



## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

**Актуальность проблемы.** Компоновка мехатронного оборудования (далее, оборудование), как правило, состоит из одного стационарного (постоянно неподвижного) и нескольких подвижных элементов, разделённых соединениями (стыками). Создание (синтез) компоновки осуществляется на ранней стадии проектирования оборудования после определения его характеристик, предварительного определения кинематической структуры [1]. Компоновка оборудования влияет на его основные показатели качества: статические и динамические упругие деформации, термические деформации, на распределение давлений и износ в подвижных соединениях.

**Цель научного исследования.** Разработка методики автоматизированного проектирования компоновок мехатронного оборудования на стадии технического предложения.

**Теоретическая часть.** Рассмотрим этапы реализации предлагаемой методики с помощью применения программного обеспечения (ПО) САПР и метода конечных элементов (МКЭ) [2].

1 этап. Проектирование 3D-геометрической модели компоновки оборудования с высокой степенью детализации [3]. Этот этап также включает подготовку геометрической модели компоновки оборудования с учетом всех параметров, которые могут оказать существенное влияние на результаты статического, модального и динамического анализов на основе МКЭ.

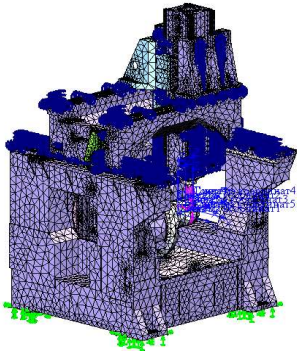
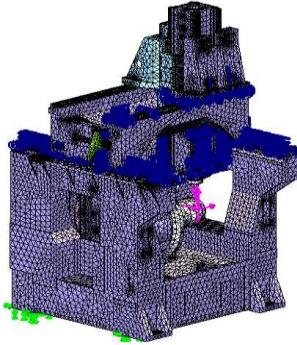
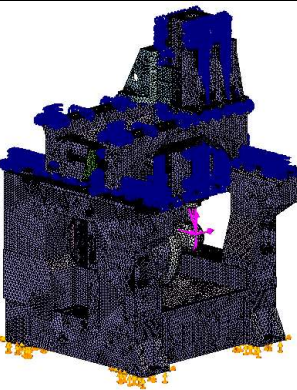
2 этап. Создание максимально возможного числа областей с регулярной сеткой конечных элементов (КЭ). Для компоновок оборудования рекомендуем уплотнять сетку КЭ с помощью настройки параметров управления сеткой в следующих зонах: значительного градиента напряжений, деформаций, тепловых потоков (отверстие, выточка, трещина и т.п.); существенных изменений граничных условий, например, в области приложения изменяющейся нагрузки, а также возле границ области приложения нагрузок; границ участков контакта деталей в сборках; границ контакта деталей с отличающейся жесткостью. Эти рекомендации относятся к исходной конечно-элементной модели компоновки оборудования. После первого статического анализа конечно-элементной модели оборудования появляется актуальная информация, на базе которой можно изменять параметры дискретизации модели.

3 этап. Моделирование статических и кинематических граничных условий для конечно-элементной модели компоновки оборудования. На этом этапе учитывается действие активных силовых факторов, и наложенных на систему связей (подвижные и неподвижные стыки).



4 этап. Оценка влияния настройки дискретизации конечно-элементной модели оборудования на результаты её статического анализа. В таблице 1 приведен пример анализа влияния настройки сетки конечно-элементной модели компоновки оборудования [4] на погрешность  $\Delta$  вычисления критерия прочности максимальных эквивалентных напряжений Мизеса (*Von Mises*).

Таблица 1

Вариант дискретизации модели	Размер сетки, мм		Критерий <i>Von Mises</i> , МПа
	Глобальный	Локальный	
	90	70	1,71E+06
	70	50	1,95E+06
	50	30	2,11E+06
	50	10	2,56 E+06



На основе данных из таблицы 1 построен график сходимости результатов статических анализов (рисунок 1), позволяющий сделать рекомендации для дискретизации модели: использовать опцию управление сеткой и выявленные соотношения глобального и локального размеров сетки.

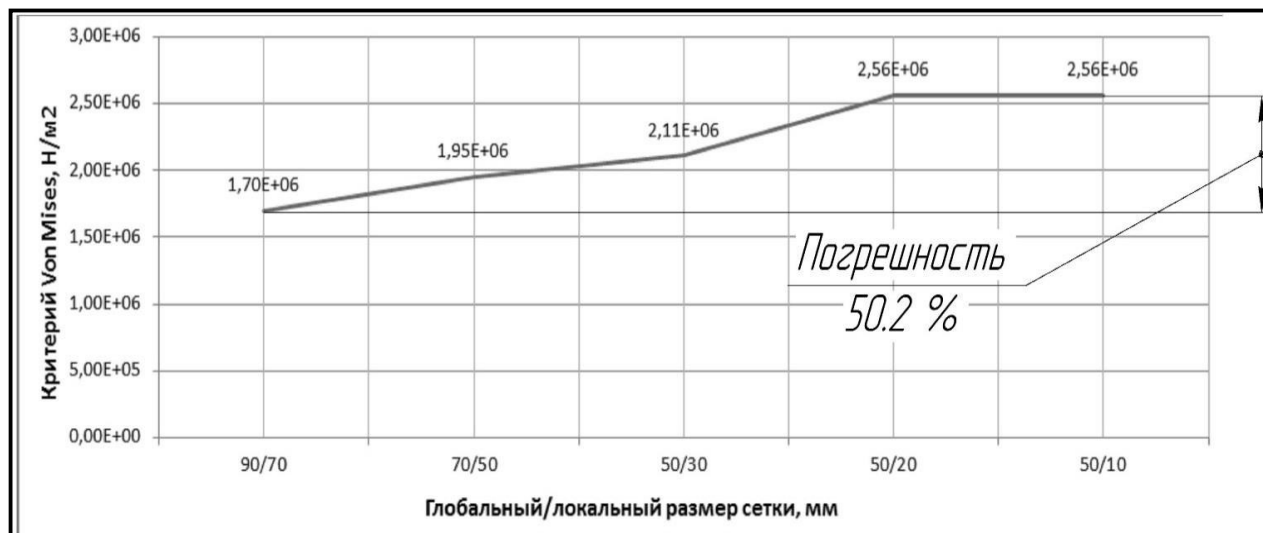


Рисунок 1 – График сходимости результатов статических анализов конечно-элементной модели

Результаты дискретизации конечно-элементной модели компоновки оборудования используются для проведения статического, модального и динамического анализов.

5 этап. Статический анализ конечно-элементной модели компоновки оборудования.

6 этап. Обработка и анализ полученных результатов.

На этом этапе необходимо реализовать сравнение расчетных и допустимых значений критериев статического анализа конечно-элементной модели оборудования, а также построить сводный график баланса результирующих статических перемещений элементов компоновки оборудования.

7 этап. Модальный анализ конечно-элементной модели компоновки оборудования.

На этом этапе реализуются:

– расчеты собственных частот и соответствующих форм колебаний конструкции компоновки оборудования;

– обнаружение и анализ резонансных мод (формы вибрационной реакции) компоновки оборудования. Поскольку нет нагружения конечно-элементной модели компоновки оборудования, то моды не показывают реальной амплитуды колебаний, а лишь отображают их форму;

– расчет количества массового участия, которое связано с собственными частотами (эффективная масса). Массовое участие необходимо для выявления наиболее опасных режимов работы и сколько частот необходимо охватить для оценки всего динамического поведения компоновки оборудования.



Модальный анализ является важной составной частью динамического анализа, поскольку знание собственных форм и частот колебаний компоновки оборудования помогает оценить ее динамическое поведение, например, в переходных процессах.

8 этап. Динамический линейный анализ конечно-элементной компоновки оборудования.

На этом этапе реализуется гармонический расчет с исключением геометрических и физических нелинейностей. Для рассматриваемой стадии проектирования оборудования эти исключения допустимы. Для проведения гармонического расчета используются результаты дискретизации конечно-элементной модели оборудования и модального анализа с добавлением данных по демпфированию и внешнему нагружению. Для уменьшения времени гармонического расчета можно ограничить диапазон рассматриваемых собственных частот с учетом величин коэффициентов массового участия. На этом этапе необходимо сравнить расчетные и допустимые значения критериев динамического анализа конечно-элементной модели оборудования, а также построить сводный график баланса результирующих динамических перемещений элементов компоновки оборудования.

9 этап. Определение направлений параметрической оптимизации компоновочных факторов оборудования с целью улучшения результатов компьютерного моделирования. Параметрическая оптимизация — это метод, который позволяет анализировать компоновку оборудования, варьируя входными граничными параметрами (например, геометрическими, силовыми, контактными), а также результатами статического, модального и динамического анализов. Этот метод позволяет установить влияние входных параметров на выходные. Этим метод параметрической оптимизации отличается от топологической.

**Заключение.** Предложена компьютерного моделирования компоновок мехатронного оборудования с помощью ПО САПР на ранней стадии проектирования (техническое предложение) и МКЭ.

### Литература

1. Кульга К.С., Виноградов П. В., Гаитова А.А. Применение САД/САЕ-систем при проектировании компоновок многоцелевых станков с ЧПУ / СТИН. – №9. – 2015. – С.5-10.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов. Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. Ушаков Д. М. Введение в математические основы САПР – Новосибирск: Ледас, 2006. –180 с.
4. ООО «Стан» [Электронный ресурс] // СТАН – лидер российского станкостроения. – 2021. – Режим доступа: <https://www.stan-company.ru> .– Проверено 19.03.2021.