

621.382.8(075)
М 744

№ 4045-2

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Технологический институт
Федерального государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Южный федеральный университет»

Учебно-методическое пособие

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ
В ПРОГРАММЕ ANSYS
ЧАСТЬ II**

Для студентов специальностей 210108 Микросистемная техника,
210202 Проектирование и технология электронно-вычислительных
средств, 210601 Нанотехнология в электронике
и направлений 210100 Электроника и микроэлектроника,
210200 Проектирование и технология электронных средств,
210600 Нанотехнологии

КАФЕДРА КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Таганрог 2009

УДК 621.382.82(07.07) + 681.325.5 – 181.48(07.07)

Составители: И.Е. Лысенко, М.А. Денисенко, Е.В. Шерова,
Н.К. Приступчик

Учебно-методическое пособие "Моделирование элементов микросистемной техники в программе ANSYS. Часть II".– Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2009.– 28 с.

В данной работе излагаются сведения, необходимые для проведения электростатического анализа компонентов микросистемной техники с помощью программы ANSYS. Описан маршрут создания электрической и механической моделей электромеханического микропреобразователя. Показаны способы создания конечно-элементных моделей, наложения граничных условий и просмотра результатов расчетов при решении связанной задачи. Рассмотрены особенности выполнения трехмерного электростатического анализа микропреобразователей.

Ил. 23. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент В.В.Поляков, канд. техн. наук, доцент кафедры
ТМиНА ТТИ ЮФУ.

ВВЕДЕНИЕ

С середины 80-х годов прошлого века одним из наиболее динамично развивающихся научно-технических направлений является микросистемная техника (МСТ), возникшая на стыке электроники, механики и оптики, включающая в себя сверхминиатюрные механизмы, приборы, машины с ранее недостижимыми массогабаритами, энергетическими показателями и функциональными параметрами, создаваемые интегрально-групповыми экономически эффективными процессами микро- и нанотехнологий.

Микроэлектромеханическими системами (МЭМС), называют устройства с интегрированными в объеме или на поверхности твердого тела электронными и микромеханическими структурами. Статическая или динамическая совокупность этих структур обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования, передачи энергии и механического движения в интеграции с процессами восприятия, обработки, передачи и хранения информации. Интеграция МЭМС с оптическими компонентами позволило выделить отдельный класс компонентов микросистем, названный микрооптикоэлектромеханическими системами (МОЭМС).

Для расчета данных микросистем используются дифференциальные уравнения в частных производных с дополнительными уравнениями, выражающими граничные и начальные условия. Нахождение точного аналитического решения, к сожалению, возможно лишь для весьма ограниченного круга одномерных задач при использовании целого ряда допущений. Для решения уравнений математической физики в случае нескольких измерений используют численные методы, позволяющие преобразовать дифференциальные уравнения или их системы в системы алгебраических уравнений. Точность решения определяется шагом координатной сетки, количеством итераций и разрядной сеткой компьютера.

В учебном пособии рассмотрен маршрут решения связанной задачи на примере электростатического анализа электромеханического микропреобразователя.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММЕ ANSYS

Программный комплекс ANSYS представляет собой многоцелевой пакет для решения сложных проблем физики и механики, предназначенный для расчета задач механики деформируемого твердого тела (МДТТ), температурных задач, задач механики жидкости и газа, а также расчета электромагнитных полей. Кроме того, комплекс обладает возможностью расчета связанных задач, в которых результаты расчета для одной среды

(например, поля температур) могут быть использованы в качестве исходных нагрузок для расчета других сред (например, для вычисления распределения напряжений в нагретой детали). Многоцелевая направленность программы позволяет использовать одну и ту же модель для решения связанных задач [1-5].

Программа располагает широким перечнем расчетных средств, которые могут учесть разнообразные конструктивные нелинейности; дают возможность решить самый общий случай контактной задачи для поверхностей; допускают наличие больших (конечных) деформаций и углов поворота; позволяют выполнить интерактивную оптимизацию и анализ влияния электромагнитных полей, получить решение задач гидроаэродинамики и многое другое – вместе с параметрическим моделированием, адаптивным перестроением сетки и обширными возможностями создания макрокоманд с помощью языка параметрического программирования (APDL) [1-5].

Средства твердотельного моделирования включают в себя представление геометрии конструкции, основанное на использовании сплайновой технологии, геометрических примитивов и операций булевой алгебры [1-5].

Многоцелевые функции комплекса ANSYS обеспечиваются наличием в нем многочисленного семейства отдельных специализированных программ, имеющих много общих функций, однако математическое обеспечение которых рассчитано на решение отдельных классов задач [1-5].

В состав программного комплекса ANSYS входят [1,3]:

– ANSYS/Multiphysics – программа для широкого круга инженерных дисциплин, которая позволяет проводить расчеты в области прочности, распространения тепла, механики жидкостей и газов, электромагнетизма, а также решать связанные задачи;

– ANSYS/Mechanical – программа для выполнения проектных разработок, анализа и оптимизации: решение сложных задач прочности конструкций, теплопередачи и акустики. Эта программа позволяет определять перемещения, напряжения, усилия, температуры, давления и другие параметры, важные для оценки механического поведения материалов и прочности конструкции. Данная программа является подмножеством ANSYS/Multiphysics;

– ANSYS/Structural – выполняет сложный прочностный анализ конструкций с учетом разнообразных нелинейностей, среди которых геометрическая и физическая нелинейности, нелинейное поведение конечных элементов и потеря устойчивости. Используется для точного моделирования поведения больших и сложных расчетных моделей. Данная программа является подмножеством ANSYS/Mechanical;

– ANSYS/Thermal – это отдельная программа, выделенная из пакета ANSYS/Mechanical, для решения тепловых стационарных и нестационарных задач;

– ANSYS/LS-DYNA – программа, предназначенная для решения прочностных задач динамики при больших нелинейностях. Эта программа может использоваться для численного моделирования процессов формообразования материалов, анализа аварийных столкновений и ударов при конечных деформациях, включая пробивание, нелинейное поведение материала и контактное взаимодействие элементов конструкции;

– ANSYS/ED – представляет собой программу, обладающую возможностями ANSYS/Multiphysics, но имеющую ограничения по размерам расчетной модели. Эта программа предназначена для учебных целей.

Решение задач с помощью программы ANSYS состоит из трех этапов: препроцессорная подготовка (Preprocessing), получение решения (Solving the equation) и постпроцессорная обработка результатов (Postprocessing) [1-3].

На стадии препроцессорной подготовки выполняется выбор типа расчета, построение модели и приложение нагрузок (включая граничные условия). На данном этапе задаются необходимые для решения исходные данные. Пользователь выбирает координатные системы и типы конечных элементов, указывает упругие постоянные и физико-механические свойства материала, строит твердотельную модель и сетку конечных элементов, выполняет необходимые действия с узлами и элементами сетки, задает уравнения связи и ограничения. Можно также использовать модуль статического учета для оценки ожидаемых размеров файлов и затрат ресурсов памяти [1-5].

Комплекс ANSYS позволяет создавать непосредственно сетку конечных элементов (то есть узлы и элементы), а также геометрическую модель, на основе которой далее создается сетка конечных элементов [1-5].

Этап приложения нагрузок и получение решения включает в себя задание вида анализа и его опций, нагрузок, шага решения и заканчивается запуском на счет конечно-элементной задачи [1-5].

Программа ANSYS предусматривает два метода решения задач, связанных с расчетом конструкций (Structural problems): h-метод и p-метод. h-метод может применяться при любом типе расчетов (статический, динамический, тепловой и т.п.), а p-метод – только в линейном статическом анализе. Кроме того, h-метод требует более частой сетки, чем p-метод [1,3].

На этапе постпроцессорной обработки результатов пользователь может обратиться к результатам решения и интерпретировать их нужным образом [2].

Результаты решения включают значения перемещений, температур, напряжений, деформаций, скоростей и тепловых потоков.

Итогом работы программы на постпроцессорной стадии является графическое и (или) табличное представление результатов [1-5].

Комплекс ANSYS также включает в себя модуль импорта геометрической информации, предназначенный для импорта файлов, содержащих информацию о геометрических моделях, созданных иными комплексами (например, редактором топологии L-Edit системы автоматизированного проектирования Tanner Pro) [1-5].

Программа допускает два режима работы: пакетный (Batch) и интерактивный (Interactive) [1-5].

Пакетный режим – работа программы ANSYS задается программой пользователя. Первая строка в файле должна быть /batch, обозначающая пакетный режим работы. Этот режим особенно эффективен при решении задач, не требующих постоянной связи с компьютером.

Интерактивный режим предполагает постоянное взаимодействие с компьютером: запуск команды пользователем, выполнение ее программой; задание другой команды пользователем и выполнение ее программой и т.д. Если вы ошибетесь, можно исправить ошибку, повторно правильно набрав команду. Данный режим позволяет использовать наиболее подходящие свойства графического режима, построчной подсказки, системного меню и графического набора.

Типы основных файлов, создаваемых и используемых программой ANSYS [1-3]:

- *.db – файл базы данных программы;
- *.dbb – резервный файл базы данных программы;
- *.elem – файл данных сетки;
- *.emat – файл матрицы элементов;
- *.err – файл ошибок, содержит все ошибки и предупреждения, выданные программой в процессе решения;
- *.esav – файл, содержащий данные об элементах, применяемых при выполнении нелинейных расчетов;
- *.full – файл, содержащий глобальные матрицы жесткости и масс;
- *.grph – файл графики;
- *.iges – файл с данными геометрической модели;
- *.inp или *.dat – файл ввода программы при пакетном (batch) режиме работы;
- *.log – протокольный (журнальный) файл, хранящий историю работы в виде ANSYS команд, т. е. полная запись программы (текстовый файл) на всех этапах решения зад (препроцессор, решение, постпроцессор);
- *.mac – файл с макрокомандами;
- *.mp – файл с данными материалов;

- *.node – файл с координатами узлов сетки;
- *.out – выходной текстовый файл с макрокомандами ANSYS;
- *.rst – файл, содержащий результаты расчета задач МДТТ;
- *.rth – файл, содержащий результаты теплового анализа;
- *.rmg – файл, содержащий результаты электромагнитного анализа;
- *.rfl – файл, содержащий результаты гидродинамического анализа;
- *.snn – файл шага нагрузок, применяется при последовательном приложении к модели нескольких, отличающихся между собой, наборов нагрузок;
- *.tri – файл, содержащий матрицу жесткости, приведенную к треугольному виду.

2. ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС

Графический интерфейс пользователя (Graphical User Interface, GUI) служит для удобства работы пользователя в среде комплекса ANSYS. Графический интерфейс пользователя включает в себя следующие объекты [1-3]:

1. Меню утилит (Utility Menu).
2. Главное меню (Main Menu);
3. Окно ввода (ANSYS Input);
4. Панели инструментов (ANSYS Toolbar);
5. Графическое окно (ANSYS Graphics);
6. Текстовое окно (Output Window);

Вид Графического интерфейса пользователя показан на рис. 1.

Каждый из объектов Графического интерфейса пользователя (меню, панели инструментов, графическое и текстовое окно и так далее) имеет свои функции. В отдельных случаях, часть этих функций может дублироваться, а соответствующие функциям операции (вызываемые различными командами комплекса) могут вызываться различными способами, из различных составных частей интерфейса (например, из главного меню, меню утилит и панели инструментов) [1-3].

Меню утилит (Utility Menu) содержит команды операций с файлами, активным набором, изображением объектов геометрической и сеточной моделей и результатами расчета, системами координат, параметрами, вызов справки и некоторые другие команды. Это меню, как правило, может использоваться на любых этапах работы с комплексом (при создании геометрической и сеточной модели, при выполнении вычислений и при анализе результатов) [1-3].

Главное меню (Main Menu), является основным средством работы с

комплексом ANSYS. Каждая строка главного меню соответствует одному из модулей комплекса ANSYS: препроцессору, модулю проведения расчета, двум постпроцессорам, модулям проведения оптимизации и т.д.



Рис. 2.1. Графический интерфейс пользователя

Описание работы с комплексом ANSYS является описанием последовательного выполнения команд, вызываемых преимущественно из главного меню.

Панели инструментов (ANSYS Toolbar) располагаются ниже меню утилит. Эти панели инструментов вызывают часто применяемые команды, в том числе команды работы с файлами [1-3].

Графическое окно (Graphics Window) позволяет проводить визуализацию созданной геометрической и сеточной моделей, в нем курсором мыши указываются объекты, предназначенные для проведения различных операций, отображаются расчетные объекты [1-3].

Текстовое окно (Output Window) содержит информацию о проведении различных операций, вызове команд и является важным средством обратной связи с комплексом. Обычно текстовое окно расположено позади остальных объектов Графического интерфейса пользователя [1-3].

3. ДВУМЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Целью электростатического анализа является определение перемещений упругих элементов электромеханических микропреобразователей под действием электростатических сил и расчет величины и направления вектора напряженности электрического поля. Электростатический анализ относится к виду связанных задач, т.к. в нем последовательно решаются задачи деформации твердых тел и электрических и электромагнитных полей.

Для проведения двумерного электростатического анализа электромеханического микропреобразователя необходимо создать две модели: электрическую и механическую.

3.1. Создание электрической модели проекта

Для создания электрической модели электромеханического преобразования необходимо выполнить следующие этапы:

1⁰. Задать типы конечных элементов. В главном меню выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Element Type* → *Add/Edit/Delete*. В диалоговой панели *Element Type* щелкнуть левой клавишей манипулятора «мышь» на кнопке *Add*. На экране появится диалоговая панель *Library of Element Type*. Выбрать конечные элементы в следующей последовательности (рис. 2):

1. *Structural – Solid – Quad 4node 42*;
2. *Electrostatic – 2D Quad 121*.

Закрыть все открывшиеся окна.

2⁰. Задать свойства материалов. Для задания свойств структурного материала электромеханического микропреобразователя необходимо в главном меню выполнить следующие последовательности действий:

1. *Main Menu* → *Preprocessor* → *Material Props* → *Material Models* → *Structural* → *Linear* → *Elastic* → *Isotropic*;
2. *Main Menu* → *Preprocessor* → *Material Props* → *Material Models* → *Structural* → *Density*.

В появившихся диалоговых окнах ввести соответствующие значения постоянных материала и щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке *OK*. Для проведения данного анализа необходимо задать модуль Юнга (*EX*), коэффициент Пуассона (*PRXY*) и плотность материала (*DENS*).

Для задания параметров материала электрической части расчетной модели электромеханического микропреобразователя необходимо создать новую модель свойств материалов. Для этого в меню диалоговой панели

Define Material Model Behavior выполним следующее действие: *Material* → *New Model*. В появившемся диалоговом окне ввести номер модели материала и щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке ОК. Для задания постоянных второй модели свойств материалов необходимо ввести значения относительной диэлектрической проницаемости материала (MURX) и электрической постоянной (PERX). Для это необходимо выполнить следующий последовательности действий: *Electromanetics* → *Relative Permeability* → *Constant* и *Electromanetics* → *Relative Permittivity* → *Constant*. Закреть все открывшиеся окна.

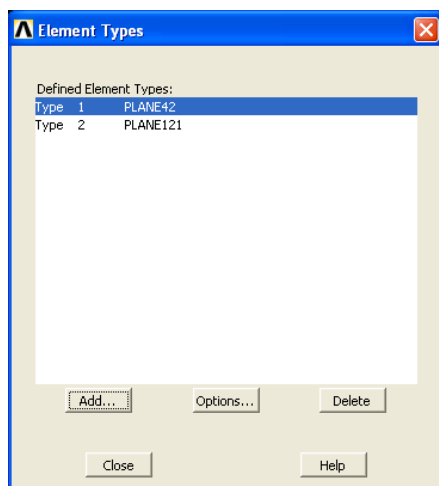


Рис. 2. Диалоговая панель Element Type

На рис.3 представлена диалоговая панель Define Material Model Behavior.

3⁰. Создание геометрической модели электромеханического микропреобразователя методом «сверху-вниз». В главном меню выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Modeling – Create* → *Areas – Rectangle* → *By Dimensions...*. В диалоговой панели Create Rectangle by Dimensions (рис. 4) необходимо задать размеры консольной балки ($x_1=50$ мкм, $x_2=150$ мкм, $y_1=90$ мкм $y_2= 100$ мкм), неподвижного электрода ($x_1=130$ мкм, $x_2=150$ мкм, $y_1=70$ мкм $y_2= 80$ мкм) и окружающей среды ($x_1=0$ мкм, $x_2=200$ мкм, $y_1=0$ мкм $y_2= 200$ мкм). В графическом окне появится геометрическая модель электромеханического микропреобразователя. Так как при создании геометрической модели электромеханического микропреобразователя использовалась методика сверху-вниз, то поверхности, грани и точки каждого элемента создаются

автоматически. Закройте все открывшиеся окна.

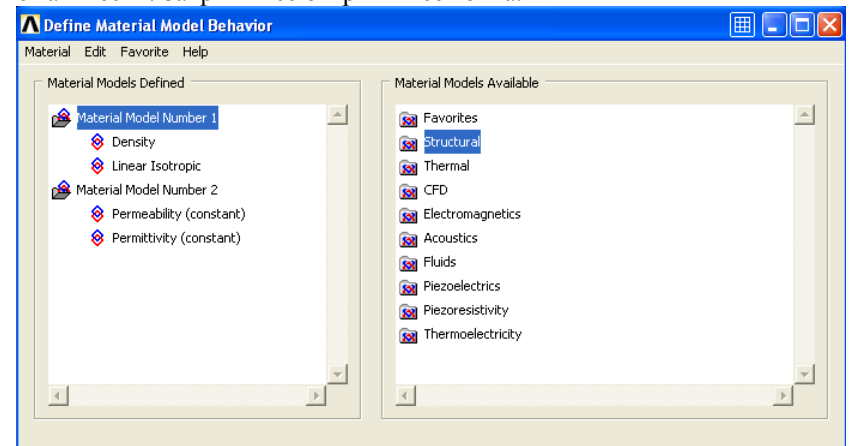


Рис. 3. Диалоговая панель Define Material Model Behavior

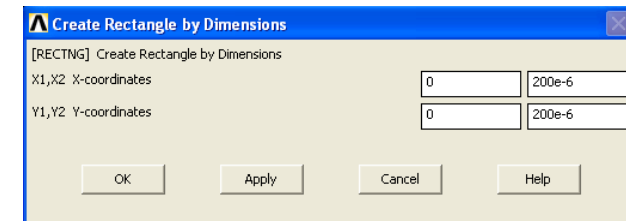


Рис. 4. Диалоговая панель Create Rectangle by Dimensions

Геометрические модели элементов механической части нужно отделить от геометрической модели окружающей среды с использованием операций булевой алгебры. Для этого необходимо выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Modeling* → *Operate* → *Booleans* → *Overlap* → *Areas*. В появившемся диалоговом окне *Overlap Areas* необходимо щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке *Picked All*. Далее, также с помощью операций булевой алгебры, нужно соединить геометрические модели механической и электрической частей электромеханического микропреобразователя для объединения граничных граней и точек. Для этого необходимо выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Modeling* → *Operate* → *Booleans* → *Glue* → *Areas*. В появившемся диалоговом окне *Glue Areas* необходимо щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке *Picked All*.

На рис.5 представлена геометрическая модель электромеханического

микрореобразователя.

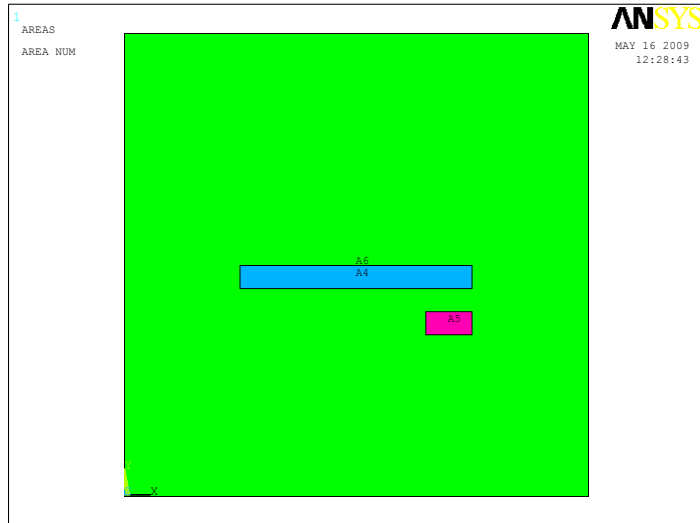


Рис. 5. Геометрическая модель электромеханического микрореобразователя

4⁰. Создание конечно-элементной модели. Перед созданием двумерной конечно-элементной модели микрореобразователя необходимо выполнить установку соответствия моделей свойств материалов с каждым элементом геометрической модели микрореобразователя. Для этого необходимо в главном меню выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Meshing* → *Mesh Attributes* → *Picked Areas*. В графическом окне выбрать геометрические модели консольной балки и неподвижного электрода и в появившемся диалоговом окне Area Attributes (рис.6) щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке Apply. В появившемся втором диалоговом окне Area Attributes (рис.7) в поле Material number необходимо указать номер модели свойств материалов, а в поле Element type number номер типа конечного элемента (для механической части модели в обоих полях диалогового окна должны быть единицы, для электрической – двойки).

Так как консольная балка будет перемещаться в пределах геометрической модели окружающей среды, необходимо установить возможность деформации её конечно-элементной модели. Для этого необходимо в меню утилит выполнить следующую последовательность действий: *Utility Menu* → *Select* → *Entities...* В появившемся диалоговом окне Select Entities (рис.8) в верхнем поле выбрать Areas и щелкнуть левой кнопкой

«мыши» на кнопке ОК. В графическом окне выбрать геометрическую модель окружающей среды и в появившемся диалоговом окне Select Areas щелкнуть левой кнопкой «мыши» на кнопке ОК. Таким образом, геометрическая модель окружающей среды перешла в активный набор геометрических примитивов программы ANSYS. Для объединения геометрической модели окружающей среды (фактически электрической части модели электромеханического микропреобразователя) под именем «air», необходимо выполнить следующую последовательность действий: *Utility Menu* → *Select* → *Comp/Assembly...* → *Create Component...*. В появившемся диалоговом окне Create Component (рис.9) в поле Component name нужно ввести имя компонента (air), в поле Component is made of выбрать параметр Areas и щелкнуть левой кнопкой «мыши» на кнопке ОК.

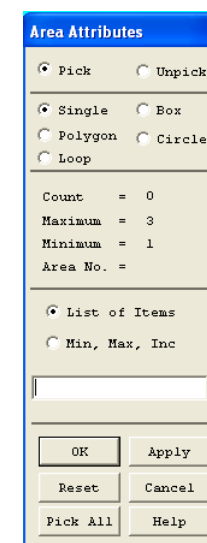


Рис. 6. Диалоговое окно Area Attributes

Для выполнения электростатического анализа электромеханического микропреобразователя необходимо все геометрические модели перевести в активный набор программы ANSYS. Для этого необходимо в меню утилит выполнить следующую последовательность действий: *Utility Menu* → *Select* → *Entities...*. В появившемся диалоговом окне Select Entities (рис.8) в верхнем поле выбрать Areas и щелкнуть левой кнопкой «мыши» на кнопке ОК. В появившемся диалоговом окне Select Areas щелкнуть левой кнопкой «мыши» на кнопке Pick all.

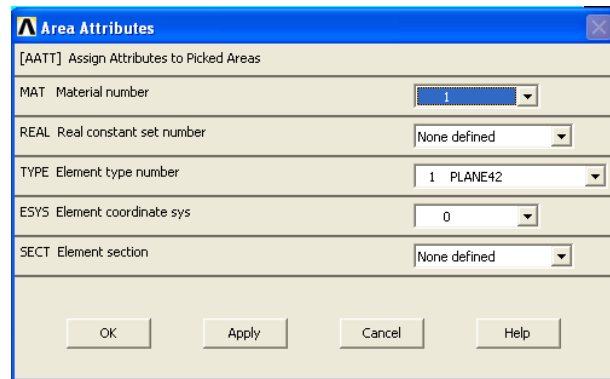


Рис. 7. Второе диалоговое окно Area Attributes



Рис. 8. Диалоговое окно Select Entities

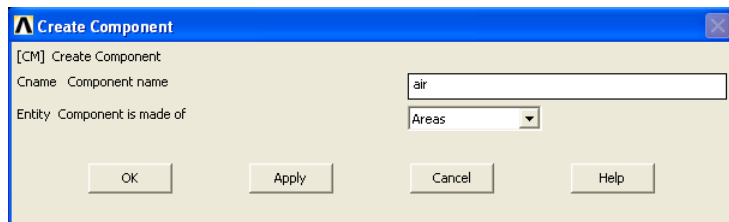


Рис. 9. Диалоговое окно Create Component

Для создания конечно-элементной модели электромеханического

микропреобразователя необходимо в главном меню выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Meshing* – *Mesh Tool*. В появившемся окне Mesh Tool (рис.10) щелкнуть левой кнопкой «мыши» на кнопке Mesh.

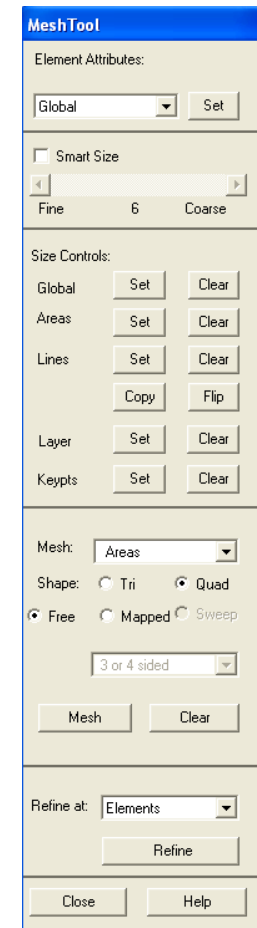


Рис. 10. Диалоговое окно Mesh Tool

В графическом окне программы ANSYS выбрать геометрическую модель окружающей среды и в появившемся диалоговом окне Mesh Areas щелкнуть левой кнопкой «мыши» на кнопке OK. На рис. 11 представлена конечно-элементная модель окружающей среды. Закрывать все открывшиеся окна.

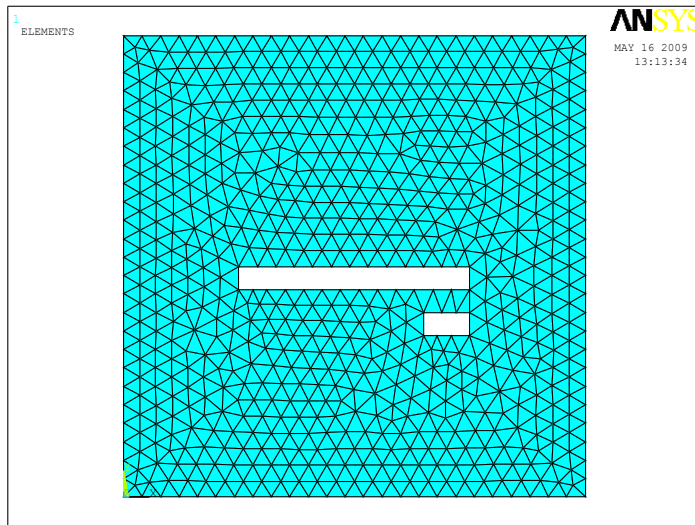


Рис. 11. Сеточная модель окружающей среды электромеханического микропреобразователя

5⁰. Наложить граничные условия. В главном меню выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Solution* → *Define Loads* – *Apply* → *Electric* – *Voltage* → *On Lines*. В графическом окне выбрать все стороны консольной балки и в появившейся диалоговой панели указания *Apply VOLT on Lines* щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке *OK*. В появившейся диалоговой панели в поле *Load VOLT value* ввести 0 (рис. 12). Нажать кнопку *OK*. Задание граничных условий для сеточной модели неподвижного электрода производится аналогичным образом. Только в появившейся диалоговой панели в поле *Load VOLT value* необходимо ввести 10. Закрыть все открывшиеся окна.

6⁰. Обнуление типа конечного элемента механической части модели. В главном меню выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Element Type* → *Add/Edit/Delete*. В диалоговой панели *Element Type* щелкнуть левой клавишей манипулятора «мышь» на кнопке *Add*. На экране появится диалоговая панель *Library of Element Type*. Выбрать тип конечного элемента: *Not Solved – Null Element*. В поле *Element type reference number* ввести значение 1. Закрыть все открывшиеся окна.

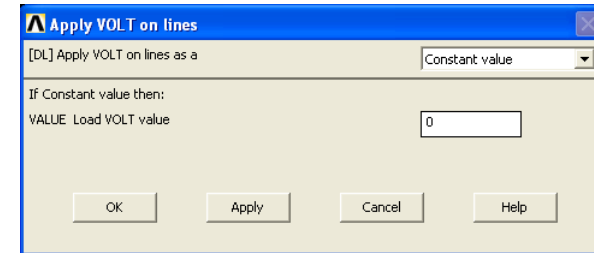


Рис. 12. Диалоговая панель Apply VOLT on Lines

7⁰. Создать файл электрической модели. В главном меню выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Physics* → *Environment* → *Write*. В диалоговой панели Physics Write (рис.13) в поле The physics file title ввести название файла электрической модели проекта (например, electro) и щелкнуть левой клавишей манипулятора «мышь» на кнопке ОК.

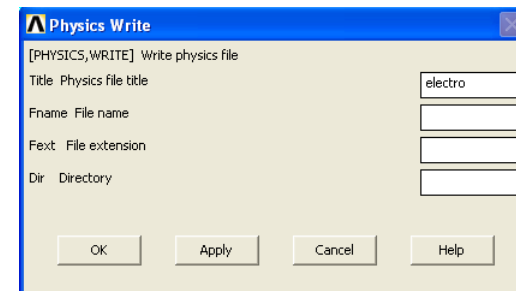


Рис. 13. Диалоговая панель Physics Write

Для создания механической модели электромеханического микропреобразователя необходимо обнулить выполненные установки для электрической модели проекта. Для этого необходимо следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Physics* → *Environment* → *Clear*. В появившейся панели Physics Clear щелкнуть левой клавишей манипулятора «мышь» на кнопке ОК.

3.2. Создание механической модели проекта

Для создания механической модели электромеханического преобразования необходимо выполнить следующие этапы:

1⁰. Задать типы конечных элементов. В главном меню выполнить

следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Element Type* → *Add/Edit/Delete*. В диалоговой панели *Element Type* щелкнуть левой клавишей манипулятора «мышь» на кнопке *Add*. На экране появится диалоговая панель *Library of Element Type*. Выбрать конечные элементы в следующей последовательности:

1. *Structural – Solid – Quad 4node 42*
2. *Not Solved – Null Element*.

Закреть все открывшиеся окна.

2⁰. Задать свойства материалов. Для проведения данного анализа необходимо задать только модуль Юнга (*EX*), коэффициент Пуассона (*PRXY*) и плотность материала (*DENS*).

3⁰. Создание конечно-элементной модели. Для создания конечно-элементной модели электромеханического микропреобразователя необходимо в главном меню выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Meshing – Mesh Tool*. В появившемся окне *Mesh Tool* щелкнуть левой кнопкой «мыши» на кнопке *Mesh*. В графическом окне программы ANSYS выбрать геометрические модели консольной балки и неподвижного электрода, в появившемся диалоговом окне *Mesh Areas* щелкнуть левой кнопкой «мыши» на кнопке *OK*. На рис.14 представлены конечно-элементные модели консольной балки и неподвижного электрода. Закреть все открывшиеся окна.

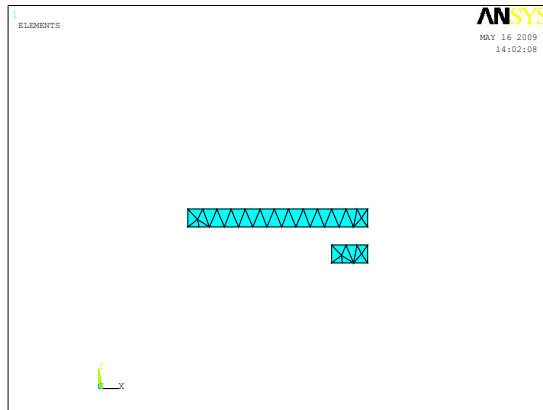


Рис. 14. Конечно-элементные модели консольной балки и неподвижного электрода

4⁰. Наложить граничные условия. В главном меню выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Solution* → *Loads –*

Apply → *Structural* – *Displacement* → *On Areas*. В графическом окне выбрать одну из граней консольной балки и неподвижного электрода. В панели указания Apply U,ROT on Areas щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке OK. В появившейся диалоговой панели в графе DOFs to be constrained выбрать All DOFs (все степени свободы), в графе Apply as – Constant value (постоянная величина), и в графе Displacement value ввести 0 (рис. 15). Нажать кнопку OK. В графическом окне появится сеточные модели балки и неподвижного электрода с граничными условиями. Закрыть все открывшиеся окна.

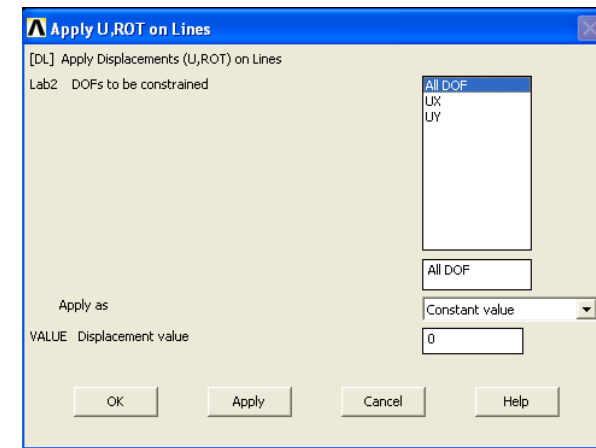


Рис. 15. Диалоговая модель Apply U,ROT on Areas

5⁰. Все геометрические модели проекта перевести в активный набор программы ANSYS. Для этого необходимо в меню утилит выполнить следующую последовательность действий: *Utility Menu* → *Select* → *Entities....*. В появившемся диалоговом окне *Select Entities* (см. рис.8) в верхнем поле выбрать Areas и щелкнуть левой кнопкой «мыши» на кнопке OK. В появившемся диалоговом окне *Select Areas* щелкнуть левой кнопкой «мыши» на кнопке *Pick all*.

6⁰. Завершить создание моделей проекта. В главном меню выполнить следующее действие: *Main Menu* → *Finish*.

7⁰. Создать файл механической модели. В главном меню выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Physics* → *Environment* → *Write*. В диалоговой панели *Physics Write* (см. рис. 13) в поле *The physics file title* ввести название файла механической модели проекта (например, *mechan*) и щелкнуть левой клавишей манипулятора «мышь» на кнопке OK.

3.3. Решение связанной задачи электростатического анализа

В окне ввода программы ANSYS необходимо ввести следующую команду:

ESSOLV, 'имя электрической модели', 'имя механической модели', n1, n2, 'имя морфологического компонента', ..., n3

где n1 – размерной задачи (для двумерной задачи n1=2, трехмерной n1=3); n2 – опция морфологического компонента (рекомендуется n2=0); n3 – количество итераций решения связанной задачи.

В нашем случае, команда на выполнение электростатического анализа будет иметь следующий вид:

ESSOLV, 'electro', 'mechan', 2, 0, 'air', ..., 10

После выполнения решения на экране появится информационное окно. Для продолжения работы необходимо щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке Close.

3.4. Просмотр результатов электростатического анализа электромеханического микропреобразователя

Для просмотра результатов решения связанной задачи необходимо выполнить следующие этапы:

1⁰. Загрузка результатов решения. Для этого необходимо выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *Preprocessor* → *Physics* → *Environment* → *Read*. В появившемся окне Physics Read в поле Read Physics file with Title (рис.16) необходимо выбрать имя модели проекта и щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке ОК. Далее необходимо выполнить следующие действия: *Main Menu* → *General Postprocessor* → *Read Results* → *Last set* → *Read*.

2⁰. Просмотр результатов решения в контурном виде. Для этого необходимо выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *General Postproc* → *Plot Results* → *Contour Plot* → *Nodal Solu*. В появившемся окне Contour Nodal Solution Data в поле Item to be contoured (рис. 167) необходимо выбрать Electric field vector sum и щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке ОК.

В графическом окне программы ANSYS отобразятся результаты решения в контурном виде (рис. 18 и 19).

3⁰. Просмотр результатов решения в векторном виде. Для этого необходимо выполнить следующую последовательность действий: *Main Menu* → *General Postproc* → *Plot Results* → *Vector Plot* → *Predefined*. В появившемся окне Vector Plot of Predefined Vectors в поле Vector item to be

plotted (рис.20) необходимо выбрать Flux & gradient → *Elec field EF* и щелкнуть левой клавишей «мыши» на кнопке ОК.

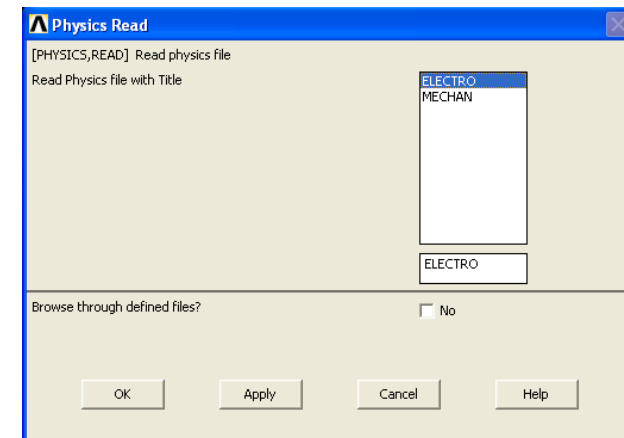


Рис. 16. Диалоговое окно Physics Read

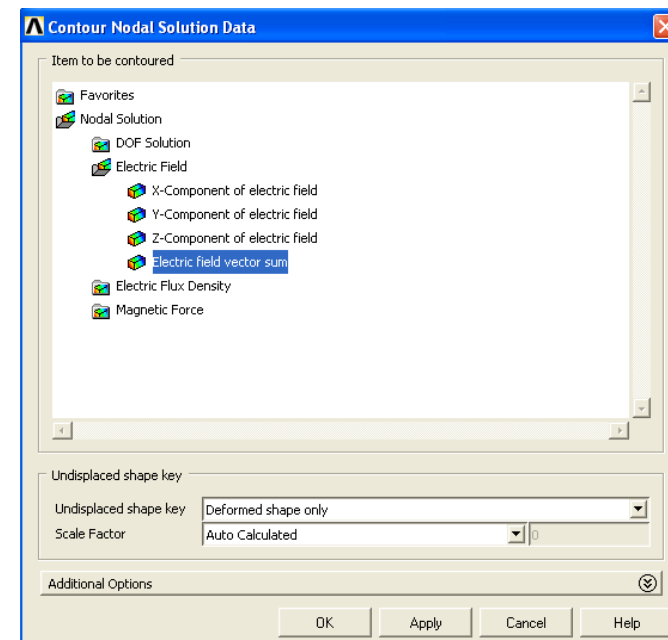


Рис. 17. Диалоговое окно Contour Nodal Solution Data

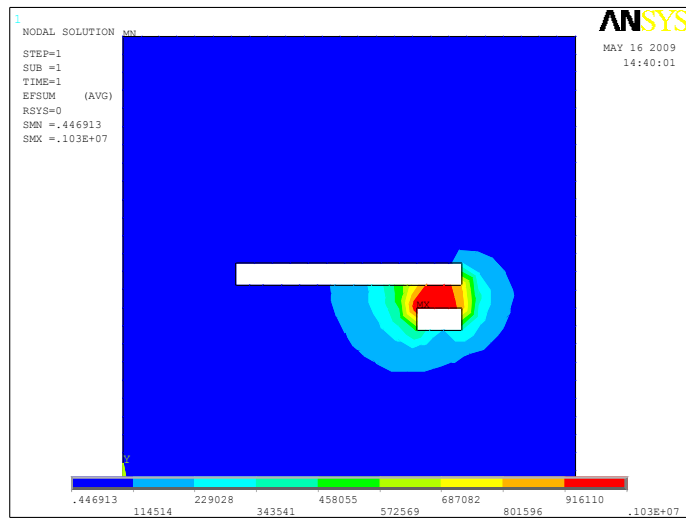


Рис. 18. Результаты решения электрической модели в контурном виде

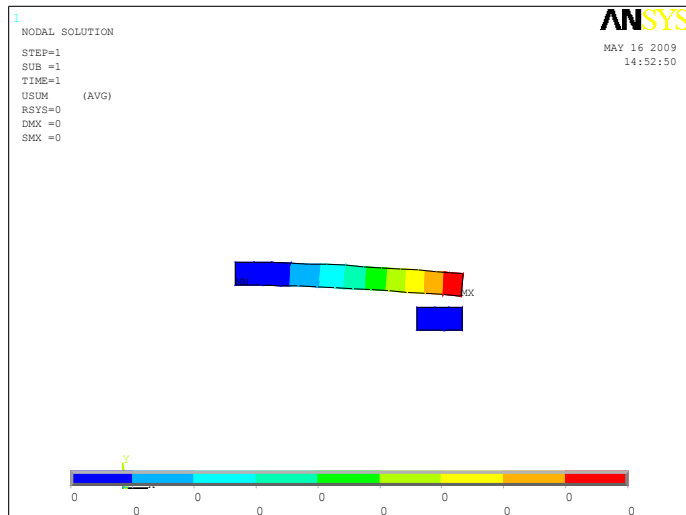


Рис. 19. Результаты решения механической модели в контурном виде

В графическом окне программы ANSYS отобразятся результаты решения в контурном виде (рис. 21).

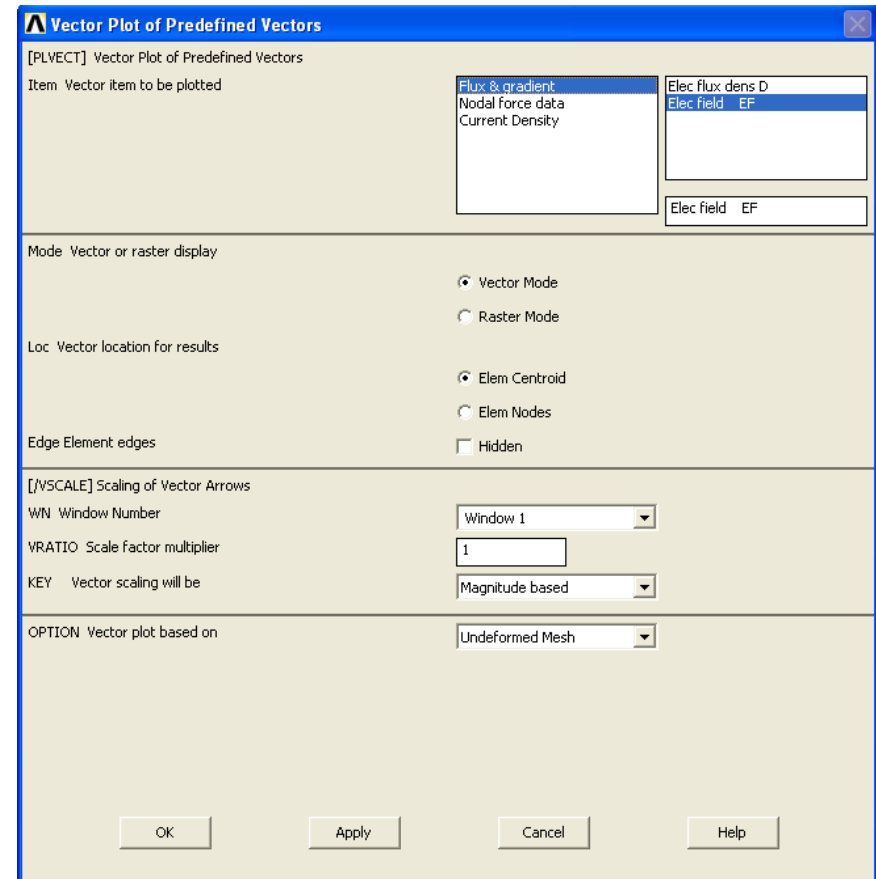


Рис. 20. Диалоговое окно Vector Plot of Predefined Vectors

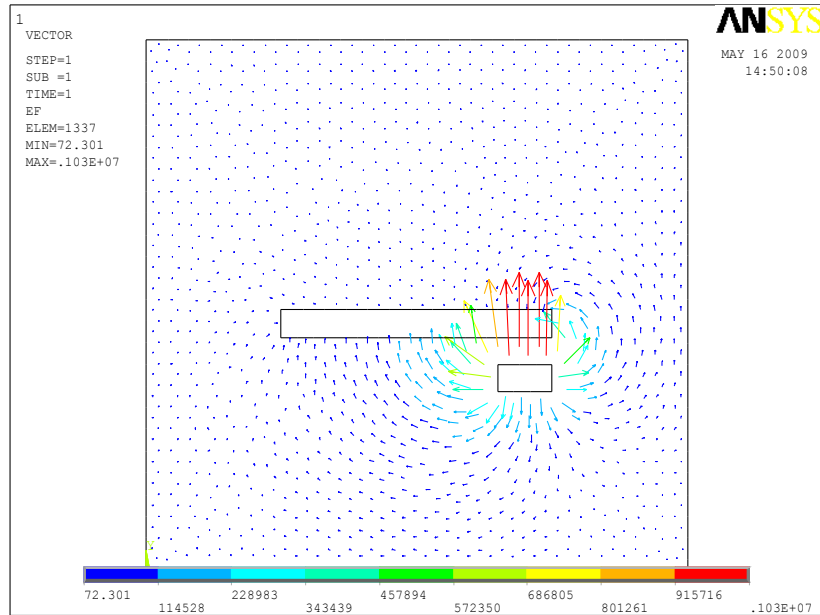


Рис. 21. Результаты решения электрической модели в векторном виде

4. ТРЕХМЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Процедура выполнения трехмерного электростатического анализа электромеханических микропреобразователей содержит те же этапы, что и при выполнении двумерного анализа. Исключение составляют выбор типов конечных элементов (рекомендуется для электрической модели использовать тип Solid122, а для механической – Solid45), и геометрические примитивы на которые накладываются граничные условия (при выполнении трехмерного анализа граничные условия накладываются на площади, а не грани).

На рис. 22 и 23 представлены результаты выполнения трехмерного электростатического анализа электромеханического микропреобразователя [6].

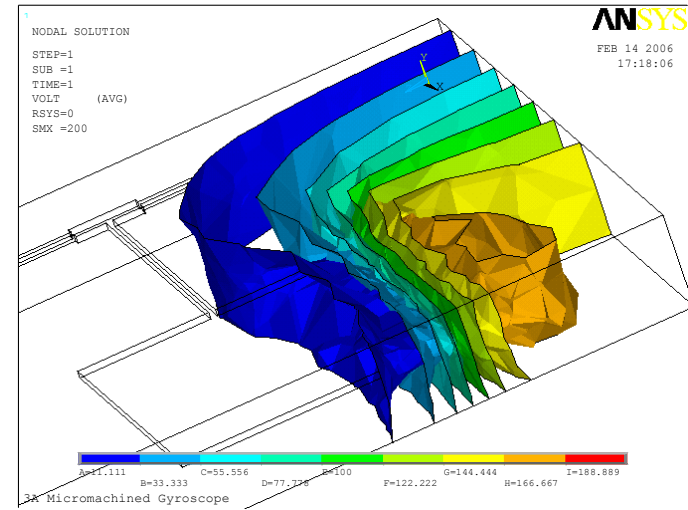


Рис. 22. Результаты решения электрической модели при трехмерном электростатическом анализе

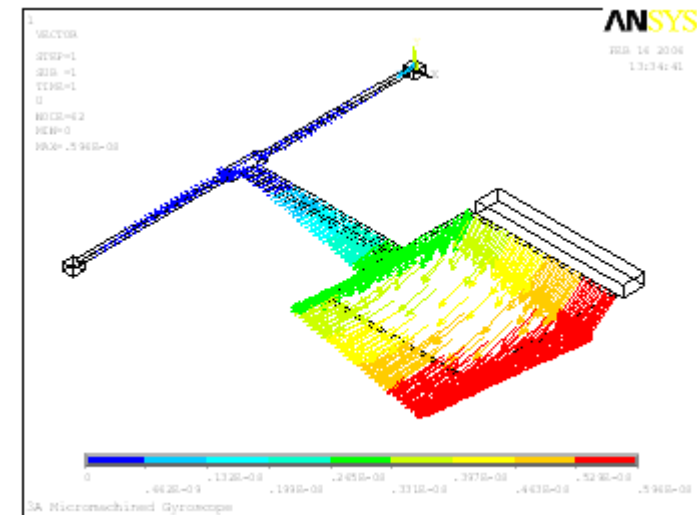


Рис. 23. Результаты решения механической модели при трехмерном электростатическом анализе

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Состав программного комплекса ANSYS.
2. Этапы моделирования элементов МСТ в программе ANSYS.
3. Файлы проекта программы ANSYS.
4. Графический интерфейс пользователя.
5. Особенности выполнения электростатического анализа компонентов микросистемной техники.
6. Процедура задания типа конечного элемента.
7. Процедура задания свойств материала элемента.
8. Построение геометрической модели элементов МСТ.
9. Создание конечно-элементных моделей проекта.
10. Наложение граничных условий на сеточные модели проекта.
11. Просмотр результатов решения с помощью постпроцессора General Postproc.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The ANSYS Multiphysics MEMS Initiative. URL: <http://www.ansys.com>.
2. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство.– М.: Едиториал УРСС, 2003.– 272с.
3. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г.Красковского.– М.: КомпьютерПресс, 2002.– 224с.
4. Малоюков С.П., Лысенко И.Е., Рындин Е.А., Куликова И.В., Шерова Е.В., Приступчик Н.К. Применение программы ANSYS для моделирования компонентов микросистемной техники.– Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.– 149 с.
5. Лысенко И.Е., Куликова И.В., Полищук Е.В., Хайрулина В.А. Моделирование элементов микросистемной техники в программе ANSYS.– Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007.– 42 с.
6. Лысенко И.Е. Методика моделирования элементов МОЭМС с использованием программы ANSYS // Известия ТРТУ. Материалы 50-й НТК ТРТУ. – Таганрог: Издательство ТРТУ, 2004, №8.– С.122-123.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММЕ ANSYS.....	3
2. ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС.....	7
3. ДВУМЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ	9
3.1. Создание электрической модели проекта.....	9
3.2. Создание механической модели проекта.....	17
3.3. Решение связанной задачи электростатического анализа.....	20
3.4. Просмотр результатов электростатического анализа электромеханического микропреобразователя.....	20
4. ТРЕХМЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.....	24
Контрольные вопросы.....	26
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	26

**Лысенко Игорь Евгеньевич
Денисенко Марк Анатольевич
Шерова Елена Викторовна
Приступчик Никита Константинович**

Учебно-методическое пособие

**Моделирование элементов
микросистемной техники
в программе ANSYS
Часть II**

Ответственный за выпуск *Денисенко М.А.*

Редактор

Корректор

ЛР 020565 от 23 июня 1997 г.

Печать офсетная

Формат 60 * 84^{1/16}

Усл. п. л. – 1,77

Заказ N _____

Подписано к печати _____

Бумага офсетная

Уч.- изд. л. – 1,75

Тираж 100 экз.

“С”

Издательство Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44

Типография Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1