

УДК 004.942:001.57

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КИНЕМАТИЧЕСКОГО, ДИНАМИЧЕСКОГО  
И ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

А.М. Терлецкая, Н.Р. Райц, И.Г. Лимарева, Е.К. Фомичева, Е.Л. Мухоморов

Рассмотрена возможность применения современных САЕ-систем (ADAMS, ANSYS) для проведения кинематического, динамического и прочностного анализа. Разработана и представлена методика комплексного автоматизированного анализа, позволяющая провести исследование сложных механизмов с большой точностью и в короткие сроки. На основе разработанной методики проведены исследования пространственных механизмов: возникновение контактных напряжений, механика разрушения сварных конструкций.

**Ключевые слова:** автоматизированный анализ, моделирование, механические системы, контактные напряжения.

**Введение**

Для получения надежных и экономичных несущих конструкций машин и механизмов необходима разработка прогрессивных методов расчета с учетом использования новейших вычислительных и программных средств.

Наличие на сегодняшний день на рынке программных продуктов коммерческих версий систем автоматизированного проектирования (AutoCAD, CATIA, PRO/ENGINEER и др.) и анализа (ADAMS, Cosmos/M, ANSYS, NASTRAN и др.) требует их обоснованного выбора для решения конкретной проблемы, а также создания гибкого интерфейса между двумя указанными классами программного обеспечения.

Предлагается новый системный подход на основе поэтапного использования CAD/CAE/CAM-систем, в рамках которого предложены процедуры проектирования с использованием геометрического моделирования, прочностного анализа на основе концепции «соответствие назначению», эскизного проектирования и выработки рекомендаций для построения технологических процессов.

Развитие средств вычислительной техники стимулировало распространение инженерного анализа практически на все этапы проектирования машиностроительных технологий и изделий. Многообразие физических процессов в наукоемких изделиях, субъективность в постановке задач анализа, выбор методов решения и многие другие причины привели к огромному числу методик, алгоритмов и программ, предназначенных для решения задач анализа изделий машиностроения.

К первой группе программ – программным средствам проектирования, органично объединяющим процессы конструирования и анализа в едином комплексе, – относятся системы CATIA5 (DS, Франция), UNIGRAPHICS (US, США), PRO/ENGINEER (PTC, США), EUCLID3 (EADS MD, Франция). Во вторую группу программ входят универсальные программы анализа изделий машиностроения ANSYS (США), SAMTECH (Бельгия), MSC.VISUAL NASTRAN ENTERPRISE (США), MSC.ADAMS и др.

**Этапы комплексной методики решения кинематических, динамических и прочностных задач**

Новый системный подход можно определить как интегрированную технологию проектирования, так как процесс совершенствования проектного решения связан с анализом и оптимизацией модели изделия. В рамках данного подхода была рассмотрена возможность применения системы ADAMS для проведения кинематического, динамического анализа и прочностного анализа с использованием системы ANSYS. В программном комплексе ADAMS динамический анализ моделей механизмов представлен большим набором средств и способов. ADAMS предоставляет возможность быстрой и удобной расстановки различных сил, крутящих моментов, моментов инерции тел и их масс. ANSYS представляет собой программу, основанную на методе конечных элементов, с помощью которой создается компьютерная модель или обрабатывается CAD-модель конструкции, изделия или его составной части; моделируются действующие усилия или другие проектные воздействия; исследуются отклики системы различной физической природы в виде распределений напряжений и температур, электромагнитных полей.

При проведении динамического анализа в системе ADAMS узловые соединения (шарниры) устанавливаются лишь схематично, не имеют массы и, вследствие этого, не экспортируются в конечно-элементные системы для проведения дальнейшего анализа. Шарнирные соединения следует проектировать самостоятельно уже непосредственно в конечно-элементной системе.

Для изучения взаимодействия систем макроанализа ADAMS и микроанализа ANSYS рассматривались отдельные элементы конструкции.

Разработанная методика позволяет провести комплексный анализ сложных механизмов с большей точностью и в более короткие сроки по сравнению с аналитическим решением.

Ниже приведены этапы комплексной методики решения кинематических, динамических и прочностных задач механизмов на примере пространственных манипуляторов с использованием САЕ-систем.

1. Формируется расчетная схема. Необходимые данные: кинематическая схема объекта, геометрия (межосевые расстояния или расстояния между центрами шарниров), предварительные весовые характеристики элементов, краевые (начальные и граничные) условия, силовые условия (нагрузки).
2. Кинематический и динамический анализы объекта в системе ADAMS. Определение наиболее опасного расчетного случая, т.е. положения объекта с максимальными динамическими и статическими усилиями.
3. Трансляция модели в систему ANSYS. Минимальный набор информации, передаваемый в ANSYS, включает межосевые расстояния для элементов и нагрузки для расчетного случая.
4. Прорисовка геометрии на основе конструирования формы элементов объекта, выбор материалов для элементов, геометрии шарниров. Создание конечно-элементной модели для отдельных элементов.
5. Решение прочностной задачи для каждого элемента объекта с оптимизацией его геометрии в ANSYS. Уточнение геометрии и веса каждого элемента объекта.
6. Трансляция моделей в систему ADAMS. Минимальный набор информации включает межосевые расстояния, положение центров тяжести и весовые данные элементов объекта.
7. Повторный кинематический и динамический анализы объекта. Уточнение расчетного случая и усилий.

### **Применение комплексной методики для решения прикладных задач**

На основе предлагаемого подхода были проведены исследования, содержание и основные результаты которых представлены ниже.

**Рассмотрено состояние проблемы, тенденции развития и применения манипуляционных систем.** Разработка методов структурно-кинематического анализа и синтеза, кинетостатического и прочностного расчета параллельных манипуляторов с замкнутыми цепями (ПМ с ЗЦ) повлечет за собой создание качественно новых технологических машин. Проектирование машин подобного класса, ввиду их высокой сложности, требует применения совершенных и точных методов анализа и расчета [1, 2]. Однако вследствие того, что разработка машин на основе ПМ с ЗЦ ведется сравнительно недавно, для них не существует систем автоматизированного анализа, ориентированных на их проектирование.

Как правило, автоматизация проектирования технологических машин, мобильных роботов и манипуляторов обычно ограничивается только подготовкой чертежей с использованием САД-систем обычного назначения (например, AutoCAD [3, 4]), а все работы по предварительному проектированию ведутся практически вручную. Эффективность такого подхода является очень низкой. В связи с этим проблема разработки алгоритмов и методов автоматизированного анализа параметров прочности несущих конструкций машин и манипуляторов, в том числе ПМ с ЗЦ, для проектирования технологических машин является чрезвычайно актуальной [5, 6].

**Выполнен обзор систем автоматизированного анализа и рассмотрена возможность применения САЕ-систем для моделирования и анализа механизмов.** Для оценки прочности и долговечности элементов параллельного манипулятора необходимо рассмотреть следующие задачи моделирования:

- расчет динамических и силовых характеристик ПМ с ЗЦ. Эта задача относится к задачам макроуровня;
- расчет на прочность элементов шарнирных соединений, сварных соединений ПМ с ЗЦ. Решение данной задачи относится к микроуровню.

Комплексный метод расчета и проектирования элементов манипуляторов должен базироваться на решении вышеуказанных взаимосвязанных задач и будет реализовываться на базе пакетов MSC.ADAMS и ANSYS [7].

**Приведены методы динамического анализа механических систем, лежащие в основе системы ADAMS, теория метода конечных элементов, лежащего в основе системы ANSYS.** Основой ADAMS являются системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику исследуемого объекта. Применение устойчивых методов «жестких» систем дифференциальных уравнений обеспечивает получение необходимых результатов с минимальными затратами времени, компьютерных ресурсов и с большой надежностью.

**Разработана приближенная расчетная схема манипулятора в системе ADAMS** (рис. 1). Произведен кинематический и динамический анализ манипулятора при произвольных краевых и силовых условиях. Полученные значения сил в шарнире соответствуют предполагаемым, исходя из значения масс элементов и прикладываемых внешних усилий.

Несмотря на множество достоинств, ADAMS имеет недостаток: все элементы анализируемых моделей являются жесткими. Для решения этой проблемы система предоставляет возможность обмени-

ваться данными с конечно-элементными системами. В частности, система ANSYS позволяет создавать файл \*.mnf (modal neutral file), который в дальнейшем импортируется в ADAMS.

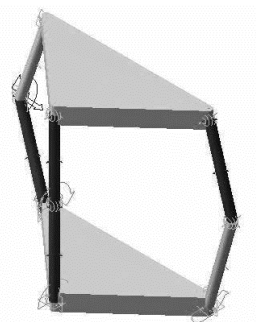


Рис. 1. Модель манипулятора, разработанная в системе ADAMS

**Изучен и использован интерфейс взаимодействия систем макро- и микро моделирования ADAMS –ANSYS. Предложены рекомендации по его применению.** Был произведен экспорт элементов модели манипулятора в формат Parasolid для передачи в систему ANSYS [5]. После импорта твердотельного элемента в конечно-элементную систему была создана деформируемая модель элемента конструкции (элемент разбит на конечные элементы Solid45, Beam4) (рис. 2).

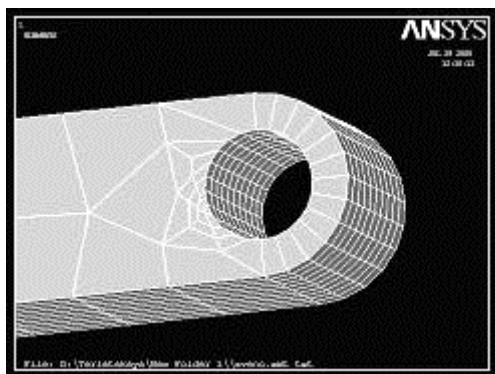


Рис. 2. Деформируемый элемент конструкции в системе ANSYS

Используя средства передачи данных обратно в систему ADAMS, была подготовлена модель (рис. 3) и создан соответствующий файл \*.mnf. С помощью встроенных средств деформируемые элементы были вновь импортированы в ADAMS для повторного проведения динамического, кинематического анализов и уточнения расчетного случая и усилий.

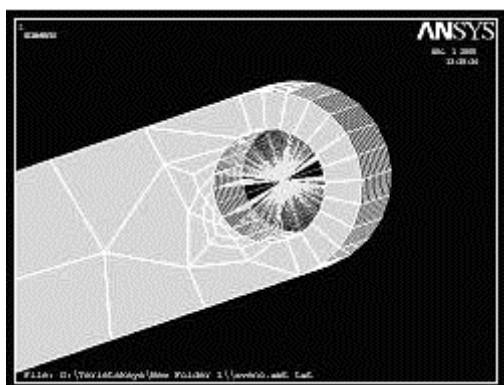


Рис. 3. Модель, подготовленная для экспорта

**Рассмотрена задача возникновения контактных напряжений в элементах пространственных шарнирных узлов ПМ с ЗЦ (рис. 4).** Шарнирные узлы, как правило, являются наиболее ответственными и наименее долговечными элементами конструкции. Основным критическим элементом шарнирного узла является проушина, имеющая очень низкий предел выносливости по сравнению с пределом вынос-

ливости самого материала. Природа этого явления заключается в высоком уровне концентрации напряжений около нагруженного отверстия, где в зоне максимальных окружных напряжений имеет место коррозия трения (фреттинг-коррозия), связанная с механическим истиранием поверхностей [4, 6].

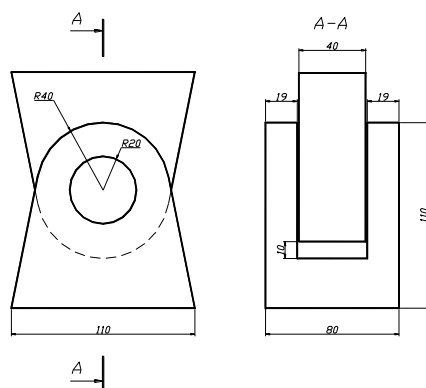


Рис. 4. Геометрическая модель проушины

Решение задачи проводилось в уточненной нелинейной постановке с учетом упругопластического деформирования материала и контактного взаимодействия поверхностей деталей. Решение нелинейных задач осуществляется шагово-итерационным методом последовательных нагружений. Для описания пластического поведения использовалась билинейная модель с кинематическим упрочнением, которая справедлива для большинства металлов в случае небольших пластических деформаций.

На рис. 5, 6 можно наблюдать изгиб оси, который влечет за собой сложную деформацию вильчатой проушины и контактную деформацию смятия центральной проушины. Максимальные напряжения растяжения, равные 429 МПа, наблюдаются в нижней части оси и вызваны изгибающим моментом.

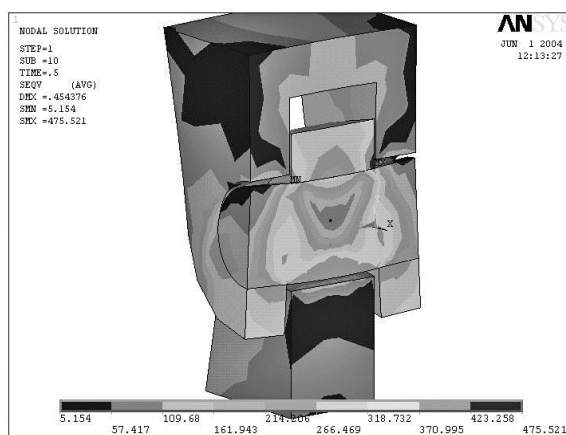


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние модели в системе ANSYS

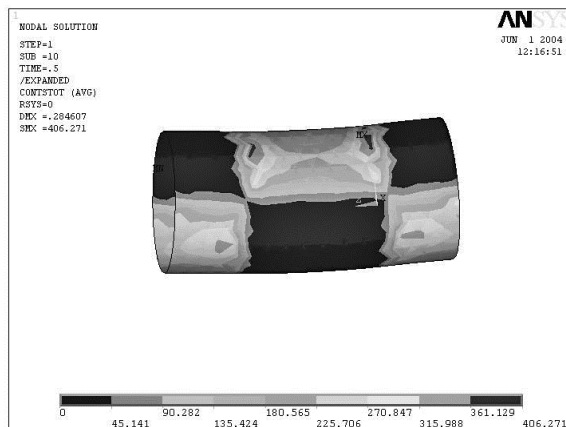


Рис. 6. Контактные напряжения, рассчитанные в системе ANSYS

Результаты проведенных исследований показали, что даже при приложении небольшой нагрузки в зоне отверстий проушин возникают значительные напряжения, превышающие допустимый предел. Так-

же были рассмотрены способы уменьшения величины контактных напряжений с использованием технологических факторов (посадка оси с натягом, установка вильчатой проушины под углом к центральной проушине).

**Исследованы проблемы механики разрушения сварных конструкций.** Рассмотрены образцы, моделирующие поведение основных типов сварных соединений. Используя программу ANSYS, получены значения коэффициента интенсивности напряжений. С помощью программного пакета нетрадиционного математического моделирования многомерных зависимостей ANETR определены регрессионные зависимости и статистические характеристики.

### Заключение

Разработана и представлена методика комплексного автоматизированного анализа, позволяющая провести исследование сложных механизмов, основанная на применении системы ADAMS для кинематического, динамического анализов и системы ANSYS для прочностного анализа. С применением данной методики проведен анализ модели пространственного манипулятора. В системе ADAMS получены результаты в виде графиков и числовых значений перемещений, скоростей, ускорений в различных узловых соединениях механизма, рассчитаны реакции системы в виде усилий и моментов. Отдельные элементы механизма (шарнирные соединения) рассмотрены в системе ANSYS, с помощью которой построена конечно-элементная модель проушины и проведен прочностной анализ. Выполнен повторный кинематический и динамический анализ объекта. Уточнены расчетные случаи и усилия.

Внедрение технологии автоматизированного динамического и прочностного анализов позволит значительно сократить сроки, обеспечить необходимую точность, уменьшить стоимость решения за счет отсутствия необходимости создания натурального образца и проведения дополнительных экспериментов, позволит для конкретного продукта сделать свой вклад в создание системы CALS-технологии [8] проектируемой системы в целом.

### Литература

1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
2. Норенков И.П., Нургужин М.Р. Информационная поддержка машиностроительных изделий // Сборник трудов Международного симпозиума информационные и системные технологии в индустрии, образовании и науке, посвященный 50-летию КарГТУ. (Караганда, 24–25 сентября 2003 г.). – Караганда: КарГТУ, 2003. – С. 16–18.
3. Левковец Л.Б., Тарасенков П.В., Сокуренок Ю.А. Autodesk Inventor. Базовый курс на примерах. – СПб: БХВ Петербург, 2008. – 400 с.
4. Левковец Л.Б. Самоучитель AutoCAD 2010. – СПб: БХВ Петербург, 2009. – 400 с.
5. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. – 4-е изд., доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 639 с.
6. Степанов П.Б., Нургужин М.Р., Альтер И.М. Основы автоматизированного расчета деталей методом конечных элементов. – Караганда: КарПТИ, 1988. – 93 с.
7. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского. – М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
8. Погорелов В.И. Система и ее жизненный цикл: введение в CALS-технологии: Учебное пособие. – СПб: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2010. – 182 с.

<i>Терлецкая Анастасия Михайловна</i>	– Карагандинский государственный технический университет, ст. преподаватель, ternast@mail.ru
<i>Райц Надежда Робертовна</i>	– Карагандинский государственный технический университет, ст. преподаватель, nadyareiz@mail.ru
<i>Лимарева Инна Григорьевна</i>	– Карагандинский государственный технический университет, ст. преподаватель, innalim21@mail.ru
<i>Фомичева Елена Константиновна</i>	– Карагандинский государственный технический университет, ст. преподаватель, fomicheva_lena@mail.ru
<i>Мурых Елена Львовна</i>	– Карагандинский государственный технический университет, ст. преподаватель, Murykh@mail.ru