



**НГТУ
НЭТИ**

Факультет
радиотехники
и электроники

А. В. ГРИДЧИН

КОМПОНЕНТЫ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

**Введение
в моделирование
на ANSYS**

НОВОСИБИРСК
2022

УДК 621.382-181.48 (075.8)
Г 836

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент, зав. каф. ППИМЭ *Д. И. Остертак*
канд. техн. наук, доцент *Д. В. Лантес*

Работа подготовлена на кафедре ППИМЭ для студентов, обучающихся по программам подготовки бакалавров специальностей 12.04.01 «Приборостроение» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» и утверждена Редакционно-издательским советом университета в качестве учебно-методического пособия

Гридчин А. В.

Г 836 Компоненты микросистемной техники. Введение в моделирование на ANSYS: учебно-методическое пособие / А. В. Гридчин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – 80 с.

ISBN 978-5-7782-4832-8

Пособие посвящено вопросам компьютерного моделирования различных сенсоров и микросистем, из числа разработанных и применяющихся в настоящее время, при помощи системы инженерного моделирования ANSYS. При этом основной акцент в пособии поставлен на описании различных методик и особенностей их реализации в рамках системы ANSYS, которые могут применяться для целей практического моделирования кремниевых механических сенсоров и микросистем.

Пособие представлено как вводный курс лабораторных работ по дисциплинам «Физические основы микро- и наносистемной техники» и «Микродатчики». Первый раздел – это по сути обзор возможностей системы ANSYS при помощи приложения ANSYS Help Viewer. Второй раздел посвящен технологии пошагового создания геометрии простейших объектов. В приложении дается краткое описание метода конечных элементов, с точки зрения его применения к решению задачи моделирования и проектирования сенсоров и микросистем.

УДК 621.382-181.48 (075.8)

ISBN 978-5-7782-4832-8

© Гридчин А. В., 2022
© Новосибирский государственный
технический университет, 2022

Глава 1

ЗНАКОМСТВО С СИСТЕМОЙ ANSYS

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с базовой терминологией, применяемой для работы в среде ANSYS, научиться читать и понимать методические материалы.
2. Ознакомиться с внутренней структурой среды ANSYS и назначением различных приложений ANSYS.
3. Ознакомиться со структурой справочной системы ANSYS Help.
4. Получить представление об общей идеологии моделирования и проектирования в среде ANSYS.
5. Выполнить практическую часть работы и составить отчет.
6. Ответить на контрольные вопросы к работе.

1.1.2. ЦЕЛЬ, СМЫСЛ И ПРИНЦИП КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Компьютерное моделирование – один из способов разработки и проектирования различных конструкций, приборов и систем, в том числе электронных приборов и микросистем. Существует несколько различных уровней проектирования: физическое, технологическое, топологическое, схемотехническое. Все эти обозначенные уровни проектирования реализуются при помощи современного программного обеспечения (ПО). Это ПО может быть реализовано в различных операционных системах, в частности в Windows и Linux. По ходу изучения того или иного ПО вам потребуется знание какой-либо операционной системы. В частности, программный пакет ANSYS реализован под оболочку Windows.

Основная цель компьютерного моделирования микросистем – создание физически адекватной компьютерной модели и изучение этой модели. Обратим внимание на то, что эта модель должна быть, прежде всего, физически адекватной. Например, всем хорошо известно, что если к какому-либо телу приложить механическую нагрузку, превышающую его предел прочности, это тело попросту разрушится. Оболочка камеры может лопнуть, по мембране могут пойти трещины и т. д. Вы можете захотеть увидеть на компьютере, как произойдет этот процесс. Но вы его не увидите, потому что в создаваемую модель не включено описание процесса растрескивания мембраны или взрыва какой-нибудь оболочки. Этот процесс должен быть, прежде всего, описан на языке уравнений теории упругости, гидродинамики, физики взрыва, теории поля и т. п. Иными словами, для того чтобы моделировать различные физические приборы, нужно знать физику их работы.

Другой пример. Современная микропроцессорная техника вплотную приблизилась к созданию наноразмерных приборов. Уже имеются процессоры с размерами затвора полевого транзистора 5 и даже 3 нм. Это тот технологический порог, за которым при моделировании физических процессов, протекающих в этих транзисторах, в рассмотрении необходимо учитывать квантовые явления. Вы можете захотеть увидеть на компьютере, как меняются характеристики приборов, если вы зададите им размеры в несколько нанометров, в связи с проявлением в них квантовых явлений. Но вы не увидите их. Это произойдет потому, что в программе, моделирующей свойства и поведение таких объектов, квантовые явления не учитываются. Иными словами, для компьютера все равно, какой размер будут иметь моделируемые вами приборы. На основе теории, созданной, подчеркнем, **для макроскопических тел**, моделировать физические явления **качественно иного характера** попросту невозможно. Необходимо написать новые уравнения и ввести новые ограничения, характеризующие изменения свойств объектов при переходе на качественно иной уровень. Лишь тогда можно будет говорить о моделировании приборов качественно другого уровня.

Смысл компьютерного моделирования состоит в том, что составление компьютерной модели избавляет вас от необходимости ее создания в реальности, что исключительно важно при проектировании приборов, систем, конструкций, сооружений и т. п. Потому что гораздо легче, проще и дешевле создать компьютерную модель и испробовать на ней различные виды нагрузки, чем создавать большое количество

опытных образцов, которые тоже будут требовать адекватного качества изготовления, на этапе которого тоже возможны многочисленные погрешности и допущения.

Компьютерное моделирование, таким образом, позволяет *предсказать* поведение реального объекта, находящегося под некоторой нагрузкой. Классический пример: компьютерная модель может правильно предсказать и показать профиль прогиба кресла, если на него сядете вы. Однако придется немало потрудиться, чтобы задать правильным образом такие параметры, как площадь, на которую вы давите, величину этого давления, жесткость материала, из которого изготовлено кресло, и т. д. Все перечисленное выше обозначается понятием *граничные условия*. Это некая совокупность данных, определяющих физические параметры создаваемой модели.

Построение физической модели прибора позволяет начать процесс его проектирования. **Принцип компьютерного моделирования**, в отличие от его смысла, состоит в последовательном приближении создаваемой модели к моделируемой реальности. Иными словами, сначала создается приближенная грубая модель, а затем она дополняется новыми параметрами, усложняется и наконец доводится до совершенства. Для этого в пакете ANSYS предусмотрены различные версии, с различным количеством узловых точек. Например, распространяемая свободно **академическая** или **студенческая** версия, скачиваемая с официального сайта ANSYS, имеет очень ограниченное число узлов. С ее помощью можно лишь ознакомиться с техникой моделирования и проектирования различных объектов, но выполнить на ней серьезный конструкторский проект не представляется возможным. Для этой цели существуют коммерческие версии ANSYS.

1.2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ ANSYS

1.2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И СТРУКТУРА ANSYS

ANSYS есть многофункциональная система автоматизированного решения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и управленческих задач, вытекающих из физической реальности, окружающей нас, и потребностей человека как части этой физической реальности.

Для целей, обозначенных тематикой данного учебно-методического пособия, ограничим рассмотрение ANSYS рамками **CAE-системы (Computer-Aided Engineering)**. Иными словами, будем рассматривать

ANSYS как специализированное программное обеспечение, предназначенное для проведения **инженерных симуляций** с целью решения различных физических задач на основе **конечно-элементного моделирования** (смысл термина будет прояснен ниже).

Под **инженерной симуляцией** в ANSYS здесь и далее будем понимать *весь процесс создания модели реального объекта*, включающий задание его геометрии, наложение граничных условий и нагрузок, определение типа анализа, проведение расчетов, получение результата и представление его в удобном для их восприятия виде.

С точки зрения пользователя (разработчика), структура ANSYS включает в себя следующие основные элементы:

- 1) расчетные платформы;
- 2) CAD процессоры;
- 3) специализированные приложения;
- 4) расчетные модули;
- 5) язык параметрического моделирования APDL;
- 6) справочную систему;
- 7) обучающую систему.

1.2.2. РАСЧЕТНЫЕ ПЛАТФОРМЫ ANSYS

Расчетные платформы ANSYS – это приложения, специально сконструированные для сквозного проектирования изделий и объектов, сочетающие в себе возможности визуального проектирования с комплексным подходом к его организации. Расчетная платформа, таким образом, представляет собой многомодульную систему, в рамках которой разработчик, при желании, может объединить различные виды **анализов**, связав их определенным образом с целью последовательного выполнения. Результатом работы, в рамках расчетной платформы, является **проект**, который далее может развиваться и обогащаться за счет дополнения его новыми видами выполняемых анализов. Смысл терминов «анализ» и «проект» будет прояснен ниже. Говоря кратко, расчетная платформа моделирования ANSYS предназначена для проведения **связанного (сопряженного)** междисциплинарного анализа (например, для моделирования пьезоэлектрического или тензорезистивного эффекта).

Расчетными платформами ANSYS являются: ANSYS Workbench, ANSYS Multiphysics, ANSYS Minerva, ANSYS Cloud, ANSYS HPC. Из указанных расчетных платформ три последние позволяют моделировать производственные процессы и осуществлять удаленное управление

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
В1. Цели, задачи, направленность пособия	3
В2. Микросистемы как объект моделирования и проектирования.....	5
Глава 1. ЗНАКОМСТВО С СИСТЕМОЙ ANSYS	9
1.1. Общие положения и цель работы	9
1.1.1. Цель работы	9
1.1.2. Цель, смысл и принцип компьютерного моделирования.....	9
1.2. Общая характеристика системы ANSYS	11
1.2.1. Определение и структура ANSYS.....	11
1.2.2. Расчетные платформы ANSYS.....	12
1.2.2.1. ANSYS Workbench.....	13
1.2.2.2. ANSYS Multiphysics.....	13
1.2.3. CAD-процессоры ANSYS	14
1.2.3.1 ANSYS Design Modeler.....	15
1.2.3.2. ANSYS Space Claim Direct Modeler	15
1.2.4. Язык параметрического моделирования ANSYS Mechanical APDL	16
1.2.4.1. Документация междисциплинарного характера	16
1.2.4.2. Документация специализированного характера	17
1.2.4.3. Дополнительная документация.....	18
1.2.5. Общая терминология, применяемая в ANSYS.....	19
1.3. Справочная система ANSYS и работа с ней	24
1.3.1. Запуск справочной системы ANSYS	24
1.3.2. Дерево каталогов ANSYS Help Viewer	28
1.4. Практическая часть	36
1.4.1. Общий порядок выполнения работы	36

1.4.2. Темы презентаций для практической части	37
Контрольные вопросы	38
Глава 2. СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ МОДЕЛИ	40
2.1. Общие положения и цель работы	40
2.1.1. Цель работы	40
2.1.2. Общие положения.....	40
2.2. Описание рабочего стола ANSYS Mechanical APDL.....	42
2.2.1. Общий вид рабочего стола.....	42
2.2.2. Функции препроцессора по созданию геометрии	48
2.2.2.1. Задание типа конечного элемента и физических констант	49
2.2.2.2. Задание свойств материалов	50
2.2.2.3. Задание геометрии модели.....	53
2.2.2.4. Разбиение модели на конечные элементы	55
2.3. Практическая часть	59
2.3.1. Общий порядок выполнения работы	59
2.3.2. Общая методика решения задач.....	60
Контрольные вопросы	65
Приложение. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	67
П1. Введение.....	67
П2. Дискретизация краевой задачи.....	68
П3. Определение перемещений в пределах конечного элемента	68
П3.1. Определение компонент матрицы деформаций и напряжений.....	71
П3.2. Уравнение равновесия.....	73
П3.3. Особенности описания упругого тела как системы конечных элементов	76