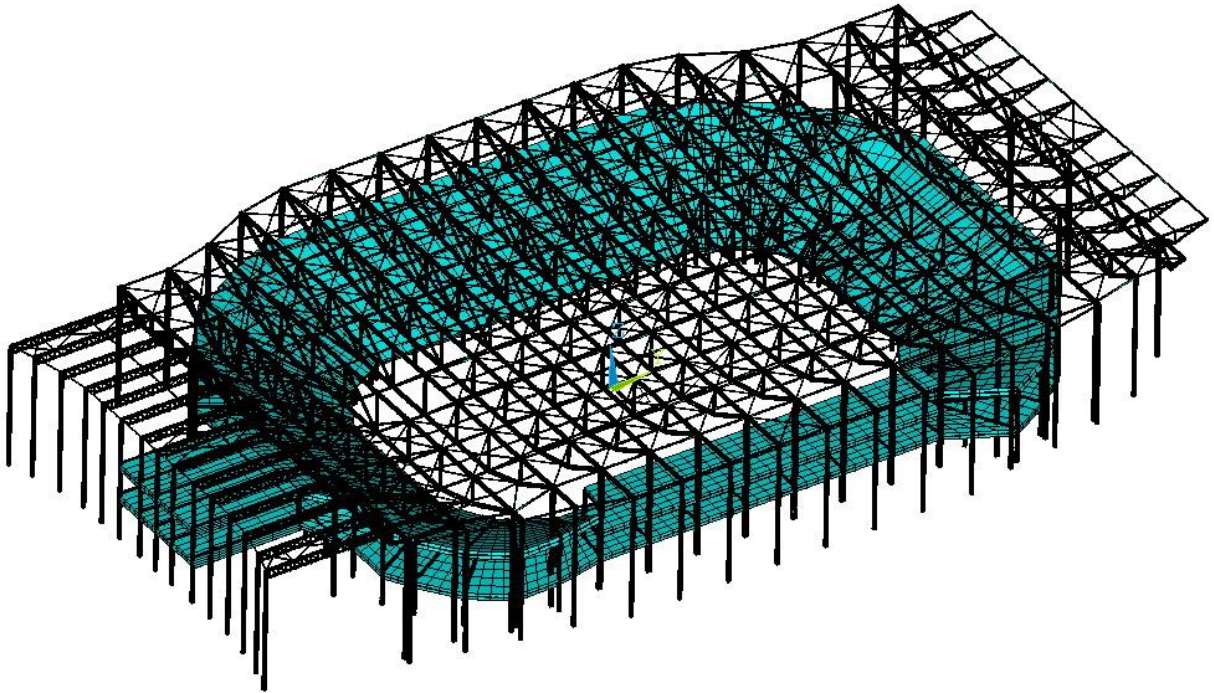


Рис. 1. Конечно-элементная модель несущих конструкций спортивного комплекса

При создании конечно-элементной модели использовались следующие типы элементов:

- для моделирования балочных элементов конструкции использовались балочные элементы BEAM188;
- для моделирования покрытия и плит трибун использовались оболочечные элементы SHELL43;
- для моделирования связей в элементах конструкции использовались элементы связи MPC184;
- для приложения распределённых нагрузок на элементы конструкции использовались поверхностные элементы SURF154 и SURF156.

Конечный элемент BEAM188 является трёхмерным трёхузловым балочным элементом (третий узел используется для определения ориентации элемента в пространстве), предназначенным для моделирования балок большой и умеренной податливости. Этот элемент основывается на балочной теории С.П. Тимошенко.

Конечный элемент SHELL43 является трехмерным четырёхузловым оболочечным элементом, предназначенным для моделирования искривлённых оболочек умеренной податливости.

Конечный элемент MPC184 является трехмерным многоузловым элементом, предназначенным для моделирования кинематических связей в элементах конструкции. Элемент является универсальным, так как в зависимости от выбора опций позволяет моделировать кинематические связи различного типа.

Конечные элементы SURF154 и SURF156 являются трехмерными поверхностными элементами, предназначенными для моделирования, в том числе, и поверхностных нагрузок на балочные и оболочечные элементы.

При построении компьютерной модели использовалась модель упругого изотропного материала.

Разработанная компьютерная модель была использована для выполнения всех типовых задач инженерного анализа, в том числе и сейсмического.

Расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции под действием сейсмической нагрузки производился при следующих условиях:

- сейсмическое воздействие на сооружение задано спектром ускорений грунта, соответствующим землетрясению в 5 баллов по MSK-64 и демпфированию 5 %;

- расчёты напряжённо-деформированного состояния выполнены для трёх расчётных случаев, соответствующих распространению сейсмического воздействия в поперечном, продольном и вертикальном направлениях;

- для первого и второго расчётных случаев спектры сейсмического возмущения были идентичны, различие заключалось лишь в направлении распространения сейсмического воздействия;

- для третьего расчётного случая спектр сейсмического возмущения был получен с использованием постоянного соотношения между амплитудами вертикальной  $\vec{X}_V$  и горизонтальной  $\vec{X}_H$  компонентами ускорения;

- для всех расчётных случаев уровень ротации сейсмического воздействия был принят равным нулю.

Особенности численной реализации процедуры расчёта напряжённо-деформированного состояния состоят в следующем:

- расчёт собственных частот и форм колебания конструкции спортивного сооружения осуществлялся методом Ланцоша в диапазоне частот от 0 до 30 Гц;

- считались значимыми и вычислялись те собственные формы колебаний, которые превышали порог, равный 0,005;

- отклик определялся как корень квадратный из суммы квадратов собственных форм конструкции, при суммировании учитывались лишь те собственные формы колебаний, значимость которых превышала порог, равный 0,01.

Результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния несущих конструкций спортивного сооружения при сейсмическом нагружении представлялись в виде:

- распределений амплитуд перемещений в элементах несущих конструкций спортивного сооружения при различных направлениях распространения сейсмического воздействия;
- распределений амплитуд суммарных напряжений в балочных элементах несущих конструкций спортивного сооружения при различных направлениях распространения сейсмического воздействия;
- эпюр амплитуд продольных сил в балочных элементах несущих конструкций спортивного сооружения;
- эпюр амплитуд изгибающих моментов в балочных элементах несущих конструкций спортивного сооружения.

Показанное на рис. 2 распределение амплитуд перемещений позволило выявить качественные и количественные особенности процесса колебаний для случая поперечного направления распространения сейсмического воздействия:

- сейсмическое воздействие в поперечном направлении вызывает колебание несущих конструкций спортивного сооружения, в котором доминируют два движения – поступательное движение покрытия в поперечном направлении и вращение покрытия в горизонтальной плоскости с центром вращения, расположенным на пересечении отметок 6-6 и *E-E*;
- максимальная амплитуда перемещений равна 9,5 мм, она имеет место в центральных крестообразных вертикально расположенных металлических связях конструкции покрытия;
- максимальная амплитуда упругих напряжений равна 24 МПа, она имеет место в центральных крестообразных вертикально расположенных металлических связях конструкции покрытия.

Распределение амплитуд перемещений при продольном направлении сейсмического воздействия свидетельствует, что воздействие в продольном направлении вызывает колебание несущих конструкций спортивного сооружения, в котором доминируют два движения – поступательное движение покрытия в продольном направлении и вращение в горизонтальной плоскости с центром вращения, расположенным на пересечении отметок 6-6 и *E-E*. Максимальная амплитуда перемещений равна 2,7 мм, она имеет место в колоннах, расположенных на пересечении отметок 2-2 и *E-E*. Максимальная амплитуда упругих напряжений равна 6,1 МПа, они имеют место в колоннах, расположенных на пересечении отметок 2-2 и *E-E*.

Распределение амплитуд перемещений при вертикальном направлении сейсмического воздействия показывает, что сейсмическое воздействие в вертикальном направлении вызывает колебание несущих конструкций спортивного сооружения, в котором доминируют изгибные колебания покрытия. Максимальная амплитуда перемещений равна 2,2 мм, она имеет место в центральных крестообразных вертикально расположенных металлических связях конструкции покрытия. Максимальная амплитуда упругих напряжений равна 9,43 МПа, она имеет место в центральных крестообразных вертикально расположенных металлических связях конструкции покрытия.



Для сопоставления были выполнены расчёты спектрального отклика при задании спектров ускорений согласно работе [2], где представлены результаты анализа концепции и методологии развития европейских стандартов Eurocode 7, Eurocode 8 и ISO 23469, которые после 2010 г. должны дополнить и частично заменить системы национальных стандартов, регламентирующие расчёты зданий и сооружений при сейсмическом воздействии. В данной работе, в частности, представлены рекомендуемые сейсмические спектры двух типов: для сейсмических волн с магнитудой  $M_s > 5,5$  и для сейсмических волн с магнитудой  $M_s \leq 5,5$ .

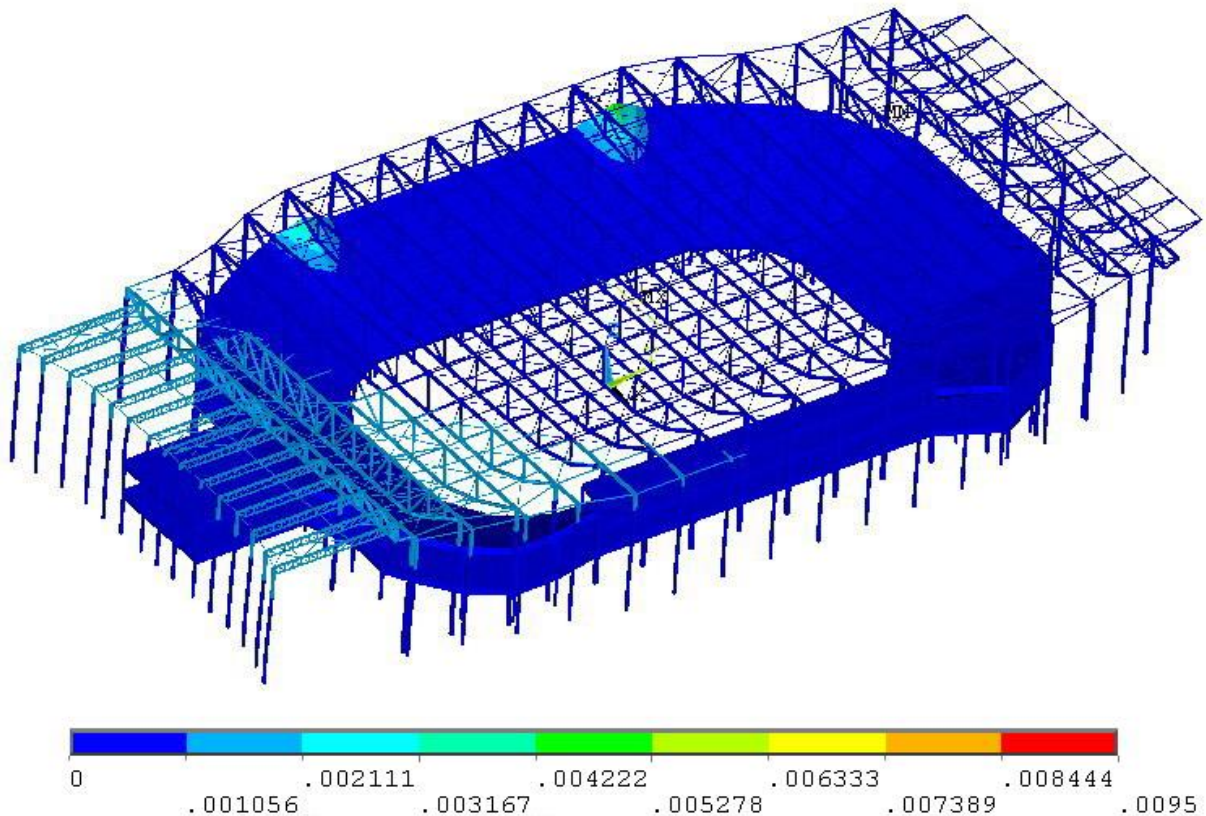


Рис. 2. Распределение амплитуд перемещений при поперечном направлении сейсмического воздействия, м

Боле 25 решений типовых задач инженерного анализа, полученных для различных вероятных неблагоприятных сценариев изменения технического состояния, были включены в качестве составной части в информационное обеспечение системы мониторинга спортивного сооружения, а также использованы для повышения обоснованности технических решений, сокращения времени и стоимости разработки системы мониторинга.

#### Литература

1. Ньюмарк Н. Розенблюет Э. Основы сейсмостойкого строительства: Пер. с англ. – М.: Стойидат, 1980. – 344 с.

2. Wang J., Thusyanthan I. A Detailed Evaluation of Eurocode and ISO Methodology on Earthquake-Resistant Geotechnical Designs // The 14-th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.

Материал хранится в Пензенском государственном университете по адресу: 440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40, тел./факс: (841-2) 56-51-22 и у автора по адресу: 440071, Россия, г. Пенза, ул. Ладожская, д. 119, кв. 146, тел.: (841-2) 41-59-18.

## MATHEMATICAL, SOFTWARE AND INFORMATION SUPPORT OF SHM SYSTEM DEVELOPMENT

### АННОТАЦИЯ

Работа посвящена математическому, программному и информационному обеспечению разработки системы мониторинга спортивных сооружений, строительство которых интенсивно ведётся последнее время. Приводятся краткое описание иерархии математических моделей, используемых для решения типовых задач инженерного анализа, форм представления результатов расчёта, а также пример расчёта напряжённо-деформированного состояния спортивного сооружения при сейсмическом воздействии.