

УДК 681.5.015:658.786

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ДОРОЖНЫХ МАШИН

**И.Г. Кириченко, проф., д.т.н., А.В. Черников, проф., д.т.н.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

Аннотация. Проведен анализ современного программного обеспечения для разработки геометрических моделей машин и процессов, которые используют при строительстве, методами геометрического и компьютерного моделирования. На его основе рассмотрены вопросы обучения студентов методам создания оптимальных конструкций и проведения с ними компьютерных экспериментов относительно определения критических режимов работы, оптимизации траекторий движения и режимов управления.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, компьютерное моделирование, строительные дорожные машины, CAD, CAE.

АНАЛІЗ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ КОМП'ЮТЕРНОГО ПРОЕКТУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ І ДОРОЖНИХ МАШИН

**І.Г. Кириченко, проф., д.т.н., О.В. Черніков, проф., д.т.н.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

Анотація. Проведено аналіз сучасного програмного забезпечення для розробки геометричних моделей машин і процесів, що використовують при будівництві, методами геометричного та комп'ютерного моделювання. На його основі розглянуто питання навчання студентів методам створення оптимальних конструкцій та проведення з ними комп'ютерних експериментів щодо визначення критичних режимів роботи, оптимізації траєкторій руху та режимів керування.

Ключові слова: геометричне моделювання, комп'ютерне моделювання, будівельні дорожні машини, CAD, CAE.

ANALYZING CAD SOFTWARE FOR CONSTRUCTION AND ROAD MACHINES

**I. Kyrychenko, Prof., Dr., Eng. Sc., A. Chernikov, Prof., Dr., Eng. Sc.,
Kharkiv National Automobile and Highway University**

Abstract. CAD software for developing geometric models of machines and processes in construction has been analyzed with the methods of geometric modelling and computer simulation. Based on this analysis, issues of teaching students how to create optimal designs and conduct computerized experiments as to determining critical operating modes as well as improving motion paths and control modes have been considered.

Key words: geometric modelling, computer simulation, construction and road machines, CAD, CAE.

Введение

Программа подготовки инженеров-механиков по специальности «Строительные, дорожные машины и оборудование» предусматривает

приобретение навыков и знаний программных средств, используемых на предприятиях машиностроительного комплекса Украины и зарубежных стран. При этом на младших курсах особое внимание уделяется базовой под-

готовке и умению работать в наиболее распространённых графических редакторах. Для студентов старших курсов применяются иные принципы. Учитывается специфика предприятий, на которых они будут работать после окончания обучения, а также обязательным элементом является выполнение научно-исследовательской работы с широким применением информационных технологий.

Анализ публикаций

Проектирование объектов машиностроения вступило в новый этап своего развития, когда вместе с ростом сложности проектов должно обеспечиваться сокращение сроков проектирования и уменьшение числа проектировщиков, в значительной мере за счет автоматизации проектирования и компьютеризации инженерных работ. Наибольшее распространение получили диалоговые (интерактивные) системы, позволяющие проектировщику в ходе получения проектных решений вести диалог с компьютером на естественном для инженера языке компьютерной графики. В диалоговых системах применяются геометрические модели как наиболее наглядные и понятные инженерно-техническим работникам. Они обеспечивают эффективное внедрение математических методов в проектирование и технологические процессы: геометрическое моделирование занимает все более заметное место в качестве эффективного инструмента инженеров [1–6].

Цель и постановка задачи

Цель работы является комплексный анализ современных версий программных продуктов разных разработчиков, их основных возможностей и приемов работы для принятия решения о внедрении их в учебный процесс.

Сравнение возможностей пакетов моделирования

В учебном процессе и научно-исследовательской работе кафедр механического факультета ХНАДУ используются такие программные продукты как: Autodesk Inventor, SolidWorks, ANSYS, Unigraphics, Pro/Engineer, MSC/NASTRAN, Win-Machine и др. Эти пакеты включают специализированные модули для решения различных расчетных задач, включая подсистемы расчета на основе метода конечных элементов, в частности на прочность, жесткость и т.д. С их помощью можно полу-

чать рациональные геометрические размеры элементов машин и строительных конструкций.

Компании IBM и Dassault Systems создали линию продуктов CATIA-CADAM, используя принцип Concept-to-Product-in-Operation (от концепции до продукта), обеспечивших преимущество виртуальных прототипов и интеграцию многоцелевых технологий в единой базе данных. Это дало возможность выполнять работы над общими проектами в различных областях инженерной деятельности.

Продукты серии Genius CAD являются прикладными программами для AutoCAD. С их помощью автоматизируют и расширяют функциональные возможности базовых программ за счет дополнения ее функциями на базе объектно-ориентированной технологии с использованием библиотек соответствующих стандартов, средств создания и оформления чертежно-конструкторской документации.

Американская фирма ANSYS Inc. разработала ряд самостоятельных и прикладных инженерных программ, включая DesignSpace для работы в среде AutoCAD. Основные продукты семейства ANSYS: ANSYS/Multiphysics – инженерный анализ и оптимизация; ANSYS/Mechanical – структурный и нелинейный анализ; ANSYS/LS-DYNA – динамическое моделирование и анализ.

Parametric Technology Corporation (PTC) – одна из известнейших в мире компаний, разрабатывающих CAD/CAM/CAE-системы высокого уровня. Основная разработка компании – система Pro/Engineer. Структура Pro/Engineer позволяет подобрать оптимальную конфигурацию системы из нескольких десятков имеющихся сегодня специализированных функциональных модулей. Среди них: Pro/Animate (фотореалистическая анимация); Pro/Designer (быстрая проработка концептуального дизайна изделия); Pro/Detail (создание рабочих чертежей); Pro/Develop (средства создания дополнительных модулей); Pro/Interface (обмен данными с другими CAD-системами); Pro/Mesh (генерация сетки конечных элементов); Pro/Manufacturing (генерация ЧПУ-программ обработки изделия) и др.

Стратегический продукт компании MacNeal-Schwendler MSC/NASTRAN служит для анализа прочности конструкций, их оптимизации методом конечных элементов. Система MSC/CONSTRUCT разработана для концеп-

туальной и детальной оптимизации проектов. MSCPATRAN – это открытая интегрированная CAE-среда для анализа проектов на всех этапах сквозного процесса «проектирование – производство», что обеспечивает инженеров и проектировщиков интерфейсом с расчетными системами. MSC/DYTRAN – программа общего назначения для трехмерного моделирования и анализа нелинейных кратковременных процессов, которые включают взаимодействие жидкостей и конструкций. MSC/MVISION обеспечивает анализ долговечности деталей и конструкций. Студенты используют этот программный продукт, как правило, на 4-м и 5-м курсах при выполнении курсовых и дипломных проектов. Практически каждый студент должен выполнить прочностной расчёт одной из металлоконструкций строительной или дорожной машины.

Компания SolidWorks сосредоточила свои усилия в области разработки систем автоматизации машиностроительного проектирования; ее целью было обеспечение рабочего места инженера «настольной» системой трехмерного моделирования. Основной продукт компании – система параметрического проектирования с возможностями трехмерного моделирования. Обеспечивается разработка отдельных составных элементов, комплексное проектирование, оценка динамических характеристик и др. Изучению и реальному программированию в этой среде уделяется достаточно много учебного времени, поскольку на предприятиях-работодателях часто используются такие системы.

Unigraphics является универсальной системой автоматизированного проектирования и производства для предприятий аэрокосмической и автомобильной промышленности, машиностроения, медицинской промышленности и др. Области применения: автоматизированное проектирование (CAD), механическая обработка (CAM), инженерный анализ (CAE).

Семейство продуктов фирмы Autodesk предназначено для выполнения широкого спектра инженерных работ в строительстве, архитектуре, машиностроении, картографии, геодезии и др. Основные продукты: AutoCAD, AutoCAD Mechanical, Autodesk Mechanical Desktop, AutoCAD Civil 3D, AutoCAD Electrical, AutoCAD Revit Architecture Suite, Autodesk 3DS Max Design, Autodesk Infrastructure Modeler, Autodesk Simulation Mechanical and Multiphysics, Autodesk Inventor – все они

позволяют оперировать параметрическими данными, включая векторные и растровые изображения [2–5].

Autodesk Inventor – комплекс программного обеспечения для выполнения проектов больших машиностроительных узлов, который включает среды двухмерного и трехмерного параметрического проектирования, а также инженерного анализа. Данное решение предоставляет предприятиям развитые и полностью интегрированные средства, которые включают Autodesk Inventor для трехмерного проектирования и оформления документации, а также анализа конструкции, AutoCAD Mechanical для двухмерного проектирования и оформления чертежей, Autodesk Vault для управления данными проекта. Инновационные технологии – такие как адаптивное проектирование, высокая производительность при проектировании сборок объемом несколько десятков тысяч компонентов и коллективные средства разработки – оказывают содействие быстрому и успешному решению конструкторских задач.

Все перечисленное делает комплекс программных продуктов Autodesk Inventor одним из лучших решений для САПР среднего уровня для трехмерного проектирования в машиностроении. Специализированные приложения позволяют решать задачи конечно-элементного анализа конструкции, оптимизации изделия с учетом действующих на него нагрузок, анализа и оптимизации динамических и кинематических характеристик изделия, технологические задачи подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ, проектирования и построения разверток тонколистовых изделий и многое другое. Гибридная технология системы позволяет в процессе моделирования многократно переходить от работы с поверхностями к твердотельному моделированию и наоборот. Конструктор имеет в своем распоряжении все средства контроля формы изделия. Он может использовать критерии гладкости, специальные инструменты построения перехода по сечениям, которые сходятся в точку, заливание трехмерных разрывов в поверхности, построение сдвига по нормали к поверхности, переходу по сечениям с центральной образующей, соединений и т.д.

Библиотека стандартных компонентов предоставляет быстрый и удобный доступ к хранилищу инженерных данных, упрощая процесс создания и повторного использования (и

управления) для всех разрешенных к применению комплектующих. Библиотека стандартных компонентов включает свыше 650 000 элементов, таких как болты, гайки и винты, а также позволяет добавлять компоненты и конструктивные элементы по стандартам предприятия в виде пользовательских библиотек.

Динамический анализ контактного взаимодействия позволяет превратить модель в реальный механизм, в котором при перемещении тех или иных деталей контролируется их взаимодействие с окружением. Если какая-то из деталей полностью зафиксирована (лишена всех степеней свободы), то при контакте с ней механизм будет останавливаться, отражая реальные проблемы в работе готового изделия. Автоматизированные инструменты контроля взаимных пересечений компонентов в сборке позволяют правильно определить посадку деталей. Чтобы обеспечить гибкость производства, конструктор может определить допуски для компонентов.

Autodesk Inventor в автоматическом режиме создает проекционные и изометрические виды, выносные элементы и сечения. На чертеже автоматически проставляются размеры, которые используются при построении модели, что позволяет значительно сократить время создания чертежа по сравнению с традиционной двухмерной технологией. Среда оформления чертежей поддерживает украинские и мировые стандарты оформления технической документации, такие как ГОСТ, ANSI, DIN, GB, ISO и JIS. Виды чертежей связаны с исходными моделями, благодаря чему при внесении любого изменения в модель оно автоматически отображается на чертеже. Генерация и автоматическое создание спецификаций на основе модели в несколько раз ускоряет подготовку данных по сравнению с традиционными двухмерными методами. При этом устраняются ошибки, связанные с действием «человеческого фактора».

Autodesk Inventor поддерживает промышленные стандарты обмена данными для импорта и экспорта моделей, чертежей и данных проекта. Это обеспечивает общую работу с поставщиками и заказчиками при обмене данными с другими 3D CAD/CAM-системами. Поддерживается импорт файлов в форматах DWG, DXF, Pro/E, SAT, Parasolid, IGES и STEP, а также экспорт деталей и сборок в форматах SAT, IGES, STEP, STL и Autodesk

Streamline. Для быстрого просмотра, комментирования и печати проектов может использоваться Autodesk Design Review. В частности, система обеспечивает быстрое создание иллюстраций для технического руководства, инструкций по сборке и разборке изделий, пособий и видеороликов для обучения персонала производств.

За предыдущее десятилетие конструкторы объектов машиностроения изменили свой подход к процессу проектирования, перейдя от двухмерных САПР к трехмерным, которые реализуют идею генерации твердотельных компьютерных моделей [6–9]. Возрастающая конкуренция и необходимость сокращения сроков проектирования привели к тому, что за последние пять лет на трехмерное проектирование перешло столько же организаций, сколько за все предыдущие годы существования этой технологии.

Наиболее очевидное отличие твердотельного моделирования от двухмерного чертежа – это создание точной трехмерной компьютерной модели проектируемого изделия. Для большинства конструкторов возможность выразить свои разработки в трехмерном представлении означает большую творческую свободу и эффективность: конструкторы мыслят трехмерными образами. Выразить трехмерный мысленный образ в плоских проекциях – довольно сложная задача; работа же в трехмерной среде помогает сократить время, необходимое для преобразования пространственного образа в двухмерные чертежи.

Одним из главных преимуществ трехмерного моделирования является возможность быстрого создания чертежей. Виды в разных проекциях создаются автоматически. Исходным материалом для них служит объемная модель. Такая тесная связь двухмерного и трехмерного пространств – важное положительное свойство Autodesk Inventor. Даже для простых компонентов получить виды чертежа по трехмерной модели часто удается быстрее, чем строить их в традиционной чертежной среде. Применение трехмерных САПР не зависит от сложности задач. Даже для простых деталей полезно иметь объемные модели. Для многих проектных организаций возможность автоматического получения изометрических видов, сечений и схем позволяет существенным образом повысить эффективность за счет

сокращения сроков выполнения проектов и уменьшения ошибок.

Поскольку в трехмерных моделях содержится намного больше инженерной информации, чем в двухмерных чертежах, другим важным преимуществом твердотельного моделирования является возможность использования результатов моделирования на следующих стадиях – например, в программах для инженерных расчетов или генерации программ для станков с ЧПУ. Много расчетно-инженерных функций уже интегрированы в Autodesk Inventor. Можно анализировать напряжения и деформации методом конечных элементов, выполнять кинематический и вариационный анализы. Возможные ошибки конструирования выявляются уже на ранних стадиях. С Autodesk Inventor могут взаимодействовать и другие программные продукты, которые выполняют анализ методом конечных элементов, анализ движущихся частей, управление и обмен данными. В среде Autodesk Inventor студенты механического факультета выполняют значительный объем графических и расчетных работ, а также моделирование машин. Активная работа магистров механического факультета под руководством преподавателей кафедры строительных и дорожных машин, а также кафедры инженерной и компьютерной графики позволила создать виртуальную лабораторию, в которой проведены испытания моделей погрузчиков, автогрейдеров, скреперов и некоторых других типов машин. Высокий уровень подготовки наших студентов подтверждается, в частности, призовыми местами, завоеванными на международных конкурсах, организованных фирмой Autodesk: в 2012 году – 3 первых места и 3 – вторых, в 2013 – 2 первых места и 2 третьих.

При разработке системы автоматизированного проектирования узлов машин большое внимание отводится вопросам необходимой прочности этих узлов (это также связано со стоимостью узла и машины в целом), оптимальной геометрической форме их поверхностей и минимизации их металлоемкости.

Физические процессы, которые характеризуют напряженно-деформированное состояние твердых тел, движение и теплообмен текучей среды, моделируются специальными программами [1, 5]. Для решения уравнений, которые описывают модели, используют метод

конечных элементов и метод конечных объемов. Эти методы достаточно распространены при математическом моделировании разных физических процессов и, после необходимых уточнений и упрощений, используются в компьютерных программах.

Метод конечных элементов в наше время является стандартом при решении задач механики твердого тела с помощью численных алгоритмов. Метод конечных элементов занимает ведущее место, благодаря возможности моделировать широкий круг объектов и явлений. При этом, разумеется, нужно учитывать имеющиеся при любой численной аппроксимации условности и погрешности. Поэтому вопрос соответствия между расчетной моделью и реальностью является основным при использовании программ анализа. Несмотря на то, что такие программы имеют более или менее подробную документацию, они в определенной степени остаются «черными ящиками». Это означает определенную непредсказуемость результатов, а также некоторую свободу в их интерпретации. Качество выводов, сделанных на основе результатов, целиком зависит от квалификации специалиста.

При создании расчетной схемы сложной конструкции применяют некоторую идеализацию ее формы, при этом степень этой идеализации влияет на достоверность результатов расчета. Задачи со сложной геометрией по обыкновению решаются численными методами, к которым относится, в частности, и метод конечных элементов.

Стремление рассмотреть максимально приближенные к действительности форму и условия работы конструкции, учесть реальные особенности деформирования материала требует дальнейшего усовершенствования численных методов расчета. Основными этапами такого исследования прочности конструкций являются: построение физической модели, построение математической модели, их исследование и анализ полученных результатов.

Опишем основные возможности дальнейшего усовершенствования методов геометрического моделирования и конструктивного выполнения объектов автомобильно-дорожной техники с использованием пакета Inventor. В первую очередь это касается методов проведения кинематического и динамического ана-

лизмов, а также расчётов на прочность. Основной задачей является описание и исследование типов и особенностей соединений элементов технического объекта в среде моделирования [6].

Среда Autodesk Inventor Simulation содержит команды для моделирования и анализа динамических характеристик механизмов в движении при различных режимах работы и условиях нагрузки. Состояние нагрузки можно экспортировать в систему анализа напряжений при любых режимах движения. В ходе моделирования выясняется, каким образом детали реагируют на динамические нагрузки в любой точке диапазона движения. Динамическое моделирование позволяет: автоматически превращать все зависимости соединения и вставлять зависимости в стандартные соединения; пользоваться большой библиотекой подвижных соединений; определять внешние силы и моменты; моделировать движение не только на основе внешних нагрузок, но и на основе положения, скорости, ускорения и крутящего момента; наглядно представлять движение с использованием трассирования; экспортировать созданные графики и схемы в Microsoft Excel; передавать динамические и статические соединения и силы инерции в модуль «Анализ напряжения» Autodesk Inventor Simulation или ANSYS; рассчитывать силу, необходимую для сохранности статического равновесия в динамическом моделировании; превращать сборочные зависимости в подвижные соединения; при определении соединений использовать трение, демпфирование и упругость как функции от времени; использовать динамическое движение детали интерактивно, применяя динамическую силу при моделировании с соединениями; создавать реалистичные видеоролики с использованием Inventor Studio.

Команды динамического моделирования среды Autodesk Inventor Simulation позволяют оптимизировать процесс постановки задачи и разработки конструкции, а также сократить количество прототипов. Однако, в связи с использованием при моделировании ряда гипотез, можно только приблизительно прогнозировать поведение реальных механизмов. С помощью динамического моделирования или среды сборки замысел превращается в функциональный механизм. Динамическое моделирование добавляет в этот функциональный механизм разного вида динамические нагрузки под влиянием реаль-

ных факторов для создания действительной кинематической цепочки.

По умолчанию определенные зависимости, которые существуют в составлении, при динамическом моделировании автоматически превратятся в соединения. Эта операция позволяет исключить необходимость трудоемкой работы по созданию соединений детали (в ходе динамического моделирования выполняется преобразование зависимостей, которые имеют отношение к степеням свободы, таких как соединение и вставка). Однако преобразование зависимостей, связанных с положением (например, угол), не выполняется.

Динамическое моделирование полезно использовать на всех этапах процесса проектирования для усовершенствования модели: и при создании цифровых прототипов внесение в проект небольших изменений позволяет оценить результаты, прежде чем приступить к работе с реальными деталями, и при анализе ошибок выполняют цикл операций по моделированию для существующих продуктов. Применяют силы, действиям которых будет подвергаться компонент, и определяют, когда и почему могут возникнуть ошибки.

Выводы

Анализ существующих программ компьютерного моделирования показал, что их современные версии обладают сходными возможностями. Наш выбор остановлен на программах фирмы Autodesk, ввиду возможности использования более 100 различных приложений и, в том числе, возможности получения бесплатных учебных лицензий для студентов, преподавателей и учебных аудиторий университета. Кроме того, ввиду отмеченного сходства технологий проектирования, специалистам после обучения программным продуктам Autodesk не составит большого труда освоить другие системы, традиционно используемые на предприятии.

Литература

1. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. – С.Пб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
2. Концевич В.Г. Твердотельное моделирование машиностроительных изделий в Autodesk Inventor. / В.Г. Концевич. –

- К.–М.: ДиаСофтЮП, ДМК Пресс, 2010. – 648 с.
3. Технология цифровых прототипов. Autodesk Inventor 2010. Официальный учебный курс / под ред. Д.А. Мовчана. – Серия «САПР от А до Я». – М.: ДМК Пресс, 2010. – 944 с.
 4. Allen L. AutoCAD: Professional Tips and Techniques (Really Useful Ebooks) / L. Allen, S. Onstott. – Indianapolis: Wiley Publishing Inc., 2007. – 336 p.
 5. Younis W. Up and Running with Autodesk® Inventor® Simulation 2011 (A step-by-step guide to engineering design solutions) / W. Younis. – Oxford: Elsevier Inc., 2010. – 444 p.
 6. Marsh D. Applied Geometry for Computer Graphics and CAD: 2 ed. / D. Marsh. – London: Springer, 2005. – 366 p.
 7. Черников А.В. Геометрические модели в исследованиях физических и технологических процессов / А.В. Черников // Геометричне та комп'ютерне моделювання: зб. наук. пр. – 2006. – Вип. 17. – С. 159–163.
 8. Черников О.В. Основні напрямки геометричного та комп'ютерного моделювання фізичних та технологічних процесів / О.В. Черников // Геометричне та комп'ютерне моделювання: зб. наук. пр. – 2007. – Вип. 19. – С. 168–182.
 9. Кириченко И.Г. Особенности компьютерного моделирования операций функционально-технологического анализа / И.Г. Кириченко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – 2010. – Вып. 57. – С. 19–21.
- Рецензент: Е.С. Венцель, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
- Статья поступила в редакцию 12 мая 2014 г.
-