Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет»

А. Н. Поляков, И. П. Никитина

ПРИМЕНЕНИЕ САЕ-СИСТЕМ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СТАНКОВ

Учебное пособие

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в состав укрупненной группы направлений подготовки 15.00.00 Машиностроение

Оренбург 2021 УДК 621.9.02:519.87(075.8) ББК 34.5-5-05я73 П 54

Рецензент – профессор, доктор технических наук А. И. Сергеев

Поляков, А. Н.

П 54 Применение САЕ-систем в математическом моделировании станков [Электронный ресурс] : учебное пособие для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в состав укрупненной группы направлений подготовки 15.00.00 Машиностроение / А. Н. Поляков, И. П. Никитина; Мво науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т". -Оренбург : ОГУ. - 2021. - 183 с- Загл. с тит. экрана. ISBN 978-5-7410-2695-3

Данное пособие представляет собой руководство по использованию систем инженерного анализа в практике расчетов элементов несущих систем станков. В пособии изложена последовательность действий, выполняемых пользователем при проведении топологической оптимизации и расчётов элементов несущих систем станков: статического; модального; динамического.

Пособие предназначено для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в подготовки укрупненной направлений 15.00.00 состав группы Машиностроение всех форм обучения, преподавателей, научных работников, аспирантов, инженерно-технических работников, работающих в области машиностроения.

> УДК 621.9.02:519.87(075.8) ББК 34.5-5-05я73

© Поляков А. Н., Никитина И. П., 2021 © ОГУ, 2021

ISBN 978-5-7410-2695-3

Содержание

Введение	5
1 Топологическая оптимизация конструкции «Стойка»	6
1.1 Указания к выполнению индивидуального задания	6
1.2 Создание базовой модели	8
1.3 Расчет упругих перемещений	11
1.4 Расчет топологической оптимизации средствами Siemens NX	12
2 Топологическая оптимизация с использованием решателя «SOL 200»	34
2.1 Указания к выполнению индивидуального задания	34
2.2 Методика топологической оптимизации	36
3 Построение в системе Ansys 3D-модели шпинделя и расчет его статических характеристик	55
3.1 Указания к выполнению индивидуального задания	55
3.2 Формирование геометрической модели шпинделя в системе Ansys	56
3.3 Здание условий закрепления и нагружения модели шпинделяа	65
3.4 Расчет и анализ результатов	75
4 Расчет статических характеристик шпинделя с учетом неидеального стыка в опорах	78
4.1 Указания к выполнению индивидуального задания	78
4.2 Определение статических характеристик шпинделя на основе решения контактной задачи в опорах	80
4.3 Определение статических характеристик шпинделя на упругих опорах	97
5 Расчет контактного взаимодействия полусферы с пластиной	98
5.1 Указания к выполнению индивидуального задания	98
5.2 Общие положения	99
5.3 Построение геометрической модели	100
5.4 Построение сеточной модели	102
5.5 Анализ поверхностей	110
5.6 Создание контактных пар	110
5.7 Закрепление	114
5.8 Нагружение	117
5.9 Решение	118

6 Расчет контактного взаимодействия полусферы с пластиной с использованием	
Ansys workbench	
6.1 Указания к выполнению индивидуального задания 122	•
6.2 Построение геометрической модели 123	,
6.3 Начало работы в Ansys Workbench 125	,
6.4 Создание блока в Ansys Workbench 126)
7 Исследование статических и динамических характеристик несущей системы станка	;
7.1 Указания к выполнению индивидуального задания 145	,
7.2 Построение сеточной модели несущей системы станка 146)
7.3 Создание файла симуляции152)
7.4 Решение и анализ результатов158))
7.5 Модальный расчет159)
7.6 Частотный анализ164	ŀ
Список использованных источников 176)
Приложение А Термины, математическое описание топологической	
оптимизации	, ,
Приложение Б Контактная пара «Frictional»18	2

Введение

Современное машиностроительное производство в XXI веке представляет собой компьютерно-интегрированный машиностроительный комплекс. Все стадии производства ориентированы на использование цифровых технологий, а отдельные прогрессивные производства широко используют технологии искусственного интеллекта.

Сегодня на повестке дня современного машиностроительного производства стоит не 3D-проектирование, а создание и использование цифровых двойников. Для машиностроительных изделий важнейшими критериями работоспособности являются жесткость, виброустойчивость, теплостойкость. Одним из развитых сегодня методов симуляции машиностроительных конструкций являются численные методы, в частности, метод конечных элементов, метод конечных разностей, методы оптимизации. Таким образом, при создании цифрового двойника современной машины необходимы компетенции в области реализации численных методов моделирования.

Сегодня в машиностроительном производстве используется большое многообразие автоматизированных систем, реализующих инженерные компетенции. В данном пособии представлены примеры использования систем – Ansys (вместе с Workbench Ansys) и Siemens NX.

В пособии существенное внимание уделено методики проведения топологической оптимизации. Так как топологическая оптимизация решает задачу оптимального распределения материала в конструкции при заданном нагружении и принятых геометрических, технологических, конструктивных, а также ограничениях. С учётом бурно критериальных развивающихся аддитивных технологий это позволяет её широко применять во всех сложных конструкциях машин для повышения эффективности производства.

1 Топологическая оптимизация конструкции «Стойка»

1.1 Указания к выполнению индивидуального задания

<u>Цель</u>: формирование у обучающихся комплекса знаний, умений и получение навыков выполнения топологической оптимизации с использованием инструментальных средств Siemens NX.

Задачи:

1 Изучить методику проведения топологической оптимизации с использованием инструментальных средств Siemens NX;

2 Создать в Siemens NX базовую модель конструкции для выполнения последующей её топологической оптимизации [1–9];

3 Реализовать процедуру топологической оптимизации с использованием инструментальных средств Siemens NX;

4 Создать на базе результатов топологической оптимизации твердотельную модель.

5 Выполнить проверочный расчет;

6 Оформить отчет.

Ход выполнения работы:

1 Изучить методику проведения топологической оптимизации инструментальными средствами Siemens NX с использованием методических пособий и встроенных в систему инструкций;

2 По согласованию с преподавателем создать в Siemens NX базовую модель конструкции для выполнения последующей её топологической оптимизации (это может быть один из элементов несущей системы проектируемой для выпускной квалификационной работы (ВКР) конструкции);

3 По согласованию с преподавателем выполнить решение одной из двух задач: «SOL101 Линейная статика»; «SOL103 Действительные собственные значения»:

3.1 Создать конечно-элементную модель – файл с расширением «fem»; назначить материал по согласованию с преподавателем;

3.2 Создать новую симуляцию – файл с расширением «sim»; назначить нагрузку и ограничения;

3.3 Получить решение и сохранить его в виде, необходимом для проведения последующего анализа;

4 Провести процедуру топологической оптимизации:

4.1 Выбрать вкладку «Topology Optimization»;

4.2 Вызвать диалоговое окно «Manage Bodies» и назначить необходимые ограничения для оптимизации;

4.3 Назначить материал вызовом одноименного диалогового окна;

4.4 Вызвать «Setup Optimization» для выбора целевой функции оптимизации, назначения геометрических и критериальных ограничений и запуска процедуры оптимизации;

4.5 Сохранить результаты оптимизации;

5 Создать на базе результатов топологической оптимизации твердотельную модель:

5.1 Создать базовый эскиз новой модели, позволяющий создать ограничивающее полученную после топологической оптимизации твердое тело;

5.2 Создать твердотельную базовую модель (либо использовать начальную модель – по согласованию с преподавателем);

5.3 На каждой грани базовой модели, используя результаты топологической оптимизации, создать эскиз новой твердотельной модели;

5.4 Вырезать, сформированные на предыдущем шаге, участки грани;

5.5 Сохранить полученную твердотельную модель для проведения последующего конечно-элементного анализа;

6 По согласованию с преподавателем для обновленной твердотельной модели выполнить решение одной из двух задач: «SOL101 Линейная статика»; «SOL103 Действительные собственные значения»;

7 Провести сравнительный анализ трех моделей: базовой; модели, полученной после топологической оптимизации; обновленной (по согласованию с преподавателем определить необходимость доработки модели);

8 Оформить отчёт.

Содержание отчёта:

1 Базовая модель конструкции (ее описание должно сформировать однозначное представление об особенностях конструкции, для этого в отчёт могут быть включены эскизы);

2 Результаты решения для базовой конструкции одной из двух задач: «SOL101 Линейная статика»; «SOL103 Действительные собственные значения»;

3 Модель конструкции после топологической оптимизации (в отчёт необходимо включить скриншоты отдельных этапов реализации топологической модели), информационное окно результатов оптимизации и контурное представление упругих перемещений для сформированной после оптимизации конструкции;

4 Обновленная модель конструкции;

5 Результаты решения для обновленной конструкции одной из двух задач: «SOL101 Линейная статика»; «SOL103 Действительные собственные значения»;

6 Краткий описательный сравнительный анализ полученных результатов.

1.2 Создание базовой модели

Прежде чем выполнять топологическую оптимизацию (приложение А) конструкции «Стойка» создадим базовую модель.

На первом шаге построения твердотельной модели разработаем базовый эскиз (рисунок 1.1).

На втором шаге используем команду «Вытягивание» с параметром «Расстояние» 2000 мм.



Рисунок 1.1 – Эскиз поперечное сечение

На третьем шаге выполним вырез на 1975 мм по эскизу, представленному на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Эскиз сечения полости

На следующем шаге создадим эскиз для установочных элементов, как представлено на рисунке 1.3. Затем, используя команду «Вытягивание» с

параметром расстояние, равное 30 мм, создадим установочные элементы, которые будем использовать для задания граничных условий. Отверстия в установочных элементах имеют диаметр, равный 20 мм.



Рисунок 1.3 – Построение установочных элементов стойки

Для задания нагрузки создадим на верхней поверхности стойки кронштейны в виде прямоугольных пластин 25х80х80 (длина х толщина х высота) (в мм).

Отверстия также имеют диаметр 20 мм. Итоговая модель представлена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Базовая твердотельная модель «Стойка»

1.3 Расчет упругих перемещений

При создании конечно-элементной модели используем материал сталь «Steel». Закрепление в виде «заделки» выполним по полигональным граням – цилиндрическим отверстиям установочных элементов. Нагрузку также зададим по полигональным граням – отверстиям в верхней части стойки по оси Y, как показано на рисунке 1.5. Величина нагрузки составляет 10000 Н. Масса модели около 1148 кг. На рисунке 1.6 представлены результаты расчета упругих перемещений. На рисунках 1.6 а, б и в – упругие перемещения по осям Х,Ү и Z, соответственно. На рисунке 1.6 г представлены суммарные упругие перемещения. Величина суммарных упругих перемещений не превышает 37 мкм.



Рисунок 1.5 – Расчетная модель

1.4 Расчет топологической оптимизации средствами Siemens NX

Для проведения процедуры топологической оптимизации будем использовать инструменты, доступ к которым осуществляется из вкладки «Topology Optimization» строки главного меню системы (рисунок 1.7).





б) по Ү



Рисунок 1.6 – Контурное представление упругих перемещений



Рисунок 1.7 – Инструментальные средства вкладки «Topology Optimization»

Реализация процедуры топологической оптимизации конструкции включает четыре основных этапа: выбор модели и назначение ограничений; задание цели оптимизации; расчет; анализ результатов оптимизации и построение обновлённой твердотельной модели по результатам топологической оптимизации.

Первые три этапа реализуются с использованием инструментов топологической оптимизации «Topology Optimization». Рассмотрим их более подробно.

1.4.1 Использование инструментов «Topology Optimization»

На первом этапе реализации процедуры топологической оптимизации необходимо выбрать на панели инструментов топологической оптимизации первый блок команд «Manage Bodies», вызов которого приводит к вызову одноименного диалогового окна «Manage Bodies» (рисунок 1.8). Практическое применение команд, представленных в данном диалоговом окне интуитивно понятно. Сделаем несколько акцентов (указание стрелками на рисунке). Используя активный режим команды «Select Bodies» и выделив тело модели в графической области системы, необходимо нажать кнопку «Add To List». Это приведёт к добавлению этого тела в список тел, доступных для проведения топологической оптимизации. Активация режима топологической оптимизации реализуется выбором опции «Design Space» при выделенном имени в столбце списка «Body Name». После выбора этой опции значение параметра в столбце «Design Space» изменяется на «Yes». На рисунке 1.8 а

представлено промежуточное состояние настроек диалогового окна «Manage Bodies», а на рисунке 1.8 б – рабочее состояние настроек диалогового окна «Manage Bodies».



Рисунок 1.8 – Диалоговое окно «Manage Bodies»

В диалоговом окне предусмотрена кнопка «Manage Design Constraints», которая позволяет задать конструктивные ограничения оптимизации (рисунок 1.9 а), которые в целом являются дополнительными. Без их задания процедура оптимизация будет реализована по общим настройкам. Для модели сложной конструкции можно или оставить настройки в исходном виде, или выбрать «Material Spreading» (рисунок 1.9 б).



Рисунок 1.9 – Задание конструктивных ограничений оптимизации

Обязательная настройка задаётся вызовом диалогового окна «Manage Optimization Features». Здесь важно отметить, что в модели отверстия были сформированы с использованием «Features». Если бы построение отверстий осуществлялось командой «Вытягивание», то все настройки данного диалогового окна были бы недоступны. В этом случае необходимо было бы усложнить и использовать отдельные цилиндрические тела, вставленные в отверстия. Четыре отверстия в рассматриваемой конструкции используются в установочных элементах и по ним осуществляется закрепление конструкции (рисунок 1.10 а). Два отверстия нагрузки (рисунок 1.10 б). В первом случае используются для задания дополнительно задаём параметр «Offset Thickness», который фактически определяет минимальную толщину стенки установочного элемента относительно фиксированного цилиндрического отверстия в оптимизированной конструкции.

Для отверстий, используемых для нагружения, не следует задавать ограничений «Туре of Constraint». Но следует задать ограничения по перемещениям. Для этого необходимо активировать опцию «Разрешить» и в поле «Displacement Limit» ввести некоторое значение заведомо большее суммарных упругих перемещений базовой модели, так как любое уменьшение плотности материала конструкции сопровождается уменьшением её жесткости и соответственно ростом упругих перемещений.

Рисунок 1.10 – Диалоговое окно «Manage Optimization Features»

После этого можно перейти к последней настройке в этом диалоговом окне – «Manage Load Cases», позволяющей задать нагрузку. Для этого в списке «Global Load Cases» выбирают (или добавляют) вариант нагружения, а из списка «Элементы» выделяют геометрический элемент, с которым непосредственно связана нагрузка. В блоке «Нагрузки» заполнение полей интуитивно понятно (рисунок 1.11). Для первой силы и первого отверстия выбрано направление «YC»

(рисунок 1.11 а), для второй силы и второго отверстия – направление «-YC» (рисунок 1.11 б).



Рисунок 1.11 – Задание нагрузок с помощью диалогового окна «Manage Load Cases»

Прежде чем перейти к заданию целей оптимизации необходимо выбрать материал модели, так как вместе с геометрическими особенностями конструкции он влияет на массу изделия. Для этого необходимо вызвать диалоговое окно «Назначить материалы» – выделить тело и выбрать материал, например, «Steel».

Задание целей оптимизации реализуется в диалоговом окне «Setup Optimization». Система позволяет использовать три варианта целей: «Minimize strain energy subject to mass target» (Минимизация энергии деформации применительно к массе), «Minimize volume subject to material safety factor» (Минимизация объема в

зависимости от запаса прочности материала), «Maximize natural frequency subject to mass target» (Максимизация собственной частоты применительно к массе). Таким образом, независимо от выбранной цели решением является конструкция с уменьшенной массой, но при различных критериальных ограничениях: или по деформациям, или по прочности, или по собственным частотам.

На рисунке 1.12 приведено диалоговое окно «Setup Optimization». На рисунке 1.12 а приведено базовое состояние настроек. На этом шаге выбирается цель оптимизации, например, «Minimize strain energy subject to mass target». Используя кнопку «Estimate Optimization Parameter» можно упрощенно определить исходную массу модели и с учётом замороженных объемов её минимальную массу. Используя опцию «Manual Override», можно задать целевое значение массы (рисунок 1.12 б). После чего запускается расчет «Run Optimization».



Рисунок 1.12 – Диалоговое окно «Setup Optimization»

Окно «Setup Optimization» в состоянии «Результаты» появляется автоматически с запуском расчета оптимизации. На рисунке 1.13 приведено информационное окно результатов оптимизации по завершению процедуры.

Setup Optimization	ن ک
Параметры Результаты	
Diagram of Convergence	٨
	>
Информация	v
Log	
Max Disp (mm) Max VM Stress (WPd) LC 1 0.226 25.9 LC 2 0.24 25.7 Max 0.24 25.7 Approximate Mass: 448.130972kg (987.958503lb): 60.955235% reduced. Objective: -Compliance minimized Constraint: Volume fraction 39.0448% (Specified as 49.778%) Node Criteria report - maximum displacement on 1 feature named "SIMPLE HC Load case 0: [FAIL] Displacement = 0.226059mm (limit = 0.1mm) Load case 1: [FAIL] Displacement = 0.139738mm (limit = 0.1mm) Load case 0: [FAIL] Displacement = 0.137187mm (limit = 0.1mm) Load case 0: [FAIL] Displacement = 0.137187mm (limit = 0.1mm) Recipe finished in 880.756s.	>LE(13:1A)": DLE(13:2A)":
٢	>
Состояние Finished!	

Рисунок 1.13 – Информационное окно результатов оптимизации

Из него видно, что более 60 % массы тела удалось сократить за счет реализации процедуры оптимизации. При этом максимальные упругие перемещения составили около 240 мкм, при максимально установленных ограничениях оптимизации – 100 мкм.

На рисунке 1.14 представлены результаты топологической оптимизации. На рисунке 1.14 а приведена итоговая оптимизированная модель с настройками графического окна по умолчанию. На рисунке 1.14 б – «Облегчённое тело». На рисунке 1.14 в – суммарные упругие перемещения для облегчённого тела. На рисунке 1.14 г приведены напряжения для облегчённого тела.

Позднее проведенный анализ показал, что есть связь между результатами оптимизации и принятыми критериальными ограничениями как по массе, так и по перемещениям. Существенное влияние на результаты оптимизации оказывает выбранный параметр «Select Global Resolution». Меньшие значения этого параметра приводят к существенному увеличению длительности процедуры оптимизации.



Рисунок 1.14 – Результаты топологической оптимизации

На рисунке 1.15 приведено диалоговое окно «Setup Optimization» с настройками и результат оптимизации при использовании цели «Maximize natural frequency subject to mass target». В качестве критериального ограничения использовано целевое требования массы – 300 кг.

1.16 приведён фрагмент дерева модели при реализации Ha рисунке топологической оптимизации после eë успешного завершения. Об ЭТОМ свидетельствует появление в модели дереве трёх активных элементов «Облегчённое тело «TO DISP EXTRUDE 2 », «Облегчённое тело «TO_EXTRUDE_2_», «Облегчённое тело «TO_STRESS EXTRUDE 2 ».

Setup Optimization	υ×
араметры Результаты	
 Оптимизация	^
Optimization Type	Maximize natural freq 💌
Gelect Global Resolution	^
Fast/Coarse	Slow/Fine
Minimum Geometry Size	100.99579907! mm 👻 👻
_ Manual Override	
Estimate Optimization Paramete	2rs
Design Spaces	^
EXTRUDE(2)	
Параметры оптимизации	
Approximate Design Space Mass	1137.2138 kg
Minimum Mass Target	.93026 kg
Optimization Constraints	^
Mass Target	300 kg • •
Run Optimization	
	ОК Отмена
×.	
a)	

Рисунок 1.15 – Результат оптимизации при использовании цели «Maximize natural frequency subject to mass target»

Навигатор модели			
Имя 🔺	Т	Α.	Комм
<u></u>			
🗄 🗸 🗭 Камеры			
ін. [_] Группы			/
🕂 🗁 Геометрия без временной		/	/
•••••••••••••••••••••••••••••••••••			
@ ФОблегченное тело "			
• Облегченное тело "			
🖃 🗁 История модели		\checkmark	
		\checkmark	
Ф Эскиз (1) "SKETCH_00		\checkmark	
💿 😭 Вытягивание (2)		\checkmark	
		\checkmark	
••• (5)		\checkmark	
Простое отверстие	B	\checkmark	

Рисунок 1.16 – Фрагмент дерева модели после завершения топологической

оптимизации

1.4.2 Доработка модели и ее проверка

После проведения топологической оптимизации необходимо модель адаптировать для проверки упругих или иных свойств с использованием конечноэлементного решателя типа «Sol 101 Линейная статика – Общие ограничения» («SOL 101 Linear Statics - Global Constraints») или «SOL 103 Действительные («Real Eigenvalues»). Siemens NX собственные значения» предлагает инструментарий работы с фасетными телами, сформированными после процедуры топологической оптимизации (рисунок 1.17).

Необходимо отметить два важнейших недостатка фасетных моделей: их сложная конфигурация, существенно отличающаяся от типовых геометрических фигур; невозможность непосредственного их использования в создании конечноэлементных моделей.



Рисунок 1.17 – Панель инструментальных средств для фасетного моделирования

Сложность конфигурации фасетной модели заключается не столько в наличии большого числа полостей, но в образовании локальных геометрических дефектов: рисок, зарезов, подрезов, вмятин, рубцов, трещин, заусенец, бороздок, бугорков, выступов, насечек, зажимов, закатов, рябизны и т.д. (рисунок 1.18).







Рисунок 1.18 – Примеры дефектов поверхности моделей, сформированных после топологической оптимизации

Применение инструментальных средств для фасетного моделирования не позволяет полностью исключить все дефекты поверхности. Поэтому, следуя общей практике проектирования, рекомендованной специалистами Siemens PLM Software, предпочтительным и наиболее эффективным является способ интуитивного реконструирования (воссоздания) модели. Для этого предлагается выполнить три этапа. На первом этапе, используя инструмент «Фасетное моделирование» (панель

«Фасетное моделирование»), преобразуем фасетное тело в конвергентное тело. В режиме фасетного моделирования (рисунок 1.19) доступны все инструментальные средства, представленные на панели. Появление клетчатого флага на панели фасетного моделирования указывает на активный режим фасетного моделирования. В этом режиме необходимо удалить наиболее грубые дефекты поверхности. Рекомендуемой последовательностью используемых операций может быть: «Обрезка», «Зашивка отверстий» и «Сглаженный». В конце можно использовать «Дообработка фасетного тела», что позволит установить отсутствие или наличие ошибок в геометрии.



Рисунок 1.19 – Панель «Фасетное моделирование»

Выбор операции «Обрезка» (однократное нажатие левой клавиши мыши) приводит к вызову диалогового окна «Отрезка фасетного тела» (рисунок 1.20 а). Выбрав из списка команд «Обрезать по области», а из списка ограничений «Удалить выбранный», «Области» получим результат поверхности, представленный на рисунке 1.20 б. Вызов следующей команды «Зашивка отверстий» приводит к вызову одноименного диалогового окна (рисунок 1.21 a). Его применение интуитивно понятно – выбирается тело и указываются кромки образовавшихся после обрезки дефектов поверхности отверстий. Результат зашивки отверстий представлен на рисунке 1.21 б. После этого можно использовать операцию сглаживания поверхности (рисунок 1.22 а). Для этого на панели фасетного моделирования выбирается операция «Сглаженный», что приводит к вызову диалогового окна «Сглаживание фасетного тела» (рисунок 1.22 a). Результат сглаживания поверхностей представлен на рисунке 1.22 б.



a)

б)





a)

Рисунок 1.21 – Реализация операции «Зашивка отверстий»



Рисунок 1.22 – Процедура сглаживания поверхностей

Принципиальным отличием конвергентного тела от фасетного, является возможность его использования в дальнейшем геометрическом моделировании. Сформированное конвергентное тело – полое. Чтобы заполнить полость выполняется второй этап реконструкции модели. На этом этапе выполняется операция пересечения двух тел. В качестве первого используется конвергентное тело, а в качестве второго используется призма (рисунок 1.23). В таком виде модель уже можно использовать для дальнейшего геометрического моделирования и симуляции (конечно-элементного моделирования). Однако, как правило, из-за дефектов поверхности конечно-элементную модель построить не удаётся. Поэтому необходимо перейти к третьему этапу.

Сечение	^	
🗸 Выбрать кривую (4) 🔀 🙋	
Задать начальную кри	івую	
Направление	^	
🗸 Задать вектор	×	
Ограничения	^	
Начало	🗑 Значение 🔹	
Расстояние	-5 mm 🔻	
Конец	🗑 Значение 🔹	
Расстояние	2100 mm 🔻	
🗌 Объем из открыто	го контура	
Логическое	^	
Булевы операции	🔞 Пересечение 🛛 🔻	
🗸 Выберите тело (1)		
Черновое	v	
Смещение	v	
Настройки	^	
Тип тела	Тело 🔻	
Допуск	0.0100	
🗹 Просмотр	Показать результат 🔎	
< ОК > Пр	именить Отмена	

Рисунок 1.23 – Создание твердотельного тела

Третий этап моделирования. Наиболее простой путь реконструкции модели – это перестроение модели на основе базовой модели путем использования

инструментов для твердотельного моделирования. При этом эскизы обновлённой модели формируются простейшим повторением наложенных эскизов оптимизированной модели. Для этого создается охватывающая модель, поглощающая сформированную в результате оптимизации тело. Базовый эскиз для такой модели представлен на рисунке 1.24. На рисунке 1.25 представлены базовая (рисунок 1.25 а) и каркасная модели оптимизированной конструкции (рисунок 1.25 б). Последняя используется в качестве макета (шаблона) при создании отдельных эскизов на соответствующих плоскостях базовой модели.



Рисунок 1.24 – Базовый эскиз для новой модели

При построении сечений сложного профиля используется закраска граней в режиме «Статический каркасный» и инструмент построения эскиза «Сплайн студии». Пример результата использования этого инструмента приведен на рисунке 1.26. После построения эскиза на выделенной поверхности модели выполняется операция «Вытягивания» вдоль нормальной оси с использованием булевой операции «Вычитание» и назначением соответствующих геометрических ограничений. Итоговая твердотельная модель представлена на рисунке 1.27 а.



Рисунок 1.25 – Базовая и каркасная модели оптимизированной модели



Рисунок 1.26 – Эскиз одной из полостей в боковой стенке модели





а) 3D-модель
б) Расчетная модель
Рисунок 1.27 – 3D и расчетная модели стойки

После построения твердотельной модели следует перейти к решению той задачи, которая использовалась при оптимизации: или задача статики с решателем SOL 101, или задача нахождения действительных собственных значений с решателем SOL103. Для этого необходимо выполнить следующие этапы построения модели: построение конечно-элементной модели; создание новой симуляции с назначением нагрузки и ограничений; решение; анализ результатов решения. На рисунке 1.27 б представлена расчетная модель, сформированная на этапе симуляции модели. На рисунке 1.28 представлены результаты решения задачи статики в виде контурного представления перемещений по осям X, Y и Z (рисунки 1.28 а, 1.28 б, 1.28 в). На рисунке 1.28 г представлен контурный график суммарных перемещений. Его необходимо сопоставить с результатами решения задачи топологической оптимизации.



Рисунок 1.28 – Результаты расчета

Проверочный расчет показал, что суммарные перемещения составили около 84 мкм. При этом масса конструкции составила около 660 кг. Добавим, что при построении обновленной модели её стенки были увеличены до 30 мм (в базовой модели они составляли 25 мм). Дополнительная доработка конструкции привела к снижению ее массы. При доработки использовались две операции: уменьшение толщины стенок и введение скруглений ребер. Было реализовано два варианта доработки модели. При реализации первого варианта это позволило получить массу конструкции около 603 кг, а для второго (при уменьшении стенок до 25 мм) – около 535 кг (рисунок 1.29). Первый вариант доработки конструкции не привёл к снижению жёсткости. Во втором варианте упругие перемещения выросли почти до 105 мкм (рисунок 1.30). Таким образом, имея некий вариант конструкции после топологической оптимизации можно с меньшими вычислительными затратами и достоверно получать более совершенную конструкцию. На сегодняшний день используемые алгоритмы топологической оптимизации не позволяют однозначно создать совершенную конструкцию, но позволяют определить направление совершенствования конструкции с позиций её топологии.





Рисунок 1.29 – Доработанные варианты твердотельной модели



Рисунок 1.30 – Контурное представление упругих перемещений для доработанной модели

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключается идея топологической оптимизации?
- 2 Перечислите основные этапы проведения топологической оптимизации.
- 3 Что означает конвергентная модель?
- 4 Назначение конвергентной модели.
- 5 Расскажите о назначении операции «Обрезка».
- 6 Расскажите о назначении операции «Зашивка отверстий».
- 7 Расскажите о назначении инструмента «Сглаженный».
- 8 Расскажите о назначении инструмента «Сплайн студии».
- 9 Перечислите недостатки фасетных моделей.

10 Назовите основные дефекты поверхности, которые наблюдаются у фасетных моделей после топологической оптимизации.

11 Как проводится оценка эффективности топологической оптимизации?

2 Топологическая оптимизация с использованием решателя «SOL 200»

2.1 Указания к выполнению индивидуального задания

<u>Цель</u>: формирование у обучающихся комплекса знаний, умений и получение навыков выполнения топологической оптимизации с использованием решателя «SOL 200 Топологическая оптимизация».

<u>Задачи</u>:

1 Изучить методику проведения топологической оптимизации с использованием решателя «SOL 200 Топологическая оптимизация».

2 Создать в Siemens NX базовую модель конструкции или использовать ранее созданную для выполнения последующей топологической оптимизации;

3 Реализовать процедуру топологической оптимизации с использованием решателя «SOL 200 Топологическая оптимизация»;

4 Выполнить проверочный расчет;

5 Выполнить оценку массу оптимизированной модели;

6 Оформить отчет.

Ход выполнения работы:

1 Изучить методику проведения топологической оптимизации при помощи решателя «SOL 200 Топологическая оптимизация» с использованием методических пособий и встроенных в систему инструкций;

2 По согласованию с преподавателем создать в Siemens NX базовую модель конструкции или использовать ранее созданную для выполнения топологической оптимизации;

3 По согласованию с преподавателем выполнить решение задачи линейной статики с использованием решателя «SOL101 Линейная статика»:

3.1 Создать конечно-элементную модель – файл с расширением «fem»; назначить материал по согласованию с преподавателем;

3.2 Создать новую симуляцию – файл с расширением «sim»; назначить нагрузку и ограничения;

3.3 Получить решение и сохранить его в виде, необходимом для проведения последующего анализа;

4 Провести процедуру топологической оптимизации:

4.1 Создать новое решение с использованием решателя «SOL 200 Топологическая оптимизация» с заданием типовых настроек;

4.2 Задать «Цель проектирования»;

4.3 Задать «Область оптимизации»;

4.4 Задать «Замороженную область»;

4.5 Назначить общие ограничения «Design Constraint» для решения;

4.6 Назначить «Технологическое ограничение»;

4.7 Назначить ограничения «Design Constraint» для подслучая «Nastopt – Statics 1»;

4.8 Решить и перейти к постпроцессору:

4.8.1 Выполнить анализ плотности материала в оптимизированной модели, при необходимости, по согласованию с преподавателем скорректировать параметры оптимизации;

4.8.2 Создать копию итогового решения;

5 Создать на базе результатов топологической оптимизации новую симуляцию для оценки массы твердотельной модели;

6 Оформить отчёт.

Содержание отчёта:

1 Базовая модель конструкции (ее описание должно сформировать однозначное представление об особенностях конструкции, для этого в отчёт могут быть включены эскизы);

2 Результаты решения задачи линейной статики для базовой конструкции;

3 Модель конструкции после топологической оптимизации: модели с учётом различной плотности материала (минимум два варианта) и контурное представление упругих перемещений для сформированной после оптимизации конструкции;

4 Результаты копии решения топологической оптимизации в виде контурных графиков упругих перемещений;

5 Файл свойств твердого тела оптимизированной модели с указанием массы модели;

6 Краткий описательный сравнительный анализ полученных результатов.

2.2 Методика топологической оптимизации

Другим инструментом проведения топологической оптимизации является использование решателя «SOL 200 Оптимизация топологии».

Прежде чем производить оптимизацию топологии необходимо выполнить соответствующий расчет для базовой модели (рисунок 2.1). Если топологическая оптимизация базируется на использовании результатов решения задачи статики для конструкции, то необходимо для базовой модели создать соответствующую расчетную модель (рисунок 2.1 а) и выполнить расчет «SOL 101 Линейная статика». На рисунке 2.1 б приведено контурное представление суммарных упругих перемещений модели, а на рисунках 2.1 в и 2.1 г – упругие перемещения вдоль осей X и Y, соответственно. Для чего выполняется этот расчет. В идеале аналогичный расчет для оптимизированной модели должен сформировать или близкие результаты или результаты, отвечающие критериальным ограничениям. Таким образом, максимальные суммарные упругие перемещения для базовой модели составили около 32 мкм, вдоль оси X – около 11 мкм, вдоль оси Y – около 30 мкм.


0.0324

0.0297

0.0270

0.0243

0.0216

0.0189

0.0162

0.0135

0.0108

0.0081

0.0054

0.0027

0.0000

[mm]



XC

г) перемещения по Ү

Рисунок 2.1 – Базовая расчетная модель и результаты расчета

После выполнения расчета для базовой модели можно либо перейти к созданию новой симуляции для базовой конечно-элементной модели либо создать новое решение для этой же симуляции. Второй вариант является предпочтительным. При создании нового решения для текущей симуляции – нажатие правой клавиши мыши на имени симуляции в дереве навигатора симуляции вызывает контекстное меню, в котором следует выбрать пункт «Новое решение...», что приводит к появлению диалогового окна «Решение», в котором для настройки «Тип решения» из имеющегося списка типов следует выбрать «SOL 200 Оптимизация топологии» (рисунок 2.2).

🗘 Решение			ບ x	
Решение			^	
Имя	Solution 2			
Решатель	Simcenter Nastran			
Тип анализа	Структурный			
2D тело	Нет			
Тип решения	SOL 200 Оптимизация топологии			
SOL 200 Опт	имизация тополо	гии	Просмотр	
ј Общий		Параметры оптимизации	^	
- Управлен	ие файлами	Параметры оптимизации топологии (DOPTPRM)	Her 🗸 🆓 🔻	
— Управлен — Настройк	ие выполнением	Максимальное число циклов проектирования (DESMAX)	50	
Массив да	анных	Штрафной закон (DMRLAW)	RAMP	
		Штрафное значение RAMP	5	
		Параметр восстановления (NASPRT)	Начальные и все улучшенные	
		Параметры (PARAM)	^	
		Параметры	Нет 🗸 🚰 🔻	
		Коэффициент жесткости Rz плоской оболочки (K6ROT)	100 -	
		Наборы DOF	v	
		Параметры связи CWELD/CFAST	Нет 🗸 🖓 🔻	
		Пользовательский текст	Her 🔻 🦓 🔻	
			ОК Применить Отмена	



топологии»

В диалоговом окне в основном все настроечные параметры можно оставить без изменения, кроме «Максимальное число циклов проектирования (DESMAX)». Рекомендуется установить значение этого параметра не менее 50 (это значение более точно определяется из опыта симуляции для конкретной модели). Для проведения более подробного анализа решений топологической оптимизации также рекомендуется для параметра «Параметр восстановления (NASPRT)» выбрать из списка вариант «Начальные и улучшенные». После нажатия кнопки «OK» автоматически вызывается следующее диалоговое окно «Шаг решения» (рисунок 2.3).

🏟 Шаг решения				υX	
Решение				^	
Имя	Nastopt - Statics 1				
Тип решателя	Simcenter Nastran				
Тип анализа	Структурный				
Решение	SOL 200 Оптимизаци	я топологии			
Шаг	Nastopt - статика			•	
Шаги для создания	Nastopt - статика Nastopt - нормальны	Nastopt - статика Nastopt - нормальные моды			
Свойства	Nastopt - частота Nastopt - модальная	Nastopt - частота Nastopt - модальная частота			
Описание	Nastopt - Устойчивос	Nastopt - Устойчивость			
🗹 Использовать имя ша	га как метку				
Метка					
Запросы вывода		Нет		- 🖓 -	
Параметры управления случаем (PARAM)		Нет		- 🖓 -	
Пользовательский текст управления расчетом		Нет		- 🐴 -	
Сила предварительно	й нагрузки			^	
Тип предварительной на	грузки	Нет		•	
Переменные проверк	и граничных условий			V	
			ОК	Отмена	

Рисунок 2.3 – Диалоговое меню подслучая «Шаг решения»

Обычно его в Siemens NX именуют как подслучай (Subcase). Этот подслучай позволяет выбрать решатель, используемый на каждой итерации оптимизации. На рисунке 2.3 представлены все возможные для использования варианты решателя. В рассматриваемом примере используем «Nastopt – статика». После нажатия кнопки

«ОК» в дереве навигатора симуляции для нового решения появляются новые компоненты: «Цель проектирования»; «Взвешенная площадь»; «Ограничение для элемента проектирования»; «Технологическое ограничение» (рисунок 2.4). Для нового подслучая «Nastopt – Statics 1» дерево модели также содержит элементы: «Цель проектирования» и «Ограничение для элемента проектирования».

່= 🚛 Solution 2	Активно	
🛛 🗹 🛤 Температуры		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
- 🏹 Цель проектиро		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
- 🔯 Взвешенная пл		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
- 🏷 Ограничение дл		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
- 🍓 Технологическо		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
🗏 🖶 Nastopt - Statics 1	Активно	
		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
- 🗸 🖈 Нагрузки		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
🎼 Цель проект		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
🛛 🍪 Ограничени		(Фильтр : Выкл)(Сортиро

Рисунок 2.4 – Фрагмент навигатора симуляции

После выбора в диалоговом окне «Шаг решения» для параметра «Шаг» тип «Nastopt – нормальные моды» (рисунок 2.5 а) появляется новая настройка «Метод собственных значений». Из списка настроек следует выбрать «Ланцош». После этого следует сделать дополнительную настройку решателя. Для настройки «Данные Ланцоша» выбрать пиктограмму с изображением рожкового ключа – это приведёт к вызову нового диалогового окна (рисунок 2.5 б), в котором следует задать параметры для диапазона анализируемых частот колебаний.

Далее рассмотрим настройки для топологической оптимизации (рисунок 2.4). После выделения «Цель проектирования» в дереве модели для решения «Solution 2» нажатие правой клавиши мыши позволяет вызвать одноименное диалоговое окно (рисунок 2.6), в котором необходимо задать две настройки. Для «Тип реакции» из списка типов выбираем «Общий вес модели (WEIGHT)», а для настройки «Метод оптимизации» из списка методов выбираем «MIN».

Шаг решения			υ×	
Решение			^	
Имя	Nastopt - Normal Mod	les 1		
Тип решателя	Simcenter Nastran	Simcenter Nastran		
Тип анализа	Структурный			
Решение	SOL 200 Оптимизация	топологии		
Шаг	Nastopt - нормальные	е моды	•	
Шаги для создания	1			
Свойства			^	
Описание			[₽	
🗹 Использовать имя шага к	ак метку			
Метка				
Запросы вывода		Нет	e	
Метод собственных значени	й	Ланцош	•	
🗸 Данные Ланцоша		Real Eigenvalue - Lanczos1 🗸	12 🐴 🔻	
Параметры управления случаем (PARAM)		Нет 🗸	🆓 🔻	
Пользовательский текст управления расчетом		Нет 🗸	A A A A	
Переменные проверки гр	оаничных условий		v	
		ОК	Отмена	

a)

• Вещественное собственное значение	– Ланцош	υx
Объект моделирования		^
Имя	Real Eigenva	ilue - Lanczos1
Метка	3	
Свойства		٨
Описание		[∂
Имя карты	EIGRL	
Параметры для частот		^
Диапазон частот - Нижний предел	0	Hz 🔹 💌
Диапазон частот - Верхний предел	1000	Hz 🔹 💌
Требуемое число форм	2þ	
Извлечение данных		v
	ОК	Отмена
б)		

Рисунок 2.5 – Диалоговые окна для настройки шага решения с именем «Nastopt – Normal Modes 1»

🗘 Цель проектирования - Гло	обальная	υ×
Объект моделирования		۸
Имя		Design Objective - Global1
Метка		4
Свойства		^
Описание		
Определение реакции		^
Метод задания	~	Стандарт 🔹
Метка отклика		RESP0001
Тип реакции		Общий вес модели () 🔻
Метод оптимизации	*	MIN 👻
Имя карты		DESOBJ/DRESP1
	ОК Пр	именить Отмена

Рисунок 2.6 – Диалоговое окно выбора цели проектирования

После нажатия «ОК» в дереве модели у элемента «Цель проектирования» появляется вложенный структурный элемент «Design Objective – Global1», указывающий на задание целевой функции.

Аналогичными действиями можно вызвать диалоговое окно «Взвешенная площадь». Настройки данного окна позволяют задать две области: «Область оптимизации» и «Замороженная область». На рисунке 2.7 а показан выбор области оптимизации. Для этого в диалоговом окне «Взвешенная площадь» для настройки «Тип области» выбирается тип «Область оптимизации», для настройки «Метод выбора элемента» – «Заданные элементы». Задание области оптимизации модели выбирается мышью (подсвеченная область модели). Чтобы активировать сделанные настройки обязательно следует ввести числовую метку в разделе настроек «Свойства». После нажатия кнопки «ОК» в дереве модели появляется вложенный структурный элемент «Design Area2» (имя элемента принято системой по умолчанию – его можно менять).

Алгоритм топологической оптимизации требует указания поверхностей, которые не подвергаются топологической модификации. Для этого назначаются поверхности, например, используемые в качестве конструкторских или технологических баз. Порядок выбора этих поверхностей и задание соответствующих опций для диалогового окна «Взвешенная площадь» аналогичен описанному выше. Отличие только заключается в задании другого типа области в группе настроек «Свойства» диалогового окна: «Замороженная область» (рисунок 2.8).

Взвешенная плог	цадь	υx
бъект моделирова	ания	^
мя	Design Area2	
етка	6	
войства		^
писание		[♪
п области	Область оптимизации	•
етка	20	
етод выбор элемент	а Заданные элементы	•
Зыбор элементов		^
🗌 Ссылка на группу	y	
🗸 Выбрать элемент	ты (8354)	\
Исключенный		Y
мя карты	DVTREL1	
	ОК От	мена



Рисунок 2.7 – Задание «Области оптимизации»



Рисунок 2.8 – Задание «Замороженной области»

Следующим шагом в задании настроек для топологической оптимизации является задание критериальных ограничений для оптимизируемой массы изделия. Для этого следует в дереве модели выделить элемент «Ограничение элемента проектирования» и после нажатия правой клавиши мыши создать новое ограничение, вызовом диалогового окна «Ограничение элемента проектирования – Общие» (рисунок 2.9). В качестве знаковых настроек следует учесть: «Метод задания», «Тип реакции» и блок «Ограничения» с указанием фиксированных значений для параметров «Нижний» и «Верхний».

Ограничение элемента	а проектирования - Об 🛛 🕽
Объект моделирования	~
Имя	Design Constraint - Global1
Метка	8
Свойства	~
Описание	
Определение реакции	
Метод зад	Стандарт
Метка отклика	RESPOSE
Тип реакции	Общий вес модели WEIGH 🔻
Ограничения	^
Нижний	25 kg • •
Верхний	30 kg 🔹 🗸
Имя карты	DCONSTR/DRESP1
ОК	Применить Отмена

Рисунок 2.9 – Задание «Ограничение элемента проектирования – Общие»

Необязательной настройкой «Технологическое оптимизации является ограничение». На рисунке 2.10 приведено диалоговое окно для этой настройки. Из возможных вариантов опции «Тип ограничения» использован тип «Направление формы отливки» (дополнительно предусмотрено еще семь типов: «Плоскостная «Циклическая симметрия», «Максимальный размер симметрия», элемента», «Минимальный размер элемента, «Управление шахматной панелью», «Вытягивание», «Аддитивное производство»). После выбора ЭТОГО типа

технологического ограничения появляются дополнительные настройки: «Точка на плоскости отливки», «Вектор по нормали к плоскости отливки», «Вектор направления для удаления матрицы» (рисунок 2.10).

Технологическое ограничение	ა x
Объект моделирования	^
Имя	Manufacturing Constrair
Метка	9
Свойства	^
Описание	L.
Имя карты	DMNCON
Тип ограничения	Направление формы 🔻
🗸 Точка на плоскости отливки	<u>,</u> 7.
Вектор по нормали к плоскости отливки	٨
🗸 Задать вектор	
Вектор направления для удаления матрицы	٨
🗸 Задать вектор	X 🚛 XC 🗸
П Использовать второе направление отливки	
	ОК Отмена

Рисунок 2.10 – Диалоговое окно «Технологическое ограничение»

Для завершения настроек оптимизации необходимо ввести ограничения для подслучая «Nastopt – Statics 1». Стрелочные указатели показывают изменённые настройки окна (рисунок 2.11).

На рисунке 2.12 приведен итоговый вариант дерева модели для навигатора симуляции после включения всех настроек для топологической оптимизации.

После выполнения расчета необходимо перейти к навигатору постпроцессора и в дереве модели для результатов решения «Solution 2» выделить элемент «Structural» (рисунок 2.13) и нажатием правой клавиши мыши вызвать из контекстного меню команду «Результаты плотности материалов». Вызов этой команды приводит к вызову диалогового окна «Отобразить/экспорт плотности материала» и автоматическому выводу на экран итоговой модели.

Ограничение элемента проектиров	ания - Статика 🛛 🕄
Объект моделирования	
Имя	Design Constraint - Statics1
Метка	10
Свойства	
Описание	۵۵ المان
Определение реакции	٨
Метка отклика	RESP0003
Тип реакции	Перемещение (DISP) -
Тип компонента	Поступательный 🗸
DOF1	- But -
DOF2	Brog
DOF3	Вкл
Выбор узлов	^
🗌 Ссылка на группу	
🗸 Выбрать узел (2)	···
Исключенный	· · · ·
Ограничения	
Нижний	0.01 mm • •
Верхний	0.1 mm
Лмя карты	DCONSTR/DRESP1
	ОК Отмена

Рисунок 2.11 – Диалоговое окно «Ограничение элемента проектирования - Статика»

່ອ. ເຊຍ Solution 2	Активно	
🚽 🖈 Температуры		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
🖃 🏹 Цель проектиро		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
🔤 🔐 Design Objec		
🖃 🔯 Взвешенная пл		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
📆 Design Area2		
🔤 🚰 Design Area4		
🖃 🏷 Ограничение дл		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
🚰 Design Const		
🖃 🍓 Технологическо		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
🔐 Manufacturi		
🖃 🖶 Nastopt - Statics 1	Активно	
		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
- 🖌 🛤 Нагрузки		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
🎼 Цель проект		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
🖃 🏷 Ограничени		(Фильтр : Выкл)(Сортиро
📆 Design C		

Рисунок 2.12 – Фрагмент дерева модели для навигатора симуляции, итоговый

вариант

🥵 sim2_stoika		
□- 🗁 Solution 1	Simcenter Nastran, Simcenter Nast	
🗞 🏭 Structural		
E- C Solution 2	 Simcenter Nastran, Simcenter Nast	
🗄 🗞 🚱 Structural		
• Независимые результа		

Рисунок 2.13 – Фрагмент дерева модели для навигатора постпроцессора

Использование элемента управления – слайдер – для установления фиксированного значения для настройки «Область тела» позволяет увидеть соответствующий результат топологической оптимизации. Большее значение (предельное значение «1») соответствует меньшей плотности материала модели или большему проценту удаленного материала. Чем меньше размер сетки, тем лучше согласуются изменения модели с изменением положения слайдера.

На рисунке 2.14 представлены два варианта представления результатов упругих перемещений – после 9-го цикла проектирования (рисунок 2.14 а) и после 50-го цикла проектирования (рисунок 2.14 б).

Завершающим этапом топологической оптимизации с использованием решателя (Sol 200) является контрольный расчет оптимизированной конструкции.

Как ранее отмечалось результат топологической оптимизации должен быть использован на последующих этапах проектирования оптимизируемой конструкции. Одним из достаточно простых способов реализации результатов топологической оптимизации в оптимизируемой конструкции является использование способа интуитивного модифицирования геометрии. Например, если на некоторой поверхности детали после топологической оптимизации сформирована полость в виде паза, то в оптимизируемой конструкции полость такой конфигурации должна быть сформирована. Однако при проектировании важно оперативно оценить эффективность выполненной топологической оптимизации без дополнительных построений, предполагаемых интуитивным модифицированием геометрии.



Рисунок 2.14 – Контурное представление упругих деформация

В системе предусмотрен инструмент создания копии решения в текущей симуляции в виде кнопки «Создать» диалогового окна «Отобразить/экспорт плотности материала» (рисунок 2.15). После нажатия этой кнопки в дереве модели появится новое решение с именем по умолчанию «Copy of Solution 2» (если бы имя для решения задачи топологической оптимизации было иное, например, «Solution 3», то и новое решение имело бы соответствующее имя – «Copy of Solution 3»). В дереве модели имя по умолчанию было переименовано «Control of Solution 2». Так как это решение является полной копией решения для топологической оптимизации, то необходимо отредактировать настройки решения. Во-первых, в зависимости от положения слайдера диалогового окна «Отобразить/экспорт плотности материала» будет установлен уровень плотности материала модели.



Рисунок 2.15 – Диалоговое окно плотности материала модели и оптимизированная модель

Во-вторых необходимо для параметра «DESMAX – Максимальное число циклов проектирования» (рисунок 2.2) установить число «0». После выполнения решения можно реально оценить результат топологической оптимизации (рисунок 2.16). Анализ контурного представления упругих перемещений показывает, что максимальные перемещения составили 443 мкм. Но при этом информация о массе сформированной модели отсутствует. Для этого рекомендуется создать новый проект решения без использования модели с расширением «prt» (рисунок 2.17). Для вызова диалогового окна «Новый» используем вызов команды: «Файл/Создать». Из всех доступных для создания файлов приложений используем «Симуляция» для типа «КЭ модель». После нажатия кнопки «ОК» появится новое диалоговое окно «Новая КЭ модель» (рисунок 2.18). Завершением формирования нового fem-файла является нажатие кнопки «ОК» этого диалогового окна.



Рисунок 2.16 – Результат проверочного решения для выбранного уровня плотности

материала

Обработка Многоосевые		евые инструмен	вые инструменты смещения		Проверка Концепт		туальная разработка мехатронных систем	
Общее расположение корабля		Лин	ия пресс-формы Проектирова		ние линий	Структурные элементы корабля		
Модель DML	Чертеж	Компонс	овка Си	муляция	Аддитивное пр	оизводство	Управление производственными линиям	
Јаблоны						^	Просмотр	
Фильтры						^		
Зависимость Отдель	ная деталь	•		E	иницы Миллимет	тры 🔻	En. 1	
			1-	-		F	EWI	
Имя		Тип	Единицы	Зависимо	сть Владеле	4		
Sincenter Nastran		кэ модель	Миллим	Автономн		^		
Simcenter Nastran	courtic	Симуляция	Миллим	Автономн		0		
Simcenter Nastran A	coustic	Симиление	Миллим	Автономн		0		
Sincenter Nastran A	ibro-Acoustic	КЭмолель	Миллит.	Автономн		0		
Simcenter Nastran V	ibro-Acoustic	Симуляция	Миллим	Автономн		0		
Simcenter Samcef	ere neodste	КЭ модель	Миллим	Автономн	ый NTAUTH	0	Свойства	
Simcenter Samcef		Симуляция	Миллим	Автономн	ый NTAUTH	0	Mun Simontor Nactran	
Simcenter 3D Therm	al/Flow	КЭ модель	Миллим	Автономн	ый NTAUTH	0		
- Simcenter 3D Therm	al/Flow	Симуляция	Миллим	Автономн	ый NTAUTH	0	Гина Ко модель	
Simcenter 3D Тепло	зой анализ эле	КЭ модель	Миллим	Автономн	ый NTAUTH	0	сдиницы: миллиметры	
🖉 Simcenter 3D Тепло	зой анализ эле	Симуляция	Миллим	Автономн	ый NTAUTH	0	Opusaujuo Dveroŭ Simeontor Nationa Facilita	
Simcenter 3D Space	Systems Thermal	КЭ модель	Миллим	Автономн	ый NTAUTH	0	Onicative: Hycrov Simcenter Nastran Fem	
🕑 Simcenter 3D Space	Systems Thermal	Симуляция	Миллим	Автономн	ый NTAUTH	0		
S Cimcontor 2D Multin	hurier	N3	Manager	Antoniotur		• •		
овое имя файла							-	
мя <mark>fem5.fem</mark>								
апка D:\polvak h\I F	KCII\matmod\				FÅ			
еталь для ссылки								
1 _M g			ъà					
11/12/								

Рисунок 2.17 – Диалоговое окно «Новый»

🚯 Новая КЭ модель	υ×
Имя КЭ модели	^
fem5.fem	
Деталь CAD	^
🗌 Связать с мастер-детал	лью
Среда решателя	^
Решатель	Simcenter Nastran 🔹
Тип анализа	Структурный 🔻
2D тело	Нет 💌
Циклосимметричная ци	иллиндрическая СК по умолчанию
🗌 Использовать цикли	ческую СК, если задана
Задать СК	
Преобразование сетки	^
🗌 Сохранить данные пре	еобразования полностью
Описание	^
	ОК Отмена

Рисунок 2.18 – Диалоговое окно «Новая КЭ модель»

После того как в дереве модели появится новое имя fem-файла можно создать новую симуляцию, но с учётом импортирования ранее сформированного результата симуляции для оптимизированной модели. Для этого переходим к команде импорта симуляции: «Файл/Импорт/Симуляция...» (рисунок 2.19). После вызова команды «Симуляция...» появится контекстное меню «Импорт», в котором следует выбрать первую позицию (рисунок 2.20). После нажатия кнопки «ОК» вызывается диалоговое окно «Импорт симуляции» (рисунок 2.21). Выбирая сформированное ранее имя данных с расширением «dat» и нажимая кнопку «OK», вызовем диалоговое окно «Новая КЭ модель и симуляция» (рисунок 2.22). Нажатие кнопки «OK» приводит к завершению операции импорта данных и выводу в рабочее поле системы оптимизированной модели (рисунок 2.23).



Рисунок 2.19 – Контекстное меню для создания новой симуляции

Ф Импорт 🛛 🗙
Выберите решатель
Simcenter Nastran
Simcenter Samcef
Simcenter 3D Thermal/Flow
Simcenter 3D Space Systems Thermal
Simcenter 3D Electronic Systems Cooling
Simcenter 3D Multiphysics
MSC Nastran
ANSYS
Abaqus
LS-DYNA
Ideas Unv
ОК Отмена

Рисунок 2.20 – Контекстное меню «Импорт»

🗘 Импорт симуляции	×
Решатель NX Nastran	
Форма	Общий 🔻
Единицы входного файла	
Система единиц по умолчанию	
Единицы измерения (Сила)(Длина)(Масса) [(мН)(мм)(кг) 🔹
🔲 Задать единицы измерения температуры	Градус Цельсия 👻
 Использовать ВТU как единицы тепловой эн Входной файл Тип файла ④ ASCII Двоичный ОР2 Имя файла D:\polyak_h\LEKCII\matmod\sim2_stoika-copy_ 	оf_solution_2.dat
Выборочный импорт	v
Общие параметры	~
Параметры обработки	v
Параметры уплотнения данных	v
Настройки кругового маршрута	v
	ОК Отмена

Рисунок 2.21 – Диалоговое окно «Импорт симуляции»



Рисунок 2.22 – Диалоговое окно «Новая КЭ модель и симуляция»



Рисунок 2.23 – Импортированная конечно-элементная модель (после топологической оптимизации)

Чтобы установить массу модели необходимо в дереве модели вызвать femфайл и перейти к элементу дерева модели «3d_mesh(1)». По правой кнопки мыши вызвать контекстное меню и выбрать элемент «Свойства тела» (рисунок 2.24). Общая масса тела составляет около 691 кг.

```
Свойства твердого тела выведены для следующих объектов
3d_mesh(1)
Общая длина (1D элементы): 0.000000E+00 mm
Общая площадь (2D элементы) : 0.000000E+00 mm<sup>2</sup>
Объем : 8.805821E+07 mm<sup>3</sup>
Общая масса : 6.912569E+02 kg
```

Рисунок 2.24 – Фрагмент файла свойств твердого тела модели

Контрольные вопросы

1 Назовите основные этапы проведения топологической оптимизации с использованием решателя «SOL200 Топологическая оптимизация» в Siemens NX.

2 Что понимается под целью проектирования топологической оптимизации?

3 Что понимается под областью оптимизации?

4 Что понимают под технологическими ограничениями для проведения процедуры топологической оптимизации?

5 Расскажите о назначении замороженной области в настройках процедуры топологической оптимизации.

6 Что понимается под «Design Constraint»?

7 Для чего используют копию итогового решения? Расскажите о последовательности проведения этой процедуры.

3 Построение в системе Ansys 3D-модели шпинделя и расчет его статических характеристик

3.1 Указания к выполнению индивидуального задания

<u>Цель</u>: формирование у обучающихся комплекса знаний, умений и получение навыков разработки геометрической модели в системе Ansys.

Задачи работы:

1 Изучить методику разработки геометрической модели средствами системы Ansys;

2 Разработать эскиз модели шпинделя металлорежущего станка по согласованию с преподавателем;

3 Разработать геометрическую модель шпинделя с использованием двух типов конечных элементов: Plane 182 и Solid 185;

4 Выполнить проверочный расчет;

5 Оформить отчет.

Ход выполнения работы:

1 Изучить методику разработки геометрической модели средствами системы Ansys с использованием методических пособий и встроенных в систему инструкций;

2 Разработать эскиз модели шпинделя металлорежущего станка по согласованию с преподавателем;

3 Задавшись геометрическими параметрами, построить контур тела вращения;

4 Создать плоское тело и, используя элементы Plane 182, создать сеточную модель;

5 Используя команды геометрических построений твердотельных объектов Ansys, построить тело вращения с использованием элементов Solid185;

6 Задать материал – сталь 40X для построенного тела;

7 Задать граничные условия; зафиксировать перемещения в передней и задней опорах;

8 Выполнить статический расчет

9 Оформить отчет.

Содержание отчета:

1 Исходные данные в виде конструктивной схемы шпинделя;

2 Эскиз контура тела вращения шпинделя и его 3D-модель;

3 Геометрическая модель шпинделя в системе Ansys на разных этапах ее построения в виде скриншотов;

4 Сеточная модель сечения шпинделя;

5 Сеточная модель шпинделя как твердотельного объекта;

6 Данные о расчетной модели шпинделя: листинги закреплений и нагружения;

7 Контурное представление решения статической задачи.

3.2 Формирование геометрической модели шпинделя в системе Ansys

На первом шаге моделирования необходимо разработать в Ansys геометрическую модель шпинделя для одного из вариантов, представленных на рисунках 3.1–3.4.

Некоторые варианты шпиндельных узлов представлены на рисунках 3.1–3.4.

В качестве базового варианта выберем схему шпинделя, представленную на рисунке 3.1 (остальные варианты обучающиеся выполняют самостоятельно).

Предварительно в CAD-системе создадим геометрическую модель – это существенно облегчит задание координат ключевых точек в Ansys. На рисунке 3.5 представлен эскиз геометрической модели шпинделя, выполненный в CAD-системе. На рисунках 3.6 а и 3.6 б представлены фрагменты эскиза.



Рисунок 3.1 – Компоновочная схема шпиндельного узла фирмы GMN



Рисунок 3.2 - Конструкция шпиндельного узла фрезерного станка



Рисунок 3.3 – Конструктивная схема ШУ многоцелевого станка (SKF)



Рисунок 3.4 – Конструктивная схема токарного станка



Рисунок 3.5 – Базовый эскиз



б)

Рисунок 3.6 – Фрагменты базового эскиза

На рисунке 3.7 – представлена 3D-модель, как результат операции вращения базового эскиза относительно оси вращения.



Рисунок 3.7 – 3D-модель шпинделя в CAD-системе

При построении эскиза шпинделя были использованы геометрические параметры хвостовика инструмента, вставляемого в конус переднего конца шпинделя (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Основные размеры хвостовиков по DIN 69871

Для построения геометрической модели в Ansys подготовим таблицу координат ключевых точек. При этом необходимо учесть положения четырех подшипников и вид выполняемого расчета. В зависимости от выбранного вида расчета будет выбрана модель опор, а это приведет к некоторым незначительным, но важным изменениям в задании ключевых точек. Так как в данной работе будем определять статические характеристики, то для модели подшипников будем использовать пружинные элементы. Тогда для контакта пружин с геометрической моделью шпинделя предусмотрим дополнительные ключевые точки. В таблице 3.1 приведены координаты ключевых точек. Для передней опоры примем ширину подшипника по каталогу, равной 20 мм.

Для создания геометрической модели шпинделя в Ansys достаточно задание 15 ключевых точек (таблица 3.1).

№ точки	Х, м	Ү, м	№ точки	Х, м	Ү, м	№ точки	Х, м	Ү, м
1	0	0	2	0,55	0	3	0	0,0225
4	0	0,035	5	0,02	0,035	6	0,0555	0,035
7	0,0655	0,035	8	0,0655	0,045	9	0,0785	0,045
10	0,0915	0,0275	11	0,3115	0,0275	12	0,3115	0,025
13	0,3215	0,025	14	0,36	0,025	15	0,55	0,025
16	0,0655	0,0129	17	0,0715	0,0129	18	0,0715	0,0189
19	0,55	0,0189	-	-	-	-	-	-

Таблица 3.1 – Координаты ключевых точек

На следующем этапе выполнения лабораторной работы вызовем Ansys, зададим тип решаемой задачи в главном меню («Main menu») – «Structural» и перейдем к созданию геометрической модели. Для задания ключевых точек используем путь вызова команды: Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints.

Наиболее удобным способом создания ключевых точек является их задание в рабочей плоскости – «In Active CS» (рисунок 3.9). Созданные точки представлены на выделенной области на рисунке 3.10.

▲ Create Keypoints in Active Coordinate System	X
[K] Create Keypoints in Active Coordinate System	
NPT Keypoint number	1
X,Y,Z Location in active CS	0 0
ОК Арріу	Cancel Help

Рисунок 3.9 – Вызов диалогового окна для создания ключевой точки



Рисунок 3.10 – Выделенная область созданных ключевых точек

На следующем шаге построения модели соединим ключевые точки линиями (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Контур эскиза шпинделя

Создание поверхности представлено на рисунке 1.12.



Рисунок 3.12 – Плоскость

На следующем шаге необходимо задать материал модели.

Чтобы нанести сетку на созданную плоскость (Area) необходимо выбрать соответствующий инструмент, например, «MeshTool». Вводим в модель два типа Solid-элементов: «Plane 182» и «Solid185» (рисунок 3.13). Результат представлен на рисунке 3.14.

K Element	Types				×
Define	ed Elem	ient Types:			
Туре	1	PLANE182			
lype	2	SOLID185			
	Add		Options	Delete	
	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,]
	C	Close		Help	

Рисунок 3.13 – Диалоговое окно выбора конечных элементов



Рисунок 3.14 – Сетка на базовой плоскости

Чтобы создать тело вращения, используем команду «EXTOPT», которая позволяет задать параметры, относящимися к созданию элементов объема из элементов площади. При этом одним из важных параметров этой команды является параметр «Val1», который устанавливает количество делений элемента в направлении создания объема (рисунок 3.15).

[EXTOPT] Element Ext Options	- -
[TYPE] Element type number	2 SOLID185
MAT Material number [MAT] Change default MAT	Use Default
REAL Real constant set number [REAL] Change Default REAL	Use Default Vone defined V
ESYS Element coordinate sys [ESYS] Change Default ESYS	Use Default
Element sizing options for extrusion VAL1 No. Elem divs VAL2 Spacing ratio	6 0
ACLEAR Clear area(s) after ext	∏ No
ОК	Cancel Help

Рисунок 3.15 – Диалоговое окно команды ЕХТОРТ

Чтобы завершить построения цилиндрических объемов, вращением базовой плоскости относительно центральной оси следует вызвать команду «VROTAT» (рисунок 3.16). Основным параметром, определяющим число формируемых объемов по окружности, является «NSEG» (предельное число – 8).

N Swe	N Sweep Areas about Axis				
[VROT	[VROTAT] Sweep Areas about Axis				
ARC Arc length in degrees 360			360		
NSEG	NSEG No. of volume segments			2	
	ОК	Apply	Cancel	Help	

Рисунок 3.16 – Диалоговое окно команды «VROTAT»

Итоговая сеточная модель шпинделя приведена на рисунке 3.17.



Рисунок 3.17 – Сформированная сеточная модель шпинделя

Завершающим шагом формирования геометрической модели является удаление сетки конечных элементов «PLANE182», принадлежащих базовой плоскости 1. Для этого сначала вызывается диалоговое окно «Meshing Attributes», в котором следует выбрать удаляемый из модели тип элементов «PLANE182» (рисунок 3.18). После этого, используя инструмент «MeshTool», и, используя команду «ACLEAR», удалить базовую плоскость (номер 1). После чего следует осуществить перенумерацию, вызвав команду «NUMCMP» (рисунок 3.19), приводящую к сжатию номеров всех нумерованных компонентов модели за счет удаления из модели номеров исключенных компонентов.

N Meshing Attributes	×
Default Attributes for Meshing	
[TYPE] Element type number	1 PLANE182
[MAT] Material number	5 6 7 8 9 10 11 12 13 •
[REAL] Real constant set number	None defined 🗨
[ESYS] Element coordinate sys	0 -
[SECNUM] Section number	None defined 💌
OK	Help

Рисунок 3.18 – Диалоговое окно атрибутов сетки



Рисунок 3.19 – Диалоговое окно команды NUMCMP

3.3 Задание условий закрепления и нагружения модели шпинделя

Для завершения формирования расчетной модели шпинделя необходимо задать граничные условия в виде условий закрепления и нагрузки.

Условия закрепления. На рисунке 3.20 представлены фрагменты геометрической модели шпинделя в области передней и задней опор. Заданные для моделирования передней опоры ключевые точки 5, 6 и точки 13, 14 – для задней опоры привели к образованию соответствующих плоскостей и линий, проходящих через эти ключевые точки. Это позволяет использовать узлы, принадлежащие этим плоскостям, в моделировании опор.



Рисунок 3.20 – Фрагменты геометрической модели шпинделя

Для моделирования опор будем использовать модель, геометрический образ которой представлен на рисунке 3.21. Согласно это модели подшипник представляется двумя массивами концентричных узлов, соединенных пружинами, характеризуемых параметром жесткости, равной жесткости подшипника (с учетом числа узлов в модели подшипника). При этом один массив узлов принадлежит цилиндрической поверхности, иллюстрирующей шейку шпинделя. Второй – является копией.



Рисунок 3.21 – Геометрическое представление модели подшипника

Для выделения отдельных узлов, принадлежащих конкретным линиям, если их номера неизвестны, наиболее удобно использовать диалоговое окно «Select Entities» (рисунок 3.22). При этом геометрическая модель шпинделя должна быть представлена линиями. Результат последовательного исполнения операций выделения в соответствии с параметрами, принятыми на рисунке 3.22 а и 3.22 б, соответственно, представлен на рисунке 3.23.



Рисунок 3.22 – Диалоговое окно «Select Entities»



Рисунок 3.23 – Результат выделения линий и узлов в модели шпинделя

На следующем этапе создания модели подшипника необходимо в модель добавить пружинные элементы «COMBIN14». Особенностью их использования является задание параметров К2 в виде, представленном на рисунке 3.24.

COMBIN14 element type options	X
Options for COMBIN14, Element Type Ref. No. 3	
Solution type K1	Linear Solution
DOF select for 1D behavior K2	Longitude UX DOF
DOF selection for 2D + 3D K3	3-D longitudinal 💌
OK Cancel	Help

Рисунок 3.24 – Диалоговое окно элемента COMBIN14

Подобных пружин в модели подшипника будет использовано три. Для двух последующих пружинных элементов параметр «K2» будет задаваться в виде: «Longitude UY DOF» и «Longitude UZ DOF». Это позволяет в модели подшипника задавать нулевую длину пружины.

Создание копий узлов. Для этого сначала следует выделить все копируемые узлы, используя диалоговое окно «Copy nodes» (рисунок 3.25 а). Для завершения операции следует просто нажать кнопу «OK» – это приведет к вызову диалогового окна, представленного на рисунке 3.25 б, которое также следует закрыть через нажатия кнопки «OK».

На завершающем этапе создания модели подшипника следует создать новые элементы, путем соединения пружинами «COMBIN14» двух комплектов узлов (рисунок 3.23). Однако, сначала следует задать параметры жесткости для пружин, например, равными «Зе7». Для этого необходимо перейти в главном меню к вкладке «Real Constants» и вызвать пункт меню «Add > Edit > Delete» для элементов «COMBIN14» (рисунок 3.26 а). Нажатие кнопки «OK» приводит к вызову нового диалогового окна, в котором в поле параметра «К» вводится значение жесткости – 3е7 Н/м (рисунок 3.26 б). Нажатие кнопки «OK» приводит к завершению

формированию множества вещественных констант, включающих параметры жесткости пружин (рисунок 3.27)



Рисунок 3.25 – Диалоговые окна для создания копий узлов

Clement Type for Real Constants	
Choose element type:	Real Constant Set Number 1, for COMBIN14
Type 1 PLANE182 Type 2 SOLID185	Element Type Reference No. 3
Type 3 COMBIN14 Type 5 COMBIN14	Real Constant Set No. 1
	Spring constant K 3e7
	Damping coefficient CV1
	Nonlinear damping coeff CV2
	Initial Length ILEN
	Initial Force IFOR
OK Cancel	OK Apply Cancel Help
a)	ნ)

Рисунок 3.26 – Диалоговые окна для задания параметров жесткости пружин

▲ Real Constants							
Defined Real Constant Sets							
	Set	1					
		1		1			
	Add		Edit	Dele	ete		
	Clos	se		Help			

Рисунок 3.27 – Формирование рядов «Real Constant»

На завершающем этапе создания модели подшипника следует создать новые элементы, путем соединения пружинами «COMBIN14» двух комплектов узлов (рисунок 3.23). Однако, сначала следует задать параметры жесткости для пружин, например, равными «Зе7». Для этого необходимо перейти в главном меню к вкладке «Real Constants» и вызвать пункт меню «Add > Edit > Delete» для элементов «COMBIN14» (рисунок 3.26 а). Нажатие кнопки «OK» приводит к вызову нового диалогового окна, в котором в поле параметра «К» вводится значение жесткости – «Зе7» (Н/м) (рисунок 3.26 б). Нажатие кнопки «OK» приводит к завершению формированию множества вещественных констант, включающих параметры жесткости пружин (рисунок 3.27).

Чтобы соединить пружинами «COMBIN14» совпадающие узлы необходимо прежде в главном меню при создании элементов (Create > Elements) задать для них атрибуты (рисунок 3.28).

Автоматическая нумерация создаваемых пружинных элементов реализуется вызовом команды «EINTF» в главном меню (рисунок 3.29).

Созданные элементы представлены на рисунке 3.30.

На этом этапе удобно создать еще две группы элементов «COMBIN14», вызывая опять диалоговые окна 3.28 и 3.29.

Чтобы создать модели остальных трех подшипников необходимо сначала вернуться к полной геометрической модели шпинделя, а затем повторить все выше описанные этапы создания модели подшипника, использующие элементы «COMBIN14».

A Element Attributes	x					
Define attributes for elements						
[TYPE] Element type number	3 COMBIN14					
[MAT] Material number	5 ▲ 6 7 8 9 E 10 11 12 12 13 ▼					
[REAL] Real constant set number	1					
[ESYS] Element coordinate sys	0 -					
[SECNUM] Section number	None defined 💌					
[TSHAP] Target element shape	Straight line 🗨					

Рисунок 3.28 – Диалоговое меню атрибутов элементов

▲ Define Elements Between Coincident Nodes								
[EINTF] Define Elements Between Coincident Nodes								
TOLER Tolerance of coincidence	0.0001							
TLAB Nodal number ordering	Low to high							
OK Cancel	Help							

Рисунок 3.29 – Диалоговое окно команды EINTF

LIST ALL	SEL	ECTE	D EL	.EHEI	ITS.	(LIST	NODES)
ELEH	HAT	TYΡ	REL	ESY	SEC		NODES
3729 3731 3732 3733 3734 3735 3736 3736 3737 3738 3739 3740 3741 3741 3742 3743 3744	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	~~~~~~~~~~~~	111111111111111111111111111111111111111	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	111111111111111111111111111111111111111	97 269 359 360 361 362 363 365 1654 1655 1655 1655 1655 1655 1658 1659 1660	2849 3021 3111 3112 3113 3114 3115 3116 3117 4406 4407 4408 4409 4410 4411 4412

Рисунок 3.30 – Листинг созданных пружинных элементов для первого подшипника передней опоры шпинделя

Если одна группа узлов пружинных элементов принадлежит шпинделю, то их копии, образующие вторую концентрическую группу узлов, принадлежат корпусу шпинделя (или его гильзе). Поэтому для них необходимо задать нулевые перемещения по всем координатным направлениям. В нашей модели номера рассматриваемых узлов лежат в диапазоне от 2849 до 12579. Для назначения закреплений в этих узлах необходимо вызвать команду «D». С использованием интерфейса системы ее вызов может быть осуществлен из главного меню (рисунок 3.31). Сначала выбирается диапазон закрепляемых узлов (рисунок 3.31 а), а затем назначаются фиксируемые степени свободы для выбранного диапазона узлов (рисунок 3.31 б). На рисунке 3.32 показан фрагмент расчетной модели шпинделя в области передней опоры.

Нагрузки. Для расчета статических характеристик шпинделя нагрузки задаются в виде действия сосредоточенных сил, приложенных к переднему концу шпинделя. Учитывая, с одной стороны, принятую в теории расчетную схему для расчета шпинделя на жесткость – сила приложена в узле на консольной части шпинделя, а с другой стороны – более подробную модель в МКЭ (метод конечных элементов). Для нее можно провести в рамках лабораторной работы исследование:
сравнить статические характеристики для разных вариантов нагружения: один узел, три, пять и т.д. На основе анализа литературы для точения будем принимать предельные отношения для составляющих сил резания $P_z : P_x : P_y$ (тангенциальная, радиальная и осевая составляющие) будем принимать соответственно в пропорции: 1:0,25:0,5. Для фрезерования эти соотношения 1:0,28:0,4.

Apply U,ROT on Nodes		
Pick O Unpick		
• Single C Box		
C Polygon C Circle		
C Loop		
Count = 0		
Maximum = 2848	Apply U,ROT on Nodes	
Minimum = 1	[D] Apply Displacements (U,ROT) on Nodes	
Node No. =	Lab2 DOFs to be constrained All DOF	
C List of Items © Min, Max, Inc		
2849 12579	Apply as Constant value	_
1	If Constant value then:	
	VALUE Displacement value	
OK Apply		
Reset Cancel		
Pick All Help	OK Apply Cancel Help	
a)	0)	

Рисунок 3.31 – Закрепление узлов, принадлежащих корпусу шпинделя

В системе Ansys координатные оси могут не совпадать с принятыми в резании. Поэтому, прежде чем проводить назначение сил резания необходимо провести анализ координатной системы для разработанной геометрической модели в Ansys. В нашем случае было установлено совпадение систем координат. Рассмотрим вариант растачивания – в этом случае соотношение составляющих для сил резания принимаем как для точения. Для каждой составляющей сил резания сначала вводим номера узлов, в которых задаются приложенные силы (рисунок

3.33 a), а затем соответствующие численные значения (рисунок 3.33 б). Итоговая таблица приложенных сил представлена на рисунке 3.34.



Рисунок 3.32 – Фрагмент шпинделя с моделью передней опоры

Apply F/M on Nodes	
Pick C Unpick	
• Single C Box	
C Polygon C Circle C Loop	
Count = 0	
Maximum = 2848	
Minimum = 1	
Node No. =	Apply F/M on Nodes
C List of Items	[F] Apply Force/Moment on Nodes
C Min, Max, Inc	Lab Direction of force/mom FX 💌
1549,173,351	Apply as Constant value
,	If Constant value then:
OK Apply	VALUE Force/moment value 0.28*8000/3
Reset Cancel	OK Apply Cancel Help
Pick All Help	
a)	б)

Рисунок 3.33 - Формирование узловых сил

NODE	LABEL	REAL	IMAG
173 173 173 351 351 351 1549 1549 1549	FX FY FZ FX FY FZ FX FY FZ	$\begin{array}{c} 280,000\\ 400,000\\ 1000,000\\ 280,000\\ 400,000\\ 1000,00\\ 280,000\\ 400,000\\ 1000,000\\ 1000,000\\ 1000,000\end{array}$	0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.000000

Рисунок 3.34 – Таблица нагружения

3.4 Расчет и анализ результатов

Для расчета статических характеристик шпинделя необходимо вызвать команду «ANTYPE» и выбрать опцию «Static». Вызов этой команды из главного меню системы осуществляется: Main menu > Solution > Analysis Type > New Analysis (рисунок 3.35). Для запуска решения из главного меню выбираем команду «SOLVE»: Main menu > Solution > Solve > Current LS.

New Analysis		X
[ANTYPE] Type of analysis		
		€ Static
		C Modal
		C Harmonic
		C Transient
		C Spectrum
		C Eigen Buckling
		C Substructuring/CMS
ОК	Cancel	Help

Рисунок 3.35 – Диалоговое окно команды АNTYPE

Результат расчета в контурном представлении показан на рисунках 3.36 и 3.37 в виде деформированного и исходного состояний модели шпинделя.



Рисунок 3.36 – Контурное представление шпинделя



Рисунок 3.37 – Фрагмент шпинделя

Вывод в окно графического представления системы реализуется вызовом команды «PLNSOL». Ее вызов с помощью интерфейса системы в разделе постпроцессора: «General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu». Это приводит к выводу на экран диалогового окна, представленного на рисунке 3.38. В котором можно выбрать любой из множества вариантов представления результатов расчета. На рисунке 3.39 представлен скан окна графического представления с результатами суммарных перемещений (по всем осям). При необходимости могут быть представлены перемещения в узлах шпинделя покоординатно.

После выполнения расчета следует перейти к оформлению отчета и подготовки ответов на контрольные вопросы.



Рисунок 3.38 – Диалоговое окно контурного представления результатов



Рисунок 3.39 – Скан окна графического представления с результатами суммарных перемещений (по всем осям)

Контрольные вопросы

1 Расскажите об особенностях разработки геометрической модели шпинделя как тела вращения средствами Ansys.

2 Расскажите об особенностях построения сеточной модели в Ansys.

3 Какие конечные элементы используют при построении тел вращения с использованием средств Ansys?

4 Как реализуются модели опор в модели шпиндельного узла?

5 Для чего в расчётах целесообразно использовать регулярную сетку?

6 С какой целью в расчётной модели задают силы резания?

4 Расчет статических характеристик шпинделя с учетом неидеального стыка в опорах

4.1 Указания к выполнению индивидуального задания

<u>Цель</u>: формирование у обучающихся комплекса знаний, умений и получение навыков расчета статических характеристик шпинделя в системе Ansys с использованием модели опор в виде неидеального стыка.

Задачи работы:

1 Разработать 3D-модель двухопорного шпинделя металлорежущего станка по согласованию с преподавателем;

2 Разработать расчетную модель шпинделя с использованием конечных элементов «Solid 185» и контактных элементов с использованием встроенного инструмента системы «Contact Wizard»;

3 Выполнить расчет;

78

4 Разработать расчетную модель шпинделя с учетом неидеального стыка в опорах без контактных элементов

5 Выполнить расчет;

6 Провести анализ полученных результатов

7 Оформить отчет.

Ход выполнения работы:

1 Изучить методику решения контактной задачи в системе Ansys с использованием пособия и встроенных в систему инструкций;

2 Разработать 3D-модель шпинделя металлорежущего станка в CAD-системе и сохранить в формате «Parasolid»;

3 Импортировать 3D-модель шпинделя в Ansys;

4 Провести анализ поверхностей, участвующих в контакте с использованием средств выделения элементов геометрической модели;

5 Задать материал – сталь 40Х для построенного тела;

6 Создать сеточную модель отдельных объемов, образующих модель шпинделя;

7 Создать контактные пары с использованием инструмента «Contact Wizard»;

8 Задать граничные условия; зафиксировать перемещения в передней и задней опорах;

9 Создать нагружения на передний конец – радиальные и осевые усилия;

10 Задать некоторое время формирования контакта после приложения нагрузки;

11 Выполнить статический расчет и сохранить все результаты;

12 Выполнить расчет шпинделя на кольцах с использованием элементов Combin14;

12.1 Создать новый файл в Ansys, импортируя модель шпинделя в формате «Parasolid»;

12.2 Осуществить склейку всех объемов модели;

12.3 Задать материал;

79

12.4 Создать сеточную модель;

12.5 Создать копию сеточной модели с перемещением по координатным осям (последовательно для каждого объема);

12.6 Задать пружинные элементы «Combin14» с жесткостью в диапазоне от 1,5е7 до 1,6е10 Н/м;

12.7 Создать закрепления и нагружение;

12.8 Выполнить расчет;

12.9 Провести сравнительный анализ результатов двух моделей;

13 Оформить отчет.

Содержание отчета:

1 Эскиз контура тела вращения шпинделя и его 3D-модель;

2 Геометрическая модель шпинделя в системе Ansys на разных этапах ее построения в виде скриншотов;

3 Сеточная модель сечения шпинделя;

4 Сеточная модель шпинделя как твердотельного объекта;

5 Данные о расчетной модели шпинделя: листинги закреплений и нагружения;

6 Контурное представление решения статической задачи.

Примечание: два варианта моделей.

4.2 Определение статических характеристик шпинделя на основе решения контактной задачи в опорах

В предыдущем разделе был представлен вид расчета, в котором модель подшипника представлялась пружинным элементом. Жесткость подшипников соответствовала жесткости пружинного элемента. Особенностью моделирования являлось использование встроенных средств Ansys для создания геометрической модели.

В данном разделе предлагается провести сравнение результатов, полученных по двум моделям. В первой модели для подшипника будет использована упрощенная модель неидеального стыка, построенная на основе решения контактной задачи «вал – втулка». Во второй модели будет использована модель неидеального стыка в виде комплекта пружин, исключающая решение контактной задачи.

В настоящее время использование компьютерного моделирования на базе метода конечных элементов позволяют проводить исследование контактных взаимодействий, учитывающие различные факторы. В этом случае решение нелинейных задач выполняется пошагово итерационными методами.

Общий порядок решения контактных задач в Ansys:

1) построение конечно-элементной сеточной модели;

2) определение целевых и контактных поверхностей;

3) создание контактных пар;

4) задание свойств материала, закреплений и вида нагружения;

5) решение задачи;

6) анализ результатов.

4.2.1 Построение геометрической модели шпинделя с охватывающими кольцами

Понятно, что предлагаемая модель опоры имеет учебный характер, так как любой подшипник качения образован внутренним, наружным кольцами и телами качения. Вместе с этим, устанавливая шпиндель на кольца, можно посмотреть влияние посадки. Согласно ГОСТ 3325-85 для подшипников качения в зависимости от класса их точности и посадок устанавливаются различные величины натягов. Например, для посадочных диаметров в диапазоне от 380 до 120 мм для посадки L5/js5 натяг составляет 17,5 мкм, а для L4/js5 – 15,5 мкм. Используя CAD-систему

построим учебную модель, представленную на рисунке 4.1. На рисунке 4.2 представлена 3D-модель шпинделя.



Рисунок 4.1 – Базовый эскиз шпинделя



Рисунок 4.2 – 3D-модель шпинделя

Для размещения колец предварительно создадим две плоскости. Плоскость *1* для создания эскиза переднего кольца, Плоскость 2 – для создания эскиза второго кольца (рисунок 4.3). Если используем SolidWorks, то для этого следует

использовать инструменты «Справочной геометрии». Первая плоскость располагается на расстоянии 120 мм от переднего конца, а вторая плоскость – на расстоянии 170 мм от заднего торца. На рисунке 4.4 представлены эскизы переднего и второго колец. На рисунке 4.5 представлена сборка шпинделя с кольцами высотой 30 мм.



Рисунок 4.3 – Создание вспомогательных плоскостей



Рисунок 4.4 – Эскизы колец



Рисунок 4.5 – Шпиндель с кольцами

4.2.2 Импорт модели в Ansys

Сохраненная в формате «Parasolid» модель успешно импортирована в Ansys, используя обращение к первой вкладке меню утилит «File» и вызов команды «~PARAIN». Обращение к этой команде возможно при нажатии строки меню «Import» и переходу к строке «Para...» (рисунок 4.6). На рисунке 4.7 представлен результат импорта модели в Ansys.

Import N	IGES
Export	CATIA
Report Generator	CATIA V5
Report Generator	Creo Parametric
Exit	NX
	SAT
	PARA

Рисунок 4.6 – Импорт файла модели в Ansys



Рисунок 4.7 – Импортированная модель с кольцами

4.2.3 Анализ поверхностей, используемых для целевых и контактных поверхностей

Для того чтобы определить номера поверхностей модели необходимо использовать различный инструментарий системы, позволяющий идентифицировать все ее геометрические компоненты.

Например, используя вкладку «Select» меню утилит, можно вызвать различные команды Ansys, приводящие к выделению фиксированных объемов, плоскостей, линий или ключевых точек (рисунок 4.8).

В отдельных случаях не требуется такое сильное средство редактирования модели как «Select». Тогда можно выделять отдельные элементы модели через использование инструмента «Specified Entities» (рисунок 4.9).

	Volumes Volumes By Num/Pick Volume
<u>Select</u> List Plot Plot <u>C</u> trls	 From Full C Reselect
Entities Component Manager	C Also Select C Unselect
Comp/Assembly	Sele All Invert Sele None Sele Belo
Everything Below	OK Apply Plot Replot Cancel Help

Рисунок 4.8 – Инструмент «Select»

<u>P</u> lot Plot <u>C</u> trls <u>W</u> orkPla	ne Pa <u>r</u> ameters <u>M</u> acro
Replot	
Keypoints •	
Lines	ы
Areas	
Volumes	
Specified Entities	Keypoints
Nodes Elements Layered Elements	Lines Areas Volumes

Рисунок 4.9 – Инструмент «Specified Entities»

Используя оба выше представленные средства, определим для рабочей модели шпинделя целевые поверхности. В качестве таковых следует принимать поверхности, принадлежащие шпинделю, так как в Ansys приняты следующие правила по назначению целевых и контактных поверхностей:

– если одна поверхность (А) является плоской или вогнутой, а другая поверхность (В) – острым ребром или выпуклостью, то поверхность А должна быть целевой (рисунок 4.10);

 – если обе контактирующие поверхности выпуклые, то целевой поверхностью принимается менее выпуклая; – если обе поверхности являются плоскими, выбор контактной и целевой поверхностей произволен;

 – если одна контактная поверхность имеет острое ребро, а другая не имеет, то первая принимается контактной поверхностью;

 – если одно из контактирующих тел абсолютно жесткое, то его поверхность принимается целевой.

Итак, целевая поверхность представлена следующими номерами: А3 и А20 – шейки передней опоры; А7 и А14 – шейки задней опоры.

Контактные поверхности представлены для передней и задней опор, соответственно: А25 и А30; А31 и А36 (рисунок 4.11).



Рисунок 4.10 – Схема описания контактного взаимодействия



Рисунок 4.11 – Выделенные поверхности для переднего и заднего колец модели

4.2.4 Задание материала и нанесение сетки

Для задания физических свойств материала можно либо использовать готовый файл данных, либо непосредственно внести данные о всех необходимых характеристиках одного или нескольких материалов. При загрузке файла данных о материалах используют вызов команды «MPREAD». Из главного меню она вызывается: «Main menu > Preprocessor > Material Props > Read from File». Для ввода физических характеристик материалов с использованием главного меню используют путь: «Main menu > Preprocessor > Material Props > Material Models».

Для создания сеточной модели необходимо вызвать библиотеку типовых элементов или использовать вызов команды «ЕТ» из главного меню: «Main menu > Element Type > Add/Edit/Delete» (рисунок 4.12). Например, при использовании твердотельных элементов «Solid185» команда «ЕТ», реализующая определение конкретного типа элемента из встроенной библиотеки элементов получает вид «ЕТ,1,SOLID185».

Library of Element Types	×
Only structural element types are shown	
Library of Element Types	Structural Mass A Link B Beam Brick 8 node 183 Pipe 20node 186 Solid concret 65 Shell Fick 8 node 185 Brick 8 node 185 Brick 8 node 185
Element type reference number	1
OK Apply	Cancel Help

Рисунок 4.12 – Диалоговое окно библиотеки конечных элементов

Сеточная модель может строиться как при последовательном вызове объемов, составляющих модель шпиндельного узла, так и для всех объемов одновременно. В

первом случае есть возможность назначения разной величины дискретизации для отдельных объемов. Итоговая сеточная модель представлена на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13 – Сеточная модель шпиндельного узла

4.2.5 Создание контактных элементов

Для этого необходимо вызвать «Contact manager» (рисунок 4.14), из которого следует вызвать мастер контакта «Contact Wizard» (первая пиктограмма в «Contact Manager»).

A Con	tact Manager				— X
51 🖄	🛾 🔀 Contact & Target	👻 🕭 🚺 👻	No Model Context	🔄 🔛 Choose a result item	*
Con	act Pairs				۲
ID	Contact Behavior	Target	Contact	Pilot Node Pilot Name	<u> </u>
					-
4					•

Рисунок 4.14 - Диалоговое окно «Contact Manager»

При вызове «Contact Wizard» откроется диалоговое окно, которое позволяет задать целевые поверхности – «Target surfaces» (рисунок 4.15 a). Нажатие копки «Pick Target» приводит к вызову диалогового окна «Select Areas for Target», позволяющего ввести в поле ввода номера целевых поверхностей (рисунок 4.15 б). После нажатия кнопки «OK» вторично появляется диалоговое окно мастера контакта, но с активной кнопкой «Next» (рисунок 4.16).



Рисунок 4.15 – Состояние диалоговых окон при выборе целевых поверхностей

Contact Wizard		
	A contact pair consists of a target surf You will first define the target surface.	face and contact surface.
	Target Surface:	Target Type:
	Areas	• Flexible
	C Body (volume)	C Rigid
	C Nodes	Rigid w/ Pilot
	C Nodal Component	C Pilot Node Only (Advanced Option)
		Pick Target
	< <u>B</u> ack <u>N</u> ext >	Cancel <u>H</u> elp

Рисунок 4.16 – Диалоговое окно «Contact Wizard» после задания целевых

поверхностей

Нажатие кнопки «Next» приводит к возможности задания контактных поверхностей (рисунок 4.17 а). После нажатия кнопки «Pick Contact» вызывается диалоговое окно «Select Areas for Target». Ввод в поле ввода соответствующих номеров поверхностей и нажатие кнопки «OK» (рисунок 4.17 б) опять приводит к выводу диалогового окна «Conact Wizard», но с активной кнопкой «Next» (рисунок 4.18).

Select Areas for Target

	© Pick C Unpick
	© Single C Box
net surface	C Polygon C Circle
	C Loop
Contact Element Type:	Count = 0
Surface-to-Surface	Maximum = 36
C Nodo to Surfaco	Minimim = 1
Noue-to-Sullace	Area No. =
	C List of Items
	a hist of forms
	C Min, Max, Inc
	21.25
	31,36
Pick Contact	OK Apply
	Reset Cancel
Cancel <u>H</u> elp	Pick All Help
	б)
	Jet surface. Contact Element Type: © Surface-to-Surface © Node-to-Surface Pick Contact

Рисунок 4.17 - Состояние диалоговых окон при выборе контактных поверхностей

Contact Wizard		
	The contact surface moves into the tar	rget surface.
	Contact Surface:	Contact Element Type:
	C Lines	© Surface-to-Surface
	 Areas 	C Node-to-Surface
	C Body (volume)	
	C Nodes	
	Nodal Component	
		Pick Contact
	< <u>B</u> ack <u>N</u> ext >	Cancel Help

Рисунок 4.18 - Состояние диалогового окна после назначения контактных

поверхностей

Очередное нажатие кнопки «Next» приводит к заключительному виду диалогового окна «Contact Wizard» (рисунок 4.19), в котором уже необходимо выбрать материал, коэффициент трения и ряд дополнительных параметров, переход к которым осуществляется по кнопке «Optional settings».

Λ Contact Wizard	- 🗆 X
	The contact pair is now ready to be created using the following settings:
	Only Structural DOF has been detected
	Create symmetric pair Include initial penetration
	Friction:
	Material ID 4
	Coefficient of Friction 0.15
	Ihermal Contact Conductance 0 Image: Contact Conductance Electric Contact Conductance 0 Image: Contact Conductance
	Optional settings
	< Back Create > Cancel Help



Значение параметра «Normal Penalty Stiffness» отражает контактную жесткость соединения и подбирается экспериментально. В качестве начальной оценки параметра может быть принято значение «0.1» (рисунок 4.20). Для задания натяга–зазора введем параметр «Contact Surface offset», равным некоторому ненулевому значению, составляющему несколько микрометров (рисунок 4.21). Таким образом, если формирование контактного взаимодействия для двух колец выполнялось раздельно, то получим итоговый вид диалогового окна «Contact manager», представленный на рисунке 4.22.

\Lambda Contact Properties		×
Basic Friction Initial Adju	stment Misc Rigid target Thermal Electric ID	
Normal Penalty Stiffness	0.1 • factor C constant	
Penetration tolerance	0.1 • factor C constant	
Pinball region	Kauto> 💌 💿 factor 🔿 constant	
Contact stiffness update	Each iteration (PAIR ID based)	
Contact algorithm	Augmented Lagrange method	
Contact Detection	On Gauss points 💽	
Behavior of contact surface	Standard	
Type of constraint	Auto assembly detection	
	OK Cancel Help	

Рисунок 4.20 – Диалоговое окно для задания свойств контакта

Initial penetration	Include everything	
Load step number for ramp	bing 1	
Contact surface offset	1.55e-005	
Automatic contact adjustm	nent No automated adjustment 🗾	
Initial contact closure	0 💽 🖸 factor C constant	
Initial Allowable	Penetration Range	
Lower boundary 0	● factor C constant	
Upper boundary 0	● factor ● constant	

Рисунок 4.21 – Вид вкладки «Initial Adjustment»

🔨 Conta	act Manager						x
🔊 🔗	🔀 Contact & Target	- 🖸 🐼 🤅	🗟 🗊 No Model Context		Choose a result item	v	
Conta	act Pairs				·		۲
ID	Contact Behavior	Target	Contact	Pilot Node	Pilot Name		
3	Standard	Flexible	Surface-to-Surface	No pilot			
6	Standard	Flexible	Surface-to-Surface	No pilot			
							Ţ
•						D	

Рисунок 4.22 – Вид контактного менеджера с уже созданными контактными парами

4.2.6 Задание закреплений и нагрузок

Для принятой модели закрепление можно задать для отдельных компонентов наружных поверхностей колец.

Это могут быть узлы, ключевые точки, линии, поверхности. В этой модели предложено закрепить линии наружного цилиндра переднего кольца по трем осям. Наружный цилиндр второго кольца предлагается зафиксировать только по двум осям Y и Z. Нагрузку удобно приложить в ключевой точке на переднем конце по осям X и Y (осевая и радиальная составляющие). Соотношение сил приведено при выполнении первой лабораторной работы.

Созданные контактные пары приведены на рисунке 4.23.



Рисунок 4.23 – Вид контактных элементов для переднего и второго колец

4.2.7 Решение и результаты

Как ранее указывалось, чтобы решить нелинейную задачу необходимо реализовать несколько шагов нагружения. Для этого необходимо вызвать диалоговое окно «Solution Controls»: «Mail menu > Solution > Analysis Type > Sol'n

Contols» (рисунок 4.24). После запуска решения на экран выводятся графики сходимости решения.

Analysis Options Small Displacement Static □ Calculate prestress effects Time Control Time at end of loadstep 1 Automatic time stepping Prog Chr ^ Number of substeps @ Time increment Time step size Minimum time step 0 Maximum time step	Image: Write Items to Results File Image: Constraint of the solution items Image: Constraint of the solution Node DP Solution Node Reaction Loads Element Solidon Element Kodel Code Element Kodel Substance Image: Constraint of the solution Node Reaction Loads Element Kodel Substance Image: Constraint of the solution Node Reaction Loads Element Kodel Substance Image: Constraint of the solution Image: Constraint of the solution
---	--

Рисунок 4.24 - Диалоговое окно Solution Controls

Анализ полученных решений можно выполнять с использованием различных команд постпроцессора. На рисунке 4.25 представлено контурное представление шпинделя после решения. Можно смотреть решение на каждом шаге формирования нагрузки. В данном случае приведено решение для последнего шага нагружения.



Рисунок 4.25 – Контурное представление шпинделя после решения

Чтобы оценить состояние контактных пар можно использовать вызов в постпроцессоре контурного графика «Main menu > General Postproc > Contour Plot > Nodal Solu > Contact > Contact Status» (рисунок 4.26).



Рисунок 4.26 – Проникновение контактных пар

Рисунок 4.27 дает представление о проникновении контактных пар под нагрузкой: «Main menu > General Postproc > Contour Plot > Nodal Solu > Contact > Contact Penetration».



Рисунок 4.27 – Состояние проникновения в области контакта

4.3 Определение статических характеристик шпинделя на упругих опорах

Общая последовательность действий, позволяющих определить статические характеристики шпинделя на упругих опорах с использованием упругих элементов «Combin14», более детально представлена в пособиях [10, 11]. Чтобы не повторять известную информацию здесь кратко укажем основную последовательность симуляции:

1 Создание нового файла в Ansys, импортируя модель шпинделя в формате «Parasolid»;

2 Склейка всех объемов модели;

3 Назначение материала модели;

4 Создание сеточной модели;

5 Создание копии сеточной модели с перемещением по координатным осям (последовательно для каждого объема);

6 Создание упругих элементов с использованием элементов «Combin14»;

7 Создание закрепления и нагружения;

8 Расчет и результаты.

Контрольные вопросы

1 Основные этапы формирования контактной пары в Ansys.

2 Особенности назначения параметров для контактной пары в Ansys.

3 Особенности создания упругих опор с использованием «Combin14».

4 Опишите настройки диалогового окна «Contact Properties».

5 Как учитывается в контактной паре зазор-натяг?

6 Расскажите назначение в настройках параметра «Normal Penalty Stiffness».

7 Что означает настройка «Target Surface»?

8 Что означает настройка «Contact Surface»?

5 Расчет контактного взаимодействия полусферы с пластиной

5.1 Указания к выполнению индивидуального задания

<u>Цель</u>: формирование у обучающихся комплекса знаний, умений и получение навыков расчета контактного взаимодействия полусферы с пластиной в системе Ansys.

Задачи работы:

1 Разработать в средствами Ansys 3D-модель полусферы и пластины [12–14];

2 Разработать расчетную модель полусферы и пластины с использованием конечных элементов «Plane182», «Solid 185» и контактных элементов с использованием встроенного инструмента системы «Contact Wizard»;

3 Выполнить расчет;

4 Провести анализ полученных результатов

5 Оформить отчет.

Ход выполнения работы:

1 Разработать 3D-модель полусферы с пластиной в Ansys;

2 Провести анализ поверхностей, участвующих в контакте с использованием средств выделения элементов геометрической модели;

3 Задать материал для построения сеточных моделей;

4 Создать сеточную модель с регулярной сеткой с переменным шагом;

5 Создать контактные пары с использованием инструмента «Contact Wizard»;

6 Задать граничные условия: зафиксировать перемещения и нагрузку;

7 Задать некоторое время формирования контакта после приложения нагрузки;

8 Выполнить статический расчет;

9 Провести анализ результатов;

10 Оформить отчет.

Содержание отчета:

1 3D-модель полусферы с пластиной в Ansys;

2 Сеточная модель полусферы с пластиной в плоскости;

- 3 Сеточная 3D-модель полусферы с пластиной;
- 4 Вид контактной пары;
- 5 Контурное представление решения статической задачи.

5.2 Общие положения

Построение модели подшипников качения является актуальной задачей в машиностроении. Важнейшей теоретической основой является решение задачи Герца Г.Р. В 1882 г. Герц Г.Р. решил задачу о контакте двух сферических упругих тел и более общие случаи сжатия соприкасающихся упругих тел. Поверхностные силы представляют результат взаимодействия одного тела с примыкающими к нему другими телами. Для подшипников качения характерна задача контактного взаимодействия: твёрдый шар радиусом R вдавливается в упругое полупространство на глубину d (глубина проникновения), образуя область контакта радиусом a (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Внедрение шара в упругое полупространство

5.3 Построение геометрической модели

5.3.1 Создание ключевых точек

На первом этапе построения модели создаются ключевые точки модели таблица 5.1. Для этого вызывается команда определения ключевой точки «К, *NPT*, *x*, *y*, *z*».

Таблица 5.1 - Координаты ключевых точек

	1	2	3	4	5	6	7
Х	0	0	0,01	-0,025	0,025	0,025	-0,025
Y	0	0,01	0,01	0	0	-0,005	-0,005
Z	0	0	0	0,025	0,025	0,025	0,025

Вызов команды может быть осуществлен с помощью интерфейса из главного меню: «Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS». На рисунке 5.2 представлено диалоговое окно команды создания ключевых точек. На рисунке 5.3 показаны созданные ключевые точки.

Create Keypoints in Active Coordinate System				
[K] Create Keypoints in Active Coordinate System				
NPT Keypoint number	1			
X,Y,Z Location in active CS				
ОК Арріу	Cancel Help			

Рисунок 5.2 – Диалоговое окно команды создания ключевых точек



Рисунок 5.3 – Ключевые точки

5.3.2 Создание линий

Прямые линии создаются по двум ключевым точкам. Дуги создаются по двум ключевым точкам, являющиеся концами дуги и соответствующему радиусу с центром в третьей ключевой точке. Построение дуги осуществляется с помощью команды «LARC, *P1*, *P2*, *PC*, *RAD*».

Вызов команды с помощью интерфейса осуществляется следующим образом: «Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Arcs > By End KPs & Rad» (рисунок 5.4).

Arc by End KPs & Radius	X
[LARC] Define Arc by End Keypoints and Radius	
RAD Radius of the arc	0.01
P1,P2 Keypoints at start + end	1 3
PC KP on center-of-curvature	2
- side and plane of arc	
OK Apply	Cancel Help

Рисунок 5.4 – Диалоговое окно создания дуги по двум ключевым точкам и

радиусу



Рисунок 5.5 – Контур модели, заданный линиями по ключевым точкам

5.3.3 Создание плоскостей

Создание плоскостей осуществляется на контурах, образованных созданными ранее линиям с помощью команды «AL, L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10».

Вызов команды с помощью интерфейса осуществляется следующим образом: «Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines». Результат исполнения команды представлен на рисунке 5.6.



Рисунок 5.6 – Плоскости моделей полусферы и пластины

5.4 Построение сеточной модели

5.4.1 Типовые элементы

Для нанесения сетки на созданные плоскости необходимо выбрать плоские элементы «Plane182». Для создания на их основе твердотельных элементов

выбираются элементы «Solid185». Диалоговое окно выбора типовых конечных элементов, используемых в модели представлено на рисунке 5.7. Вызов этого окна осуществляется с помощью интерфейса системы: «Main menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete». Программно выбрать типовые элементы для моделирования можно, используя следующий код «ET,1,PLANE182» и «ET,2,SOLID185».

Element	Types				 X
Define	ed Elem	ent Types:			
Туре		PLANE182			
Туре	2	SOLID185			
	Add	Xlose	Options	Dele	ete

Рисунок 5.7 – Диалоговое окно выбора типовых конечных элементов, используемых в модели

5.4.2 Выбор материала

необходимо материал. Это До нанесения сетки задать можно ИЛИ непосредственно задавать физико-механические свойства материала вводом конкретных значений или воспользоваться имеющимся файлом данных. Предпочтительным является использование текстового файла данных. В этом случае используется вызов команды «MPREAD» в виде «MPREAD, 'mat15', 'txt', ' '».

Средствами интерфейса системы выбор таблицы физико-механических свойств материала осуществляется: «Main menu > Preprocessor > Material Props > Read from File».

Просмотреть свойства конкретного материала можно, используя вызов диалогового окна: «Main menu > Preprocessor > Material Props > Material Models» (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 – Диалоговое окно характеристик всех заданных материалов

Назначение конкретного номера материала осуществляется при нанесении сетки.

5.4.3 Создание сеточной модели для плоскостей

Особенностью создания сеточной модели является построение регулярной сетки с переменным шагом.

Для прямоугольной пластины используем первый тип элементов и материал 15. Программный код имеет вид «ТҮРЕ, 1» и « МАТ, 15».

Использование интерфейса системы: «Main menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Atributes > Default Attribs», приводит к вызову диалогового меню, представленного на рисунке 5.9.

После этого необходимо перейти к заданию параметров, определяющих размер сетки. В данном случае наиболее просто это реализуется назначением

параметров параллельных линий, используемых для формирования горизонтального размера прямоугольной стенки пластины. Программный код в этом случае имеет вид «LESIZE,_Y1,0.002, , ,-0.1, , , ,0».

▲ Meshing Attributes	×				
Default Attributes for Meshing					
[TYPE] Element type number	1 PLANE182 -				
[MAT] Material number	7 * 8 9 10 11 11 E 13 14 15 *				
[REAL] Real constant set number	None defined 🗨				
[ESYS] Element coordinate sys	0 🔽				
OK Cancel	Help				

Рисунок 5.9 – Диалоговое меню задания атрибутов сетки

При использовании интерфейса системы необходимо вызвать диалоговое окно «Mesh Tool»: «Main menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool» (рисунок 5.10). Для задания размеров элемента на выбранных линиях необходимо нажать кнопку «Set» (рисунок 5.10 а) и выбрать две горизонтальные линии. После их выбора с помощью стрелочного указателя появится диалоговое окно, представленное на рисунке 5.11. Особенностью назначения параметров является задание отрицательного значения параметра «SPACE». Для равномерного шага используется «1». Отрицательные значения параметра приводят к сгущению сетки к середине выделенной линии. Чем меньше значение этого параметра, тем меньше расстояние между соседними линиями. Для создания регулярной сетки необходимо в диалоговом окне «Mesh Tool» активировать радиокнопки «Quad» и «Марреd» (рисунок 5.10 б).

Сформированная сетка представлена на рисунке 5.12.

MeshTool	
Element Attributes:	
Global ▼ Set Smart Size Fine 6 Coarse	Mesh: Areas Shape: O Tri O Quad O Free O Mapped O Sweep
Size Controls: Global Set Clear Areas Set Clear	3 or 4 sided
Lines Set Clear Copy Flip Layer Set Clear	Refine at: Elements
Keypts Set Clear	Close Help
a)	б)

Рисунок 5.10 – Фрагменты диалогового окна «Mesh Tool»

C Element Sizes on Picked Lines	x
[LESIZE] Element sizes on picked lines	
SIZE Element edge length	þ.002
NDIV No. of element divisions	
(NDIV is used only if SIZE is blank or zero)	
KYNDIV SIZE,NDIV can be changed	□ No
SPACE Spacing ratio	-0.1
ANGSIZ Division arc (degrees)	
(use ANGSIZ only if number of divisions (NDIV) and	
element edge length (SIZE) are blank or zero)	
Clear attached areas and volumes	☐ No
OK Apply	Cancel Help

Рисунок 5.11 – Диалоговое окно определения размеров элемента на выбранных

линиях

						Π						
					Τ	Π	Γ					

Рисунок 5.12 – Регулярная сетка со сгущением к центру

Для полусферы сеточная модель строится таким же образом только при других параметрах для дуги. В этом случае размер элемента назначается только для дуги в виде значения угла в градусах. Для используемых в примере размеров достаточно использовать дискретизацию равную 5 градусам. Обязательна активация параметра «KYNDIV SIZE, NDIV can be changed» – использование для параметра «NDIV» (рисунок 5.13).

Relement Sizes on Picked Lines	×
[LESIZE] Element sizes on picked lines	
SIZE Element edge length	
NDIV No. of element divisions	
(NDIV is used only if SIZE is blank or zero)	
KYNDIV SIZE,NDIV can be changed	🔽 Yes
SPACE Spacing ratio	
ANGSIZ Division arc (degrees)	5
(use ANGSIZ only if number of divisions (NDIV) and	
element edge length (SIZE) are blank or zero)	
Clear attached areas and volumes	∏ No
OK Apply	Cancel Help

Рисунок 5.13 – Диалоговое окно определения размеров элемента на выбранной дуге

Применение этого параметра позволяет несколько ослабить условия или требования, накладываемые на размер конечного элемента, используемого в модели. Использование этого параметра приводит к автоматической модификации размера элемента, приводящей к успешному построению сеточной модели.

Регулярная сетка описывается командой «MSHKEY, 1».

Итоговая сеточная модель, построенная на элементах «PLANE182» представлена на рисунке 5.14.

Твердотельная конструкция. Построение твердотельной конструкции осуществляется также как в первой работе, только с небольшими изменениями для параметра «VAL2». При построении пластины задается отрицательное значение

параметра «-0.1» (рисунок 5.15). Параметр «VAL2» определяет параметр «Spacing ratio» – его назначение подобно ранее описанному параметру «SPACE».

Программный код для назначения параметров «VAL1» и «VAL2» имеет вид «EXTOPT,ESIZE,20,-0.1»



Рисунок 5.14 - Сеточная модель на элементах «PLANE182»

[EXTOPT] Element Ext Options			-
[TYPE] Element type number		2 SOLID185 -]
MAT Material number [MAT] Change default MAT		Use Default	
REAL Real constant set number [REAL] Change Default REAL		Use Default 💌 None defined 💌	
ESYS Element coordinate sys [ESYS] Change Default ESYS		Use Default	
Element sizing options for extrusion VAL1 No. Elem divs VAL2 Spacing ratio		20	
ACLEAR Clear area(s) after ext		☐ No	
ОК	Cancel	Help	

Рисунок 5.15 – Диалоговое окно для задания опций для команды вытягивания для пластины

Для построения пластины использована команда вытягивания объема по заданной плоскости (в данном случае плоскость имеет номер «1») на некоторую длину (в рассматриваемом примере «0,05» метра). В команде обязательно задается 108
новый номер ключевой точки (в примере использован «10») – «VOFFST,1,0.05,10,».

Для полусферы параметр «VAL2» имеет значение «1» (рисунок 5.16). Для создания твердотельной конструкции используется команда геометрических построений твердотельных объектов Ansys, в виде вращения созданной поверхности относительно оси, перпендикулярной пластине с использованием элементов «Solid185»: «Main menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > About Axis».

На рисунке 5.17 приведена итоговая модель.

[EXTOPT] Element Ext Options		_
[TYPE] Element type number		2 SOLID185
MAT Material number [MAT] Change default MAT		Use Default ▼ 7 ↑ 9 10 11 ■ 13 ■ 14 ▼ 15 ▼
REAL Real constant set number [REAL] Change Default REAL ESYS Element coordinate sys		Use Default Vone defined Use Default
[ESYS] Change Default ESYS		0 💌
Element sizing options for extrusion VAL1 No. Elem divs VAL2 Spacing ratio		20 1
ACLEAR Clear area(s) after ext		⊡ No
ок	Cancel	Help

Рисунок 5.16 – Диалоговое окно для задания опций для команды вытягивания для

полусферы



Рисунок 5.17 – Итоговая сеточная модель

5.5 Анализ поверхностей

Для создания контактных пар, как было раньше показано, необходимо определить номера поверхностей, которые используются в качестве «целевых» и «контактных» (рисунок 5.18).



Рисунок 5.18 – Изображение пронумерованных поверхностей модели

Используя меню утилит: «Plot > Specified Entities > Areas», можно точно установить номер интересующей поверхности. Верхняя поверхность пластины, вступающая в контакт с полусферой в рассматриваемом примере, была идентифицирована под номером 16. Эта поверхность в создаваемой контактной паре будет приниматься в качестве «целевой». Поверхности полусферы, имеющие большую кривизну, будут приниматься в качестве контактных: 4, 7, 10, 13.

5.6 Создание контактных пар

Создание контактных пар осуществляется с помощью менеджера контакта. Вызов которого осуществляется из главного меню: «Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Contact Pair» (рисунок 5.19). Чтобы создать контактную пару с использованием интерфейса системы необходимо использовать диалоговые окна «Contact Wizard», вызываемые нажатием первой кнопки в диалоговом окне «Contact Manager».

N Contact Manager				 X	<u> </u>
🚮 🖓 🔀 Contact & Target	💽 💽 💌 🕅 🛅	No Model Context	🔄 📝 Choose a result item	~	
Contact Pairs				Ø	۵
ID Contact Behavior	Target	Contact	Pilot Node Pilot Name	-	-
4					

Рисунок 5.19 – Диалоговое окно менеджера контакта

Нажатие кнопки вызывает новое диалоговое окно (рисунок 5.20 а), инструменты которого позволяют выбрать целевую поверхность «16». Об этом в верхней части окна выводится сообщение «A contact pair consists of a target surface and contact surface. You will first define the target surface». Нажатие кнопки «Pick Target» приводит к вызову диалогового окна «Select Areas for Target» (рисунок 5.20 б). После нажатия кнопки «ОК» вызывается новое диалоговое окно «Contact Wizard» с активной кнопкой «Next» (рисунок 5.21), нажатие которой приводит к вызову очередного диалогового окна «Contact Wizard», которое уже позволяет назначить контактные пары (рисунок 5.22 а). После нажатия кнопки «Pick Contact» выводится диалоговое окно «Select Areas for Contact», которое позволяет в интерактивном режиме выбрать контактные поверхности (рисунок 5.22 б). После нажатия кнопки «ОК» выводится предыдущий вариант окна «Contact Wizard», но с активной кнопкой «Next» (рисунок 5.23). Очередное нажатие кнопки «Next» уже приводит к выводу последнего варианта окна «Conact Wizard» (рисунок 5.24), которое позволяет задать материал контактной пары, коэффициент трения и опциональные настройки контактного взаимодействия «Optional Settings».

			Select Areas for Target
Contact Wizard			• Pick O Unpick
	A contact pair consists of a target surf You will first define the target surface.	face and contact surface.	© Single C Box C Polygon C Circle C Loop
	Target Surface:	Target Type:	Count = 0
	 Areas 	Flexible	Maximum = 18 Minimum = 1
	C Body (volume)	C Rigid	Area No. =
	O Nodes	C Rigid w/ Pilot	C List of Items
	C Nodal Component	C Pilot Node Only (Advanced Option)	C Min, Max, Inc
		Pick Target	OK Apply
	< <u>B</u> ack <u>N</u> ext >	Cancel Help	Reset Cancel Pick All Help
	a)		б)

Рисунок 5.20 – Диалоговое окно «Contact Wizard» в режиме выбора целевой

поверхности



Рисунок 5.21 – Диалоговое окно «Contact Wizard» после выбора целевой

поверхности

		Select Areas for Contact
		© Pick C Unpick
Contact Wizard The contact surface moves into the t Contact Surface: Contact Surface: C Lines C Areas C Body (volume)	arget surface. Contact Element Type:	© Single © Box © Polygon © Circle © Loop Count = 0 Maximum = 18 Minimum = 1 Area No. =
C Nodes C Nodal Component	Pick Contact	• Min, Max, Inc • Min, Max, Inc <td< th=""></td<>
< <u>B</u> ack Next >	Cancel Help	Pick All Help
a)		б)

Рисунок 5.22 – Диалоговое окно «Contact Wizard» в режиме выбора контактных поверхностей

Contact Wizard		
	The contact surface moves into the tar	rget surface.
	Contact Surface:	Contact Element Type:
	O Lines	© Surface-to-Surface
	 Areas 	Node-to-Surface
	C Body (volume)	
	C Nodes	
	Nodal Component	
		Pick Contact
	< <u>B</u> ack <u>N</u> ext >	C <u>a</u> ncel <u>H</u> elp

Рисунок 5.23 – Диалоговое окно «Contact Wizard» после выбора контактных поверхностей

Contact Wizard	
	The contact pair is now ready to be created using the following settings: Only Structural DOF has been detected Create symmetric pair Include initial penetration Friction: Material ID 15 1 Coefficient of Friction 0.15 Thermal Contact Conductance 0 Electric Contact Conductance 0 Optional settings
	< Back Create > Cancel Help

Рисунок 5.24 – Заключительный вариант диалогового окна «Contact Wizard»

Нажатие кнопки «Optional settings» приводит к вызову диалогового окна «Contact Propeties», в котором для вкладки «Basic» параметру «Normal Penalty Stiffness» рекомендуется для улучшения сходимости решения задать значение «0,1» при активной радиокнопке «factor» (рисунок 5.25). Для опции «Automatic contact adjustment» вкладки «Initial Adjustment» выбрать установку «Close gap» (рисунок 5.26). Для подтверждения изменений в выбранных опциях необходимо в диалоговом дереве Contact Properties нажать кнопку «OK» - это позволит перейти к завершению построения контактной пары нажатием кнопки «Create» (рисунок 5.24). Сообщение об успешном завершении построения контактной пары имеет вид, приведенный на рисунке 3.27. После нажатия кнопки «Finish» в рабочем окне системы появится сформированная контактная пара (рисунок 5.28).

5.7 Закрепление

Как для любой задачи механики деформируемого твердого тела требуется задание граничных условий. Одним из важнейших компонентов граничных условий

являются условия закрепления. Учитывая условия неидеального контакта двух тел, закрепления необходимо прикладывать к каждому из участвующих в контакте тел.

Contact Properties	
Basic Friction Initial Adju	stment] Misc] Rigid target] Thermal] Electric] ID]
Normal Penalty Stiffness	0.1 • factor C constant
Penetration tolerance	0.1 💿 factor 🔿 constant
Pinball region	Kauto> 💌 🕫 factor C constant
Contact stiffness update	Each iteration (PAIR ID based)
Contact algorithm	Augmented Lagrange method
Contact Detection	On Gauss points
Behavior of contact surface	Standard
Type of constraint	Auto assembly detection
	OK Cancel Help

Рисунок 5.25 – Диалоговое окно «Contact Properties» вкладка «Basic»

Contact Properties
Basic Friction Initial Adjustment Misc Rigid target Thermal Electric ID
Initial penetration Include everything
Load step number for ramping
Contact surface offset 0
Automatic contact adjustment Close gap
Initial contact closure 0 💽 💿 factor O constant
☐ Initial Allowable Penetration Range
Lower boundary 0
Upper boundary 0
OK Cancel Help

Рисунок 5.26 – Диалоговое окно «Contact Properties» вкладка «Initial Adjustment»



Рисунок 5.27 – Сообщение об успешном завершении создания контактной пары



Рисунок 5.28 – Сформированная контактная пара

Пластина обязательно должна быть закреплена как минимум по узлам в углах нижней поверхности пластины по трем координатам. Программно это реализуется вызовом команды «D, *Node*, *Lab*, *VALUE*, *VALUE*, *NEND*, *NINC*, *Lab*, *Lab*, *Lab*, *Lab*, *Lab*).

При использовании интерфейса системы: «Main menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes» — это приводит к вызову диалогового окна «Apply U, ROT on Nodes» (рисунок 5.29).

Полусфера может быть закреплена по линиям, образующим ее контур, только по двум координатам, исключая координату, совпадающую с вертикальной осью. В этом случае используется команда вида «DL, *LINE*, *AREA*, *Lab*, *Value1*, *Value2*».

Для выделения отдельных линий полусферы с использованием инструментов интерфейса необходимо вызвать диалоговое окно «Apply U, ROT on Nodes» (рисунок 5.30 а). Результат исполнения команды приведен на рисунке 5.30 б.

ſ	Apply U,ROT on Nodes	X
	[D] Apply Displacements (U,ROT) on Nodes	
	Lab2 DOFs to be constrained	All DOF UX UY UZ VELX
	Apply as	Constant value 💌
	If Constant value then:	
	VALUE Displacement value	
	ОК Арріу	Cancel Help

Рисунок 5.29 – Закрепление пластины



Рисунок 5.30 – Результат закрепления полусферы

5.8 Нагружение

В качестве нагрузки приложим давление по верхней поверхности полусферы, равное 1000000 Н/м². При номинальной площади верхней поверхности полусферы принятая нагрузка эквивалентна действию силы, равной 314,16 Н.

5.9 Решение

Так как решаемая задача относится к классу нелинейных задач, то ее основной проблемой является сходимость решения. Существует несколько способов достижения сходимости решения. Важнейшими, из которых являются качество сетки и принятые ограничения. По мнению экспертов Ansys, плавное приложение нагрузки также является одним из эффективных способов решения проблемы сходимости расчёта. Это легко реализуется, если в настройках расчета во вкладке «Basic» задать ненулевое значение для параметра «Time at end of loadstep» и в этом же блоке параметров задать число подшагов, равное 20 (рисунок 5.31). Также выбрать опцию «Frequency» и задать вариант «Write every substep». Вызов этого окна осуществляется из главного меню: «Main menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls».

Analysis Options Small Displacement Static Calculate prestress effects Time Control Time at end of loadstep Automatic time stepping Prog Chosen © Number of substeps C Time increment Number of substeps Max no. of substeps 0 Min no. of substeps	Write Items to Results File All solution items Basic quantities User selected Nodd Peston Loads Element Nodd Stesses Frequency: Write every substep where N = 1
--	--

Рисунок 5.31 – Диалоговое окно «Solution Controls»

5.10 Анализ результатов расчета

В качестве типовых результатов расчета приводят следующие графические представления: контурный график (рисунок 5.32), состояние контакта контактной

пары (рисунок 5.33), значение контактного проникания (рисунок 5.34), график контактного давления (рисунок 5.35), величина зазора в контактной паре (рисунок 5.36), величина скольжения в контактной паре (рисунок 5.37).



Рисунок 5.32 – Контурный график перемещений



Рисунок 5.33 – Контактное состояние



Рисунок 5.34 – Величина контактного проникания (penetration)



Рисунок 5.35 – График контактного давления



Рисунок 5.36 – Величина зазора в контактной паре



Рисунок 5.37 – Величина скольжения в контактной паре

После проведенного расчета необходимо осуществить анализ полученных результатов расчета. При этом следует помнить три основных момента: в представлении контактного состояния контактной пары должны наблюдаться четыре режима; контактное давление не должно превышать предела текучести для моделируемого материала; величина контактного проникания должна быть сопоставима с реализуемым натягом.

Для более детального представления результатов контактного взаимодействия следует использовать вызов контактного менеджера, но активация результатов расчета достигается вызовом из главного меню любой из вкладок главного постпроцессора (рисунок 5.38).

	🔨 Contact	Manager	/			
ANSYS Toolbar		Contact Surface	🖸 🖬 🕷	🔝 🗊 Result - No Mdl Cntxt	_	Contact sliding distance 🖃
SAVE_DB RESUM_DB	Contac	t Pairs		,		Modal Solution
	ID	Contact Behavior	Target	Contact	Pilot Node	💋 Contact
ANSYS Main Menu	4	Standard	Flexible	Surface-to-Surface	No pilot	🤣 Contact status
Preferences						🤣 Contact penetrati
Preprocessor						🤣 Contact pressure
Solution						Contact friction st
General Postproc						Contact total stres
Data & File Opts						😥 Contact sliding di
Results Summary						🤣 Contact gap dista
Read Results	T					🤣 Contact heat flux
Failure Criteria						🤣 Contact chatterin
Plot Results						A Contact fluid prop
						•

Рисунок 5.38 – Состояние контактного менеджера в режиме графического представления области контактного взаимодействия

Контрольные вопросы

1 Расскажите о необходимости создания регулярной конечно-элементной модели для решения контактной задачи.

2 В чем заключается идея решения контактной задачи?

3 Расскажите последовательность разработки геометрической модели.

4 Как связана работа шарикоподшипника с типовой задачей Герца о контакте двух сферических упругих тел?

5 Расскажите общую последовательность создания контактных пар.

6 По каким признакам в контактной паре выбирают «целевую» и «контактную» поверхности?

7 Что означает установка «Close gap»?

8 Расскажите назначение параметра «Normal Penalty Stiffness».

6 Расчет контактного взаимодействия полусферы с пластиной с использованием Ansys Workbench

6.1 Указания к выполнению индивидуального задания

<u>Цель</u>: формирование у обучающихся комплекса знаний, умений и получение навыков расчета контактного взаимодействия полусферы с пластиной в системе Ansys Workbench.

Задачи работы:

- 1 Разработать в САД-системе 3Д-модель полусферы и пластины;
- 2 Разработать расчетную модель полусферы и пластины в Ansys Workbench;
- 3 Выполнить расчет;
- 4 Провести анализ полученных результатов
- 5 Оформить отчет.

Ход выполнения работы:

1 Разработать 3D-модель полусферы с пластиной в Siemens NX или другой системе;

2 Создать проект в Ansys Workbench;

3 Задать материал для построения сеточных моделей;

4 Создать сеточную модель с регулярной сеткой;

5 Задать граничные условия: зафиксировать перемещения и нагрузку;

6 Задать некоторое время формирования контакта после приложения нагрузки;

7 Выполнить статический расчет (для различных вариантов контактного взаимодействия: bonded, No separation, Frictional);

8 Провести анализ результатов;

9 Оформить отчет.

Содержание отчета:

1 3D-модель полусферы с пластиной в Ansys;

2 Сеточная модель полусферы с пластиной в плоскости;

3 Сеточная 3D-модель полусферы с пластиной;

4 Вид контактной пары;

5 Контурное представление решения статической задачи.

6.2 Построение геометрической модели

Параметры круглой пластины – диаметр 50 мм, высота 5 мм. Диаметр полусферы – 20 мм.

Построение круглой пластины. При построении круглой пластины сначала строится эскиз в виде прямоугольника, а затем используется операция «Вращения» вокруг вертикальной оси (рисунок 6.1).

Построение полусферы. При построении полусферы сначала создается эскиз в виде четверти окружности с радиусом 10 мм, а затем используется команда «Вращения» вокруг вертикальной оси, совпадающей с контуром кривой эскиза (рисунок 6.2).



a)





Рисунок 6.2 – Эскиз и 3D-модель полусферы

На рисунке 6.3 приведена итоговая 3D-модель сборки, включающая круглую пластину и полусферу.

Для последующего использования модели в других системах инженерного анализа создается файл с расширением «хt».



Рисунок 6.3 – Итоговая 3D-модель сборки

6.3 Начало работы в Ansys Workbench

Ansys Workbench – это платформа ANSYS, призванная соединить различные физические модели в одном расчетном проекте. Ansys Workbench предлагает существенно более простой, чем базовый Ansys, интерфейс управления расчетным проектом. Рабочая среда Workbench использует типовые окна настроек на всех этапах моделирования от построения геометрической модели до просмотра результатов расчета.

После загрузки системы выводится основное окно системы, представленное несколькими окнами, имеющими собственные заголовки. Главными окнами системы являются: окно «Toolbox», включающее различные инструменты, позволяющие организовать конкретный проект и окно «Project Schematic» – центральное окно Workbench, содержащее все структурные единицы созданного проекта.

Центральным объектом Ansys Workbench является *проект*, который объединяет все этапы решения выбранной из Toolbox типовой задачи. Проект в общем случае может состоять из нескольких блоков, каждый из которых реализует один вид инженерного анализа. Каждый из блоков состоит из элементов –

определяющих отдельный этап решения задачи. Типовые элементы – это свойства материалов, геометрическая модель, расчетная модель и т.д.

6.4 Создание блока в Ansys Workbench

Создать новый блок можно или перетаскиванием из окна «Toolbox» соответствующего наименование задачи или просто двойным нажатием левой кнопки мыши на выбранном наименовании задачи из «Toolbox». Любое из этих действий приводит к созданию блока, представленного на рисунке 6.4.



Рисунок 6.4. – Блок «Static Structural», созданный в окне «Project Schematic»

Все компоненты блока, которые уже созданы, выделены галочкой. По умолчанию, первый элемент «Engineering Data», создается автоматически. При необходимости, двойное нажатие левой кнопки мыши на этом элементе предоставляет возможность для редактирования свойств материала.

6.4.1 Создание геометрии

Первым элементом, который следует создать пользователю системы самостоятельно – это «Geometry» или геометрическую модель решаемой задачи.

Геометрическая модель может быть создана средствами системы или импортирована из внешней CAD-системы. При этом Workbench имеет два альтернативных графических редактора или иногда их в литературе называют моделировщики: «DesignModeler» и «SpaseClaim Direct Modeler». Для того, чтобы выбрать моделировщик необходимо перейти в меню «Tools» к подменю «Options» (рисунок 6.5). Нажатие этой строки приводит к выводу окна настроек опций, в котором при выборе опции «Geomenry import» можно выбрать один из двух моделировщиков (рисунок 6.6). Далее в пособии используется «DesignModeler» (рисунок 6.7). Данный моделировщик содержит три группы подменю: основные команды, выполнение которых реализуется нажатием кнопки «Generate»; деревосхема «Tree-Outline», доступ к которому осуществляется при включенной вкладке «Modeling» (наименование вкладки содержится в нижней части «Tree-Outline») и «Details View» (ниже «Tree-Outline»).

▲ for_metodich - Workbench				
File View	Tools Units Help			
📳 New 📂 ݼ Reconnect				
Toolbox 🧭 Refresh Project				
🖃 Analysis Sy	🛛 Analysis Sy 🦩 Update Project			
🗑 Design As	License Preferences			
🙆 Electric	Launch Remote Solve Manager			
Explicit D				
Marmonic	Options			

Рисунок 6.5 – Фрагмент меню «Tools»

 Project Management Appearance Regional and Language Option Graphics Interaction Journals and Logs Project Reporting Solution Process Mechanical APDL Microsoft OfficeExcel Meshing Bengin Exploration 	Geometry Import Preferred Geometry Editor DesignModeler DesignModeler SpaceClaim Direct Modeler Release Analysis Type 3D Basic Options IV Solid Bodies IV Surface Bodies IV IV Basic Options IV Solid Bodies IV Surface Bodies IV Parameters
	Filtering Prefixes and Suffixes

Рисунок 6.6 – Окно настроек «Options»

🔯 A: Static Structural - DesignModeler				
File Create Concept Tools View Help				
] 🖄 🔚 📕 📫] 🔊 Undo 📿 Redo	Select: 🌇 🎝 🖌 🔁	🖪 🖓 -] 🕻 💠 🍳 🕀 🍭 🖳 📿 🔍 :	ॐ ⊁ 🚱 • 🕫	
	(F			
🖌 XYPlane 🔹 🤸 🕴 None 📼	趔			
📙 🧚 Generate 🖤 Share Topology 🔀 Parar	neters			
📙 💽 Extrude 🚓 Revolve 🐁 Sweep 🚯 Sk	in/Loft			
] 🛄 Thin/Surface 🛛 💊 Blend 🔻 🦴 Chamfer	< Point			
Tree Outline 4	Graphics			7
				ANSYS 14.0
Sketching Modeling				Y
Details View 4				t l
		0, <u>00</u> 50,00	100,00 (mm)	Z A X
J	Model View Print Preview			
🖉 Ready		No Selection		Millimeter 0 0

Рисунок 6.7 – Стартовый вид «DesignModeler»

Первым шагом для импорта заранее подготовленной во внешней CAD-системе модели является вызов команды «Import External Geometry File» из подменю «File». Для завершения реализации выбранной команды необходимо нажать кнопку «Generate» (рисунок 6.8).



Рисунок 6.8 – Импортированная геометрическая модель

Следующим элементом в блоке является – создание расчетной модели, для которой первоочередным шагом является построение сеточной модели. Учитывая опыт решения этого класса задач для подобной геометрии в Ansys, необходимо Для использовать только регулярную сетку. ЭТОГО следует выполнить дополнительные построения для импортированной модели. Основное назначение всех последующих построений – это разделение полусферы и круглой пластины на два симметричных сегмента. Для этого последовательно используем две команды «Share Topology» и «Slice». При их выполнении предварительно необходимо выбрать одну из существующих главных плоскостей, например, плоскость «YZPlane» и совместить главный вид с этой плоскостью, выбрав команду «Look At Face» (рисунок 6.9). В этом случае нет необходимости создавать дополнительную плоскость, совпадающую с одной из главных плоскостей системы координат и проходящей ортогонально к горизонтальной плоскости полусферы.



Рисунок 6.9 – Вызов команды «Look At Face»

Команда «Share Topology» располагается на инструментальной панели моделировщика, а команда «Slice» расположена в меню «Create» (рисунок 6.10).



Рисунок 6.10 – Меню «Slice»

Завершение каждой из названных команд реализуется её генерацией путем вызова команды «Generate».

На рисунке 6.11 представлен фрагмент дерева-схемы модели, а на рисунке 6.12 представлена итоговая модель сборки, состоящая из четырех твердотельных элементов.



Рисунок 6.11 – Фрагмент дерева «Tree Outline»



Рисунок 6.12 – Итоговая модель сборки

6.4.2 Создание модели

Завершающим шагом при создании геометрической модели является сохранение проекта в моделировщике, возврат в окно «Project Schematic» и переход к новому элементу схемы проекта «Model». Двойное нажатие на элементе схемы проекта «Model» приводит к вызову нового окна, позволяющего создать расчетную модель (рисунок 6.13).

Нанесение сетки. Создание сеточной модели можно осуществить при заданных параметрах по умолчанию. Однако, практика решения подобного класса задач показывает, что желательно использовать более мелкую сетку. На рисунке 6.14 а представлена сеточная модель, построенная при заданных параметрах по умолчанию. Её построение реализовано вызовом из контекстного меню для элемента дерева проекта «Mesh» команды «Generate Mesh» – вызов контекстного меню осуществляется по правой кнопки мыши.

Анализ полученной сеточной модели показал, что для полусферы не удалось построить регулярную сетку. Для этого на инструментальной панели следует перейти к вызову подменю: «Mesh Control > Method». После этого, используя окно настроек «Details of «Automatic Method» – Method», можно выбрать для позиции «Method» опцию «Hex Dominant». Предварительно для позиции «Geometry» в окне настроек выбрать две части полусферы с помощью мыши. После вызова команды «Generate Mesh» ИЗ контекстного меню сеточная модель получит ВИД, представленный на рисунке 6.14 б.

Чтобы измельчить построенную регулярную сетку необходимо уменьшить размер элемента с использованием опций окна настроек «Details of Mesh». Вариантов для уменьшения размеров сетки множество. Ниже приведен один из возможных (рисунок 6.15 a). Использована следующая настройка параметров сетки: для раздела настроек «Sizing» задействованы опции «Size Function» – «Uniform», а для параметра «Max Face Size» задана величина 0,001 м; для опции «Relevance Center» – «Fine». Результирующая модель представлена на рисунке 6.15 б.



Рисунок 6.13 – Базовый вид окна создания расчетной модели



Рисунок 6.14 – Базовая сеточная модель

Сеточная модель построена. На этом этап построения сеточной модели закончен и можно сохранить проект, закрыть приложение и вернуться к главному окну «Project Schematic» для создания последующих элементов блока проекта. Можно не выходить из этого приложения и продолжить создавать расчетную модель.

De	etails of "Mesh"	
Ξ	Display	
	Display Style	Body Color
Ξ	Defaults	
	Physics Preference	Mechanical
	Relevance	0
	Element Order	Program Controlled
Ξ	Sizing	
	Size Function	Uniform
	Relevance Center	Fine
	Max Face Size	1,e-003 m
	Mesh Defeaturing	Yes
	Defeature Size	Default (5,e-006 m)
	Transition	Fast
	Growth Rate	Default
	Max Tet Size	Default (1,e-003 m)
	Enable Washers	No
	Size Function Relevance Center Max Face Size Mesh Defeaturing Defeature Size Transition Growth Rate Max Tet Size Enable Washers	Uniform Fine 1,e-003 m Yes Default (5,e-006 m) Fast Default Default (1,e-003 m) No

a)



Рисунок 6.15 – Подменю «Details of Mesh» и модель с измельченной сеткой

Задание закреплений и нагрузки. Закрепления задаются традиционно для этого типа задач: нижняя плоскость жестко закрепляется. Полусфера закрепляется только по двум координатам, исключая вертикальную – по ней задается нагрузка. В дереве проекта выделяем элемент «Static Structural» – это приводит к появлению на инструментальной панели новых подменю: «Loads», «Supports» и других. Для задания закрепления необходимо использовать подменю «Supports», в котором «Fixed Support». Eë выбор приводит выбрать команду К появлению соответствующего окна настроек «Details of «Fixed Support» (рисунок 6.16), а также возможности выделения любых поверхностей модели с помощью указателя мыши и клавиши «Ctrl» (при необходимости выделения несколько поверхностей). Нажатие кнопки «Apply» приводит завершению операции закрепления нижней К поверхности. Для получения доступа к выделению отдельной поверхности модели должна быть включена соответствующая графическая настройка в базовом меню приложения – подсвеченный элемент призмы (угол, грань, плоскость или весь объем).

Для закрепления полусферы необходимо использовать в настройках выделения элемента конструкции – выделенную грань. Тогда переходя к подменю «Supports» выберем элемент «Displacement». Соответствующие настройки представлены в окне «Details of «Displacement» (рисунок 6.17). После выделения контура, принадлежащей ортогональной плоскости, проходящей через центр полусферы, нажимаем кнопку «Apply». По координате X задаем нулевые перемещения (рисунок 6.17 б). Для двух узлов на горизонтальной плоскости зададим нулевые перемещения по координате Y.

D	etails of "Fixed Su	pport"	ą.	
Ξ	Scope			
	Scoping Method	Geometry Selection		
	Geometry	Apply	Cancel	
Ξ	Definition			
	Туре	Fixed Support		
	Suppressed	No		
		a)		ნ)

Рисунок 6.16 – Подменю Details of «Fixed Support»

De	tails of "Displacement" 4								
Ξ	Scope								
	Scoping Method	Geometry Selection							
	Geometry	Apply	Cancel						
Ξ	Definition								
	Туре	Displacement							
	Define By	Components							
	Coordinate System	Global Coordinate Sy	stem						
	X Component	Free							
	Y Component	Free							
	Z Component	Free							
	Suppressed	No							

а) исходное состояние окна настроек

De	tails of "Displacement 4" 🛛 🕈						
Ξ	Scope						
	Scoping Method	Geometry Selection					
	Geometry	1 Face					
Ξ	Definition						
	Туре	Displacement					
	Define By	Components					
	Coordinate System	Global Coordinate System					
	🗌 X Component	0, m (ramped)					
	Y Component	Free					
	Z Component	Free					
	Suppressed	No					

б) рабочее состояние окна настроек

Рисунок 6.17- Окно опциональных настроек «Details of «Displacement»

Нагрузку зададим в виде давления, равного 10 МПа, на верхнюю горизонтальную поверхность полусферы: «Loads > Pressure». При этом, аналогично заданию закрепления, используем настройки «Details of Pressure». При выборе позиции окна настроек «Geometry» выделяем верхние горизонтальные поверхности

полусферы и устанавливаем необходимую величину давления в параметре «Magnitude» (рисунок 6.18).

De	etails of "Pressure"	д
	Scope	
	Scoping Method	Geometry Selection
	Geometry	2 Faces
	Definition	
	Туре	Pressure
	Define By	Normal To
	Applied By	Surface Effect
	Magnitude	1,e+007 Pa (ramped)
	Suppressed	No

Рисунок 6.18 – Рабочее состояние окна «Details of «Pressure»

4.4.3 Решение задачи

Задание настроек решателя. Рассмотрим два варианта настроек решателя. Настройки задаются с использованием элемента в дереве проекта «Analysis Settings». В первом варианте в окне настроек «Details of «Analysis Setting» для параметра «Number Of Steps» используем настройку, принятую «по умолчанию» (рисунок 6.19 а). Во втором варианте зададим 10 шагов решения (параметр «Number of Steps», рисунок 6.19 б). Сравним результаты полученных решений. Для запуска решения выделим элемент в дереве проекта «Static Structural» и при нажатии правой кнопки мыши вызовем контекстное меню, из которого запустим команду «Solve».

Анализ полученных результатов. Для получения результатов расчета необходимо перейти к элементу «Solution» и нажатием правой кнопки мыши вызвать контекстное меню, из которого вызвать подменю «Insert». Это подменю позволяет определить различные варианты результатов для последующего анализа. В частности рекомендуем вызвать следующие подменю результатов: «Deformation (Total)», «Stress (Equivalent (von- Mises)», «Contact Tool» (рисунок 6.20). После того

как задан набор типов результатов следует из контекстного меню «Solution» вызвать команду «Evalute All Results».

D	etails of "Analysis Setti	ngs"	ņ	De	tails of "Analysis Setti	ngs"	
E	Step Controls		*		Step Controls		
	Number Of Steps	1,			Number Of Steps	10	
	Current Step Number	1,			Current Step Number	1,	1
	Step End Time	1, s			Step End Time	1, s	1
	Auto Time Stepping	Program Controlled	Ξ		Auto Time Stepping	Program Controlled	Ξ
E	Solver Controls	~			Solver Controls	-	1
	Solver Type	Program Controlled			Solver Type	Program Controlled	1
	Weak Springs	Program Controlled			Weak Springs	Program Controlled	
	Large Deflection	Off	1		Large Deflection	Off	1
	Inertia Relief	Off			Inertia Relief	Off	
		a)	-	1		б)	4

Рисунок 6.19 – Два варианта настроек решателя «Details of Analysis Setting»

		ion (AC					
		Soluti	Insert	Þ		Stress Tool	÷	
De	tails of "Solution (A6)"		Clear Generated Data			Deformation Strain Stress	+ + +	
Ξ	Adaptive Mesh Refinen	nent	Open Solver Files Directory			Energy	•	
	Max Refinement Loops	1,		\ Geo		Linearized Stress	•	
	Refinement Depth	2,		Graph		Fatigue	•	
Ξ	Information							_
	Status	Don	e	ll i		Contact Tool	•	
						Probe	•	
				0		Coordinate Systems	►	
					B USER	User Defined Result		
				M	I.	Commands		

Рисунок 6.20 – Фрагмент настройки результатов расчета

Результаты для первого варианта настроек решателя. На рисунке 6.21 приведен контурный график полных деформаций модели, из которого видно, что максимальные деформации составили чуть более 5 мкм.

Эквивалентные напряжения представлены на рисунке 6.22. Оценка эквивалентного напряжения по Мизесу позволяет оценить появление пластических

деформаций. Так как в этом случае в качестве критерия используют предел текучести материала. Если расчетное значение напряжения по Мизесу равно или больше предела текучести материала, то начинается рост пластических деформаций. Например, для стали 40Х после нормализации предел текучести составляет 315 МПа, а после закалки в масле при температуре 860 °C с последующим отпуском при 500 °C – 780 МПа. Полученные результаты расчета показывают, что пластические деформации отсутствуют.



Рисунок 6.21 – Результат «Total Deformation» (Полная деформация)



Рисунок 6.22 – Контурный график эквивалентных напряжений

Анализ результатов расчета «Contact Tool». На рисунке 6.23 представлен контурный график состояния контактной пары – «Status». Выделены пять зон контакта: «Over Constrained» – над ограничением или переопределенный контакт; «Far» – далеко от контакта; «Near» – около контакта; «Sliding» – скольжение, «Sticking» (залипание или защемление). Очевидно, что проявляются четыре зоны контакта: «Far», «Near», «Sliding» и «Sticking».



Рисунок 6.23 – Результаты расчета контактного взаимодействия «Status»

Другой интересный результат, имеющий практическое значение – это «Penetration». «Penetration» означает или внедрение, или проникновение части одного материала в другой. Результаты расчета показывают, что при максимальной общей деформации чуть более 5 мкм величина внедрения материалов в контактной зоне составляет чуть более 11 нм (рисунок 6.24).

Результаты для второго варианта настроек решателя. Реализация второго варианта настроек решателя имеет смысл только при распределенной по шагам нагрузки, заданной, например, в виде таблицы (рисунок 6.25). В этом случае можно посмотреть анимацию изменения результатов расчета по шагам.



Рисунок 6.24 – Результаты расчета контактного взаимодействия «Penetration»



Рисунок 6.25 – Фрагмент задания давления, распределенного по шагам

Например, на рисунке 6.26 представлен контурный график общих деформаций для первого и последнего шагов, а на рисунке 6.27 представлен контурный график результатов расчета «Penetration» для первого и последнего шагов расчета.



Рисунок 6.26 – Контурный график общих деформаций для первого и последнего шагов решения

Следует отметить, что все выше приведенные результаты расчетов выполнены при заданных по умолчанию настроек для контактных пар.

Для контактных пар предусмотрены следующие типы контактов:

– «Bonded» – связанный контакт, зазор между телами автоматически закрывается, проникновение игнорируется;

– «No separation» – линейный контакт без разделения;

– «Frictionless» – нелинейный контакт без трения, зазор и проникновение регулируются;

- «Frictional» – нелинейный контакт с учетом трения;

- «Rough» - жесткий грубый контакт при возможном разделении тел в ходе

контакта.



а) первый шаг

б) последний



По умолчанию рассматривается контакт «Bonded». Далее рассмотрим два актуальных для машиностроительных конструкций типа контакта – «No separation» и «Frictional».

Чтобы изменить тип контакта необходимо в дереве проекта раскрыть элемент «Connections > Contacts» и последовательно выделять контактные сопряжения, например, «Bonded». При выделении контактного сопряжения в дереве проекта становятся доступны настройки подменю настроек (рисунок 6.28).

На рисунке 6.28 а представлено окно настроек для контакта «Bonded». На рисунке 6.28 б представлено окно настроек для контакта «Frictional». В этом случае становятся актуальны следующие опции для настроек: «Friction Coefficient»

(коэффициент трения), «Offset» (смещение), «Normal Stiffness» (нормальная жесткость). В этой связи появляется возможность проведения дополнительных исследований при многовариантном задании настроек «Details of «Frictional – Part 1 To Part 2»: варьирование величинами нормальной жесткости, смещения, а также приложенной нормальной нагрузки.

	Scope		T E	Scope
	Scoping Method	Geometry Selection		Scopin
	Contact	1 Face		Conta
	Target	1 Face		Target
	Contact Bodies	Part 1		Conta
ľ	Target Bodies	Part 2		Target
зİ	Definition		E	Definit
	Туре	Bonded		Туре
	Scope Mode	Automatic	1	🔲 Frie
	Behavior	Program Controlled		Scope
ľ	Trim Contact	Program Controlled		Behavi
	Trim Tolerance	1,8071e-004 m		Trim C
	Suppressed	No		Trim To
зİ	Advanced		-	Suppr
	Formulation	Program Controlled	- E	Advan
	Small Sliding	Program Controlled	-	Formu

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	Part 1
Target Bodies	Part 2
Definition	
Туре	Frictional
Friction Coefficient	0,15
Scope Mode	Automatia
	Automatic
Behavior	Program Controlled
Behavior Trim Contact	Program Controlled Program Controlled
Behavior Trim Contact Trim Tolerance	Program Controlled Program Controlled 1,8071e-004 m
Behavior Trim Contact Trim Tolerance Suppressed	Program Controlled Program Controlled 1,8071e-004 m No
Behavior Trim Contact Trim Tolerance Suppressed Advanced	Program Controlled Program Controlled 1,8071e-004 m No
Behavior Trim Contact Trim Tolerance Suppressed Advanced Formulation	Program Controlled Program Controlled 1,8071e-004 m No Program Controlled

б)

Рисунок 6.28 – Подменю настроек для контактных сопряжений

Результаты расчета для типа контакта «Frictional» представлены на рисунке 6.29-6.31.

На рисунке 6.29 представлен контурный график общих деформаций, на рисунке 6.30 – результаты расчета «Penetration», на рисунке 6.31 представлен контурный график эквивалентных напряжений по Мизесу.

Анализ полученных результатов показал наличие качественных и количественных изменений результатов расчёта. Это объясняется разными факторами: изменение геометрической модели, изменение сетки, изменение нагрузки. В данном случае при построении геометрической модели использовалось разделение контактирующих тел по двум плоскостям. Генерация сетки выполнялась с использованием настройки «Contact Sizing» (приложение Б).



Рисунок 6.29 – Контурный график общих деформаций для полусферы при использовании типа контакта «Frictional»



Рисунок 6.30 – Результаты расчета «Penetration»



Рисунок 6.31 – Контурный график эквивалентных напряжений по Мизесу

Контрольные вопросы

1 Какие типы контактов предусмотрены для контактных пар?

2 Для какого вида контактов предусмотрен тип «Bonded»?

3 Для какого вида контактов предусмотрен тип «No separation»?

4 Для какого вида контактов предусмотрен тип «Frictionless»?

5 Для какого вида контактов предусмотрен тип «Frictional»?

6 Для какого вида контактов предусмотрен тип «Rough»?

7 Расскажите о пяти зонах контакта, которые могут быть определены в ходе расчёта контактной пары.

8 Дайте общую последовательность выполнения расчёта контактной задачи в системе Ansys Workbench.
7 Исследование статических и динамических характеристик несущей системы станка

7.1 Указания к выполнению индивидуального задания

<u>Цель</u>: формирование у обучающихся комплекса знаний, умений и получение навыков исследования динамических характеристик несущей системы станка в Siemens NX.

Задачи работы:

1 Изучить методику разработки расчетной модели для построения статических и динамических характеристик в системе Siemens NX;

2 Разработать расчетную модель несущей системы станка в системе Siemens NX с использованием различных твердотельных конечных элементов;

3 Выполнить серию статических и динамических расчетов в Siemens NX;

4 Оформить отчет.

Ход выполнения работы:

1 Создать в Siemens NX с использованием приложения «Model» файл-сборки «Assembly» в виде простейшей сборки;

2 На база созданной модели создать конечно-элементную модель (КЭ-модель) с использованием приложения «Simulation» с использованием решателей «NX Nastran»;

3 На база созданной КЭ-модели создать модель-симуляцию для решателя «NX Nastran»;

4 Используя тип решателя «SOL 101», найти решение задачи статики и проверить корректность модели;

5 Используя тип решателя «SOL 103», найти собственные частоты и формы колебаний;

6 Используя тип решателя «SOL 108», найти решение;

7 Используя тип решателя «SOL 10»9, найти решение;

8 Оформить отчет.

Содержание отчета

1 Модель сборки в Siemens NX;

2 Сеточная модель;

3 Расчетная модель-симуляция для решателя «NX Nastran»;

4 Результаты решения задачи «SOL 101»;

5 Результаты решения задачи «SOL 103»: собственные частоты и формы колебаний;

6 Результаты решения задачи «SOL 108»;

7 Результаты решения «SOL 109».

7.2 Построение сеточной модели несущей системы станка

С использованием инструментов модуля «Моделирования» Siemens NX создается модель-сборка несущей системы станка, согласованной с преподавателем (рисунки 7.1 и 7.2).

7.2.1 Инициализация нового FEM-файла

После завершения создания геометрической модели сборки создается новый файл при активной вкладке «Симуляция» (рисунок 7.3). После нажатия кнопки «ОК» появляется диалоговое окно (рисунок 7.4 а), которое позволяет выбрать нужную геометрическую модель (рисунок 7.4 б). Нажатие кнопки «ОК» уже в диалоговом окне «Новая КЭ модель» приводит к инициализации нового файла с

расширением «fem» – файл конечно-элементной модели (рисунок 7.5) и файла идеализированной модели с индексом «i» по умолчанию и расширением «prt». В дереве текущей модели вкладки «Навигатор симуляции» появляется соответствующий элемент с именем этого файла (рисунок 7.5).



Рисунок 7.1 – Скриншот главного окна модуля «Моделирование» для построенной 3D-модели несущей системы станка



Рисунок 7.2 – 3D-модель несущей системы станка

аблоны					^	Просмотр
Фильтры			Единицы	Миллиметры	^	Eu/
Има	Тип	Елиницы	Зависимость	Владелец		E.W.
NX Nastran	КЭ молель	Миллим	Автономный	NT AUTH	^	
NX Nastran	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		
NX Thermal/Flow	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH		
NX Thermal/Flow	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		
NX Nastran Design	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH	E	
NX Nastran Design	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		
MSC Nastran	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH		Свойства
MSC Nastran	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		Имя: NX Nastran
Ansys	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH		Тип: КЭ модель
Ansys	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		Единицы: Миллиметры
Abaqus	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH		Последнее изменение: 09/18/2013 05:52
Abaqus	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		Описание: Пустой NX Nastran Fem
🖗 NX Электронные с	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH		
🦻 NX Электронные с	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH	*	
вое имя файла						
([<u>a</u>	
мя [fem5.fem				[\square	
апка C:\polyak\CAE N	IX\pos_CAE\			(2	
таль для ссылки						

Рисунок 7.3 – Создание нового FEM-файла для текущего файла-сборки



Рисунок 7.4 – Компоненты, сопровождающие создание новой КЭ-модели



Рисунок 7.5 – Главное окно модуля «Симуляция» при создании новой конечноэлементной модели несущей системы станка

7.2.2 Сопряжение сетки на границах сопрягаемых деталей

Для моделей сборки актуально сопряжение сетки на границах сопрягаемых деталей. Для этого предусмотрен блок команд «Сопряжение сетки», расположенных на ленточной панели (рисунок 7.5 и 7.6). В главном окне выделить рамкой всю модель и вызвать диалоговое окно «Условия сопряжения сетки» (рисунок 7.7).



Рисунок 7.6 – Фрагмент ленточной панели



а) выделенная модель

б) диалоговое окно «Условия ...»

۸

Δ

Δ

Рисунок 7.7 – Создание условий сопряжения в модели сборки

7.2.3 Нанесение сетки

Сначала создается коллектор сеток. Число коллекторов сеток совпадает с числом различающихся физических свойств. Минимальное число используемых в несущей системе станка различных материалов – два: чугун («Iron Cast») и сталь («Steel»).

Чугун используется в моделях корпусных деталей, а сталь – в моделях направляющих и шпиндельного узла.

Вызов коллектора сеток осуществляется из ленточной панели. Его вызов приводит к открытию диалогового окна «Коллектор сеток» (рисунок 7.8 a). Нажатие выделенной на рисунке пиктограммы приводит к вызову нового диалогового окна «Таблица физических свойств» (рисунок 7.8 б), которая позволяет вызвать встроенную таблицу материалов (рисунок 7.9). На рисунке 7.8 представлено создание коллектора сеток для материала сталь «ANSI_Steel_4340». Аналогично создаются коллекторы сеток для других материалов.

🗿 Коллектор сеток 🛛 🗙	PSOLID	ວ x
Топология элемента	Таблица физических свойс	тв
	Имя	OLID1
Семейство элемента	Метка 1	
Тип коллектора Сплошная	Свойства	^
Свойства	Материал	AISI_Steel_4340
Физические свойства	Задание CORDM	Задаваемый пользовател 🔽
	CORDM	Абсолютно 🔽
	Метод интегрирования	По умолчанию 🔽
Свойство тела Нет 🔽 🐯 💽 💌	Вывод напряжений	По умолчанию 🔽
	Схема интегрирования	По умолчанию 🔽
	Тип элемента	STRUCTURAL
ОК Применить Отмена		ОК Отмена
3)	б)
aj	0	J

Рисунок 7.8 – Диалоговые окна коллектора сеток и физических свойств материала

Список материалов								
исок материалов								
😽 Библиотека материалов								
Библиотеки								
Иатериалы								
Имя	Используемый	Б.,	Категория	Тип	Метка	Библиотека	Плотность (RHO)	
ABS		8	PLASTIC	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	1.05е-006кг/мм^3	
ABS-GF		8	PLASTIC	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	1.05е-006кг/мм^3	
Acetylene_C2H2_Gas		8	OTHER	Жидкость		physicalmateriallibrary.xml	Табличные дан	
Acetylene_C2H2_Liquid		8	OTHER	Жидкость		physicalmateriallibrary.xml	Табличные дан	
Acrylic		8	PLASTIC	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	1.2е-006кг/мм^3	
Air		8	OTHER	Жидкость		physicalmateriallibrary.xml	1.207е-009кг/мм	
Air_Temp-dependent_Gas		8	OTHER	Жидкость		physicalmateriallibrary.xml	Табличные дан	
AISI_310_SS		8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	7.92781е-006кг/	
AISI_410_SS		8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	7.73377е-006кг/	
AISI_SS_304-Annealed		8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	7.9е-006кг/мм^3	
AISI_Steel_1005		8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	7.872е-006кг/мм	
AISI_Steel_1008-HR		8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	7.872е-006кг/мм	
AISI_Steel_4340	×	8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	7.85е-006кг/мм^3	
AISI_Steel_Maraging		8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	8е-006кг/мм^3	
Aluminum_2014		8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	2.794е-006кг/мм	
Aluminum_5086		8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	2.66е-006кг/мм^3	
Aluminum_6061		8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	2.711е-006кг/мм	
Aluminum_A356		8	METAL	Изотропный		physicalmateriallibrary.xml	2.67е-006кг/мм^3	
Ai- C		n	OTUER	¥			τ_ζ	
		θ) I	G 🍿				
ювый материал								
un l								Изотродиций
211								изогропный
Создать								Q

Рисунок 7.9 – Таблица материалов

После создания коллекторов сеток последовательно наносится сетка для отдельных структурных элементов модели с учетом используемого материала (рисунок 7.10). Сначала на ленте выбирается панель инструментов «Сетка» (7.10 а) и вызывается диалоговое окно «3D тетраэдральная сетка» (рисунок 7.10 б). Результат представлен на рисунке 7.11. На рисунке 7.11 а представлено промежуточное состояние сеточной модели, а на рисунке 7.11 б – итоговая сеточная модель.

	ЭД 3D тетраэдральная сетка		ວ x
	Объекты для генерации сетки		٨
	* Выбрать тела (0)	-	<mark>⊕</mark>
	Свойства элемента		^
	Тип	CTETRA(10)	<u>æ</u>
	Параметры сетки		٨
	Размер элемента	100 mm 🔹 💽	1
	🛃 Сделать более регулярную сетк	у	
	Опции качества сетки		V
	Настройки сетки		V
	Опции абстракции модели		V
	Коллектор назначения		^
	Автоматическое создание		
	Коллектор сеток Solid(2)		
(A) (A)	Просмотр		^
🗞 🌈 Дополнительно	Граничные узлы	C	
Сетка 🔻	ОК	Применить Отмена	
a)		ნ)	

Рисунок 7.10 – Инструменты для построения сеточной модели

7.3 Создание файла симуляции

7.3.1 Инициализация новой симуляции

Для завершения создания расчетной модели необходимо задать условия закрепления и нагрузку. Это реализуется только в файле симуляции. Для этого сохраняется FEM-файл и переходят к созданию нового типа файла «Симуляция», имеющего расширение «sim» (рисунок 7.12). После нажатия кнопки «ОК» главного

окна интерфейса вызывается новое интерфейсное окно симуляции с активным диалоговым окном «Новая симуляция» и выводом в отдельное окно «Деталь КЭ» модели, используемой для симуляции.



а) Рисунок 7.11 – Этапы создания сеточной модели

овый						
Модель Чертеж Симу.	ляция Обрабо	тка Проверка	Концептуальна	я разработка механі	ических с	истем Структурные элементы корабля
Шаблоны					•	
Фильтры					^	⊢ <u>()</u>
			Единицы	Миллиметры		W 🔀
Имя	Тип	Единицы	Зависимость	Владелец		
💮 NX Nastran	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH	~	
🐠 NX Nastran	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		
MX Thermal/Flow	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH		
🥰 NX Thermal/Flow	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		
🍘 NX Nastran Design	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH	E	
🥰 NX Nastran Design	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		
🝘 MSC Nastran	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH		Своиства
😼 MSC Nastran	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		Имя: NX Nastran
💮 Ansys	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH		Тип: Симуляция
🚭 Ansys	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		Единицы: Миллиметры
💮 Abaqus	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH		Последнее изменение: 09/18/2013 05:52
🥵 Abaqus	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH		Описание: Пустой NX Nastran Sim
🍘 NX Электронные с	КЭ модель	Миллим	Автономный	NT AUTH		
🥵 NX Электронные с	Симуляция	Миллим	Автономный	NT AUTH	-	
Новое имя файла						^
Mur aimfain				(<u>a</u>	
MNN SIMO.SIM				[
Папка C:\polyak\CAE_N	IX\pos_CAE				2	
Леталь для ссылки						
детало дряг ссоблют						
Имя						
						ОК Отмена

Рисунок 7.12 – Инициализация нового файла симуляции

В диалоговом окне «Новая симуляция» (рисунок 7.13) в блоке диалогового окна «Имя симуляции» содержится имя нового файла симуляции. В блоке «Связанная КЭ модель» содержится имя файла конечно-элементной модели. После нажатия кнопки «ОК» диалогового окна «Новая симуляция» выпадает диалоговое окно «Решение» («SOL 101», рисунок 7.14).



Рисунок 7.13 – Главное диалоговое окно симуляции

7.3.2 Создание закреплений и нагрузки

Чтобы решить задачу статики никаких дополнительных опций в диалоговом окне «Решение» (рисунок 7.14) задавать не требуется, но необходимо задать граничные условия в виде ограничений степеней свободы (рисунок 7.15). Простейший тип ограничений – «Заделка». Для ее применения необходимо на панели инструментов «Нагрузки и условия» выбрать инструмент «Тип

ограничения» (рисунок 7.15 а) – это приведет к раскрывающемуся подменю, из которого следует выбрать требуемый вариант ограничения (рисунок 7.15 б).

Решение	ى د
ешение	
Iмя Solution 1	
ewa NX NASTRAN	
ип а Структурный	
D те/ Нет	
ип pSOL 101 Линейная статика - Общие о	граничения
🛛 Автоматическое создание шага или под	класса
ОL 101 Линейная статика - Общие огранич	ения
	Просмотр
Управление выполнением Настрой	йки расчета База данных Параметры
Общий	Управление файлами
Описание	
Системные параметры	Нет 🔽 🎮
🔲 Итерационный решатель элемента	
Опции итерационного решателя	Нет 💌 🖷 💌
Игнорировать температурную зависим	лость материала
Начальные температуры по умолчанию (TEM C - 🕨
Температуры материала по умолчанию (1	TEM C - 🕨
Понимать CGAP как линейные контакт	тые элементы
Параметры кругового маршрута	Нет 🔽 🌆 💌
Переменные проверки граничных услов	зий 🗸 🗸
Выполнить задачу	

Рисунок 7.14 – Диалоговое окно «Решение»



Рисунок 7.15 – Фрагмент ленточной панели и панель всех типов ограничений

После этого в навигаторе симуляции появляется активный элемент «Контейнер ограничения» (рисунок 7.16).



а) Фрагмент



б) Узел-заделка «Навигатора симуляции»

Рисунок 7.16 – Реализация типа ограничения «Заделка»

Кроме ограничения «Заделка» для моделирования несущей системы станка наиболее интересным является упругое соединение, которое можно моделировать традиционным способом: создать копию узла; связать узлы «1D» элементом типа «CELAS» (рисунок 7.17).

ы 1D соединение З 🗙	
Тип	
_# * Узел к узлу	
1сходный	
🖌 Выбрать узел (1)	
Метки узла 🗸	
ель	
🗸 Выбрать узел (1)	
Метки узла	Ассоциативные данные сетки
Метки	
оединительный элемент	Свойства элемента
Свойства элемента	Тип пружины
Тип 🔀 CELASI	
Коллектор назначения	Конец компонента А
Автоматическое создание	Конец компонента В Z
Коллектор сеток Celas1 Collector(1)	
Летка	Восстановить значения по умолчанию
Метка 10027 🔿	
ОК Применить Отмена	ОК Отмена
2)	5)
aj	0)

Рисунок 7.17 – Создание упругого соединения

Задание нагрузки. В Siemens NX предусмотрены различные типы нагрузки (рисунок 7.18). При моделировании процесса резания необходимо задать компоненты сил резания на шпиндель и стол с учетом знаков (рисунок 7.19).



Рисунок 7.18 – Фрагменты инструментальной панели «Нагрузки и условия» и различные типы нагрузок, реализуемые в системе

Сила Х Тип ▲ Гапка назначения ✓ Объекты модели ▲ Объекты модели ▲ Ссылка на группу ✓ Выбрать объект (1) ✓ Исключенный ✓ Величина ▲ Сила Выражение 2000 № Направление ▲	
Метод Вдоль вектора (FORCE)	
✓ Задать вектор	K S B
Распределение	
Имя карты FORCE/FORCE1/FORCE2	
ОК Применуть Отмена	
a)	ნ)

Рисунок 7.19 – Реализация нагрузки «Сила», приложенной к шпинделю

После задания всех ограничений и нагрузок дерево модели в навигаторе симуляции принимает вид, представленный на рисунке 7.20.



Рисунок 7.20 – Фрагмент дерева модели в навигаторе симуляции

7.4 Решение и анализ результатов

Вызов команды «Решить» приводит к появлению «Навигатора постпроцессора». Для оценки жесткости станка актуально проведение анализа перемещений (рисунок 7.21).



Рисунок 7.21 – Фрагмент дерева модели в навигаторе постпроцессора

На рисунке 7.22 представлен фрагмент графического окна системы с контурным представлением результатов расчета.



Рисунок 7.22 – Фрагмент главного окна системы с контурным представлением результатов расчета

7.5 Модальный расчет

Решатель «NX Nastran» предусматривает три типа решения динамических задач. Базовым типом является определение собственных частот и форм свободных колебаний без учета демпфирования – «SOL 103».

7.5.1 Общие замечания

В решателе «NX Nastran» используются семь приближенных методов для расчета собственных значений. Выбор подходящего, наиболее эффективного метода зависит от ряда факторов, таких как размер расчетной модели, число искомых собственных значений, объем оперативной памяти, степень сингулярности матрицы масс.

Алгоритмы нахождения собственных значений делятся на две группы: итерационные методы и методы преобразований подобия, или методы приведения.

К первой группе методов относятся: обратно-степенной и модифицированный обратно-степенной методы.

Во вторую группу входят: метод Гивенса; модифицированный метод Гивенса; метод Хаусхолдера; модифицированный метод Хаусхолдера.

Особняком стоит метод Ланцоша, сочетающий в себе все плюсы итерационных методов и методов приведения.

Итерационные методы полезны и эффективны для определения наименьшего и наибольшего собственных значений, при этом возможна потеря некоторых форм колебаний.

Методы приведения сложнее и требуют больших вычислительных мощностей, но при этом позволяют определять собственные частоты и формы колебаний без потерь.

Однако при решении большинства задач рекомендуемым методом решения спектральной задачи является метод Ланцоша.

При использовании приложения «NX Расширенная симуляция» («NX Advanced Simulation») метод Ланцоша используется по умолчанию.

Основными требованиями при применении данного метода являются: неотрицательная матрица масс, симметричность матрицы жесткости. Метод Ланцоша не теряет собственных значений и имеет все преимущества итерационных методов. Следует отметить, что, в отличие от других, метод Ланцоша постоянно совершенствуется, повышается его производительность, поэтому он является рекомендуемым для модального анализа средних и больших расчетных моделей.

Необходимо упомянуть, что существует возможность поиска собственных частот и форм свободных колебаний с учетом предварительного напряженного состояния конструкции, что может привести к изменению матрицы жесткости. В этом случае решение будет включать два шага решения. Первый шаг соответствует линейному статическому анализу конструкции «Solution 1» – «Subcase – Static Load 1». Второй шаг – определение собственных частот и форм колебаний предварительно нагруженной конструкции, чему соответствует «Solution 2» – «Subcase – Eigenvalue Method 1».

7.5.2 Новое решение «SOL 103 Действительные собственные значения»

В дереве модели во вкладке «Навигатор симуляции» после нажатия правой клавишей мыши на имени sim-файла (первая строчка в дереве модели) и выбора из контекстного меню команды «Новое решение» появится диалоговое окно «Решение» (рисунок 7.23) в качестве «Типа решения» следует выбрать «SEL 103».

В диалоговом окне можно изменить имя решения на *Modal Analysis* и нажать «ОК». Это приводит к появлению диалогового окна «Шаг решения» (рисунок 7.24).

В диалоговом окне «Шаг решения» напротив параметра «Данные Ланцоша» необходимо вызвать команду «Создание объекта моделирования» (рисунок 7.24). Появившееся диалоговое окно «Real Eigenvalue – Lanczos1» позволяет задать набор параметров для расчета частот (рисунок 7.25).

Особенностью реализации NX является необходимость обновления контейнера «Ограничения» в текущем решении. Для этого необходимо перейти к контейнеру «Ограничений» в дереве модели во вкладке «Навигатор симуляции» и перетащить содержимое в соответствующий контейнер «Ограничения» нового решения.

161

🕸 Решение	ວ 🗙
Решение	^
Имя Solution 2	
Реша NX NASTRAN	
Тип а Структурный	
2D те/ Нет	
Тип р SOL 103 Действительные собственные зн	ачения
Автоматическое создание шага или подкла	сса
SOL 103 Действительные собственные значения	۸ ۸
	Просмотр
Управление выполнением Настройки	расчета База данных Параметры
Общий	Управление файлами
Описание	
Системные параметры	Нет 🔽 👰 🔽
Игнорировать температурную зависимост	гь материала
Начальные температуры по умолчанию (ТЕМ	AC-♥
Температуры материала по умолчанию (TEN	1 C - 🕨
Параметры кругового маршрута	Нет 🔽 🖓 🔽
Выполнить задачу	E
Переменные проверки граничных условий	^
Расчетное время	0 sec • 🗣
Расчетная частота	0 Hz 🔹
Расчетная температура	20 C - 🐳
Процесс решения	^
Процесс решения	Нет 🔽 🔻
	ОК Применить Отмена

Рисунок 7.23 – Диалоговое окно «Решение» («SOL 103»)

Шаг решения	ວ 🗙
Решение	^
Имя Subcase - Eigenvalue Method	1
Тип pr NX NASTRAN	
Тип а Структурный	
Решен SOL 103 Действительные соб	оственные значения
Шаг Subcase - Eigenvalue Method	
Свойства	•
Описание	
Использовать имя шага как мет	ky
Метка	
Запросы вывода	Нет 🔽 🔪 🖓 🔽
Метод собственных значений	Ланцош
🞸 Данные Ланцоша	Real Eigenvalue - L 🔽 🔗 🍓 🗨
Пользовательский текст управлени.	я р Нет 🔽 🕅 🔽
	ОК Отмена

Рисунок 7.24 – Диалоговое окно «Шаг решения»

😧 Real Eigenvalue - La	nczos2			। S		
Объект моделирования	a			•		
Имя	Real Eigenval	ue - Lan	czos2			
Метка	4					
Свойства				•		
Описание						
Имя карты			EIGRL			
Параметры для частот						
Диапазон частот - Нижний предел 🙌 Нz 🗸 🗸						
Диапазон частот - Ве	рхний предел	_	1 000	Hz 🝷 🛃		
Число желательных г	мод		15			
Извлечение данных		/		V		
			ок	Отмена		

Рисунок 7.25 – Диалоговое окно «Real Eigenvalue»

После решения задачи, результаты решения будут отображаться в дереве модели навигатора постпроцессора (рисунок 7.26).

ø	Навигатор постпроцессора		
И	ля	Описание	
	🕀 🏪 Вращение - По узлам		*
	🗄 🗄 Напряжение - По элем		
	🗄 🗄 Напряжение - По элем		
	🗄 🗄 Сила реакции - По узл		
	🗄 🗄 Момент реакции - По у		
ė۰	🍕 🧾 Modal Analysis	NX NASTRA	-
	🕀 - Режим 1, 🖋 643е+001 Гц	3	
	⊕́ · Режим 2, 6.946е+001 Гц		
	⊕́ · Режим 3, 1.220е+002 Гц		
	⊕́ - Режим 4, 1.230е+002 Гц		
	🗄 / Режим 5, 1.511е+002 Гц		
	🏚 Режим 6, 1.655е+002 Гц		=
/	⊕́ - Режим 7, 1.800е+002 Гц		
	⊕́- Режим 8, 1.923е+002 Гц		
	🗄 - Режим 9, 2.086е+002 Гц		
	⊕́ - Режим 10, 2.208е+002 Гц		
2	Импортированные результаты		
: :	Области просмотра		
а <mark>р</mark>	Шаблоны		Ŧ
•		Þ	

Рисунок 7.26 – Диалоговое окно «Навигатор постпроцессора»

На рисунке 7.26 приведен фрагмент навигатора постпроцессора, представляющий собственные частоты системы.

На рисунке 7.27 представлены первая и вторая формы колебаний несущей системы. В отчете могут быть представлены все рассчитанные, а также выполнен их краткий анализ. Анализ должен заключаться в выявлении числа частот, проявляющихся в рабочем диапазоне режимов резания, а также влиянии колебаний на искажение формы несущей системы в зоне обработке.



Рисунок 7.27 – Формы колебаний

7.6 Частотный анализ

7.6.1 Общие положение

Частотный анализ – нахождение установившейся реакции конструкции на гармоническое возбуждение. В случае гармонического возбуждения все внешние

силы должны быть явно определены для всех частот возбуждения. Для установившегося колебательного процесса характерно, что все степени свободы системы движутся с одинаковой частотой. Как было упомянуто ранее, отклик системы может не совпадать по фазе с внешним воздействием. Причиной возникновения сдвига по фазе является наличие демпфирования.

Результаты частотного анализа находятся в комплексных числах. Существует возможность вывода как амплитуды и фазы, так и действительной и мнимой частей.

Для решения частотного анализа в решателе «NX Nastran» реализованы два метода: прямой метод – решение «SOL 108»; модальный метод – решение «SOL 111». Выбор метода зависит от размерности исследуемой системы, необходимой точности результатов, количества частот возбуждения, необходимости проведения анализа в высокочастотной области.

7.6.2 Решение «SOL 108»

При использовании метода прямого интегрирования отклик системы определяется на каждой отдельной частоте возбуждения посредством решения уравнений движения с помощью комплексной алгебры.

В решателе «NX Nastran» существуют шесть параметров выбора частот, для которых ищется решение:

- «FREQ» – задание дискретных частот возбуждения;

– «FREQ1» – определение набора частот возбуждения посредством задания начальной частоты, частотного приращения и количества частотных приращений;

– «FREQ2» – определение набора частот возбуждения посредством задания начальной, конечной частот и количества логарифмических приращений;

– «FREQ3» – задание количества частот возбуждения между двумя собственными частотами в диапазоне между начальной и конечной частотами;

 – «FREQ4» – определение набора частот возбуждения посредством задания начальной, конечной частот, диапазона в окрестности каждой собственной частоты и числа равномерно распределенных частот в этом диапазоне;

– «FREQ5» – определение набора частот возбуждения посредством задания начальной и конечной частот и набора долей от собственных частот системы.

Создадим группу из элементов и узлов, для которой назначим вывод результатов в файл «.op2». В дереве модели во вкладке «Навигатор симуляции» следует, при нажатии правой клавиши мыши на узел «Группы», выбрать «Новая группа». В появившемся диалоговом окне (рисунок 7.28) следует в поле «Метки» в области «Метки элемента» внести номера двух конечных элементов, принадлежащих торцу шпинделя. В поле «Метки» в области «Метки узла» необходимо внести несколько номеров узлов (например, трёх узлов).

😧 Новая группа	ა x
Объекты	^
🖋 Выбрать объект (1)	→
Метки элемента	٨
Метки	
Метки узла	٨
Метки	
Имя	^
Group(1)	
ОК Прим	иенить Отмена

Рисунок 7.28 – Диалоговое окно «Новая группа»

В дереве модели во вкладке «Навигатор симуляции» создадим «Новое решение». В появившемся диалоговом окне «Решение» (рисунок 7.29) в качестве «Типа решения» из выпадающего списка выберем «SOL 108 Частотная характеристика». Изменим имя решения на «Direct_frequency_response».

ешение				1
Имя Direct_frequency_response				
еша NX NASTRAN				_
Гип а Структурный				
2D те/ Нет				
Гип p SOL 108 Частотная характе	ристика			
🗸 Автоматическое создание ша	га или по	дкласса		
OL 108 Частотная характеристик	a			1
				Просмотр
Общий		Уг	правление файлам	ли
Управление выполнением	Настр	ойки расчета	База данных	Параметры
Заголовок		[
Субтитры				
🞸 Эхо-запрос к массиву данны	XIC	Bulk	Data Echo Reque 🤜	
Проверки жесткого тела		Нет		
Метод для жестких связей		Линейно	е исключение	
💉 Запросы вывода 🖉 🖉		Struct	ural Output Req 🔽	
Общие параметры склейки		Нет		
Пользовательский текст		Нет		
		L		

Рисунок 7.29 – Диалоговое окно «Решение»

Диалоговое окно «Решение» остается открытым. Для задания опций вывода результатов необходимо в диалоговом окне «Решение» во вкладке «Настройки расчета» напротив пункта «Запросы вывода» вызвать команду «Создание объекта моделирования». В появившемся диалоговом окне «Structural Output Requests2» (рисунок 7.30) следует активировать команду «Запретить всё» и задать опции:

- во вкладке «Перемещение» (рисунок 7.31 a):

а) необходимо установить флажок «Разрешить запрос DISPLACEMENT»;

б) напротив пункта «Сортировка» из выпадающего списка следует выбрать «SORT2», что отвечает за возможность работы с файлом результатов «.op2» во вкладке «Навигатор функций XY»;

в) напротив «Объект» из выпадающего списка следует выбрать «Группа (Group)»;

г) напротив пункта «Группа» из выпадающего списка следует выбрать созданную группу «Group(1)»;

- во вкладке «Напряжение» (рисунок 7.31 б):

а) необходимо установить флажок «Разрешить запрос STRESS»;

б) напротив пункта «Сортировка» также следует выбрать из списка «SORT2»;

в) напротив пункта «Объект» из выпадающего списка следует выбрать опцию «Группа»;

г) напротив «Группа» следует также выбрать созданную группу «Group(1)».

Structural Output Ke	questsz			5
Объект моделирования				
Имя Structural Output Requests2				
Иетка	5			
Свойства				
Описание				
описание				
			_	Просмотр
			P.	азрешить все
				апретить все
Результаты контактн	ого взаимодействия	Пер	емещение	Сила
Результат уплотнен	ия Результат скл	ейки	Сила в	точке сетки
Кинетическая энерги	я 📗 Модальная эфф	ективна	я масса	Силы МРС
Нелинейные напряж	сения Вектор разн	ости	Толщи	на оболочки
Силы SPC Деформа	ция 🛛 Энергия напряж	ения	Напряжен	ие Скорость
Ускорение	П	риложе	енная нагр	узка
Разрешить запрос	ACCELERATION			
Сортировка	По умо	олчанин	o	-
Способ вывода	PLOT			-
Формат данных	REAL			-
Случайные функции	Нет			~
Выбор объектов				٨
Объект	Bce			
* Группа		one		

Рисунок 7.30 – Диалоговое окно «Structural Output Requests2»

Объект моделирования Объект моделирования Имя Structural Output Requests2 Метка 5 Свойства Свойства Описание Просмотр	tput Requests2
Имя Structural Output Requests2 Имя Structural Output Метка 5 Метка 5 Свойства Свойства Свойства Описание Описание	tput Requests2
Метка 5 Свойства Л Описание Просмотр Описание (]
Свойства Свойства Свойства Описание Описание	
Описание Описание Описание	•
Описание Описание С	ا
Просмотр	
	Просмотр
Разрешить все	Разрешить все
Запретить все	Запретить все
Результат уплотнения Результат склейки Сила в точке сетки Ускорение	Приложенная нагрузка
Кинетическая энергия Модальная эффективная масса Силы МРС Результаты контактного взаимоде	йствия Перемещение Сила
Нелинейные напряжения Вектор разности Толщина оболочки Результат уплотнения Резул	пьтат склейки Сила в точке сетки
Силы SPC Деформация Энергия напряжения Напряжение Скорость Кинетическая энергия Модаль	ная эффективная масса Силы МРС
Ускорение Приложенная нагрузка Нелинейные напряжения Вен	стор разности Толщина оболочки
Результаты контактного взаимодействия Перемещение Сила Сила УСИЛЬ SPC Деформация Энергиз	а напряжения Напряжение Скорость
Разрешить запрос DISPLACEMENT	SORT2
Сортировка SORT2 Способ вывода	PLOT
Способ вывода РLОТ Формат данных	REAL
Формат данных REAL Критерий текучести	Вон-Мизес
Случайные функции Нет 🔽 Положение	Центр
Выбор объектов Л	Her
Объект Грумпа 🔽 Вывод слоя твердого композита	По умолчанию
✓ Группа Group(1)::fem5 +++ ■ Выбор объектов	2
Объект	🔺 Группа 🔽
Группа	Group(1)::fem5 🔽 +++
Отмена	Отмена



б) вкладка «Напряжение»

Рисунок 7.31 – Диалоговое окно Structural Output Requests2

В диалоговом окне «Решение» во вкладке «Параметры» следует вызвать команду «Создание объекта моделирования». В появившемся диалоговом окне «Solution Parameters1» необходимо открыть вкладку «G-H», в поле «G» необходимо задать значение коэффициента структурного демпфирования «0,08», нажать кнопку «Добавить» и нажать кнопку «ОК». Далее следует нажать «ОК» для всех диалоговых окон.

В дереве модели вкладки «Навигатор симуляции» появился узел «Direct_frequency_response», соответствующий только что созданному решению.

При частотном анализе решение осуществляется на отдельной частоте возбуждения.

Для задания частот возбуждения в дереве модели во вкладке «Навигатор симуляции» следует нажатием правой клавиши мыши на узел «Subcase – Direct Frequency 1» вызвать из контекстного меню команду «Изменить». Это приведет к открытию диалогового окна «Шаг решения». Можно изменить имя на «Direct Frequency». Напротив пункта «Частоты возбуждения» вызываем команду «Создать частоты возбуждения». В появившемся диалоговом окне «Управление объектами моделирования» следует нажать «Создать (Create)» (рисунок 7.32 а). В диалоговом окне «Forcing Frequencies» – «Direct1» задаются значения для параметров «Первая частота», «Частотное приращение», «Число приращения частоты» (рисунок 7.32 б).

		~		
Создать		~		
Тип	Частоты возбуждения – Прямая			
Имя	Forcing Frequencies - Direct1			
Метка	7			
		•Создать		
Фильтр		~		
🗌 Тип	Частоты возбуждения – Прямая			
Имя				
📃 Метка <	0			
Метка >	0			
		Фильтр		
P <	L. L. L. L. L. L. L. L. L. L. L. L. L. L			
выбор		~		
Имя	Manua Tun			
	Метка ТИП			
	Мека инп		Forcing Frequenci	es - Direct1
			Forcing Frequenci Объект моделирован	es - Direct1 ия
			Forcing Frequenci Объект моделирован Имя	es - Direct1 ия Forcing Frequencies - Direct1
			Forcing Frequenci Объект моделирован Имя Метка	es - Direct1 ия Forcing Frequencies - Direct1 7
			Forcing Frequenci Объект моделирован Имя Метка Свойства	es - Direct1 ия Forcing Frequencies - Direct1 7
Список			Forcing Frequenci Объект моделирован Имя Метка Свойства Описание	es - Direct1 ия Forcing Frequencies - Direct1 7
Список			Forcing Frequenci Объект моделирован Имя Метка Свойства Описание Список частот	es - Direct1 ия Forcing Frequencies - Direct1 7
Список			 Forcing Frequenci Объект моделирован Имя Метка Свойства Описание Список частот Из таблицы частот 	es - Direct1 ия Forcing Frequencies - Direct1 7
Список			 Forcing Frequenci Объект моделирован Имя Метка Свойства Описание Список частот Из таблицы частот Первая частота 	es - Direct1 IVIA Forcing Frequencies - Direct1 7 FREQ1 50
Список			 Forcing Frequenci Объект моделирован Имя Метка Свойства Описание Список частот Из таблицы частот Первая частота Частотное приращ 	es - Direct1 IXA Forcing Frequencies - Direct1 7 FREQ1 50 ение 2

a)

б)

Рисунок 7.32 – Настройка расчёта

После нажатия «ОК» изменится содержимое окна «Управление объектами моделирования» (рисунок 7.33).

создать			^	
Тип	Част	(Частоты возбуждения – Прямая		
Имя	Forc	Forcing Frequencies - Direct2		
Метка	8	8		
			Создать	
Фильтр			~	
🗌 Тип	ſ	астоты возбуждени	я – Прямая 🔍	
Имя	- C			
🗌 Метка <)		
📃 Метка >	ſ)		
			Фильтр	
Зыбор	1		^	
Имя	Метка	Тип		
Forcing Freque	1	Forcing Frequ.	••	
			🤌 🖹 🗙 🖪 🔕	
Список			~	
Forcing Frequenc	ies - Direct1		(the second seco	
			×	

Рисунок 7.33 – Итоговое состояние настроек окна «Управление объектами моделирования»

7.6.3. Запуск на решение

Для запуска на решение следует нажать правой клавишей мыши на «Direst_frequency_response» и выбрать в контекстном меню «Решить…» («Solve…»). В диалоговом окне «Решение» («Solution») нажмите «ОК». Вычислительный

процесс может занять несколько минут. По завершении расчета закройте все новые окна.

7.6.4 Просмотр результатов расчета

Перейдите во вкладку «Навигатор функций XY» («XY Function Navigator») панели ресурсов (рисунок 7.34).



Рисунок 7.34 – Фрагмент дерева модели в навигаторе функций ХҮ

Затем необходимо в дереве навигатора функций ХҮ перейти к соответствующему элементу результатов, нажать правую кнопку мыши и из контекстного меню выбрать команду «Загрузить» (рисунок 7.35). После этого будут загружены результаты расчётов и появятся новые элементы в дереве навигатора функций ХҮ (рисунок 7.36). Построение графиков возможно как для одного элемента, так и для нескольких. На рисунках 7.37 и 7.38 показаны два варианта представления результатов.

На рисунке 7.37 отрисовка графиков выполняется при использовании команды «Отрисовка (XY)». На рисунке 7.38 отрисовка графиков выполняется при использовании команды «Отрисовка в наборе (XY)».

Имя	Тип функции	Рассто
🗊 Файлы AFU - табличные фу	икции	
mino simo		
🚟 Пользовательский AFU		
👼 Файлы Nastran OP2 - Резули	ьтат So	
⊡ 💡 sim6		
- Pasim1-solution_1		
🞯 simt-solution_2		
🞯 sim3-solution_1		
···· @3 sim3-solution_2		
الله sim4-solution الم		
- 🞯 sim5-direct_frequency	y_resp	
- 🞯 sim5-solution_1		
🔭 sim5-solution_2		
የሚ sim6-modal_analysis		
🞯 sim6-solution_1	\backslash	
🗄 🗁 Solution 1		
🗄 🗁 Modal Analysis		
E Direct_frequency_resp	onse	
Solution 2		
🔭 Structural	*	
	🖰 Загрузить	
f(*) Математические функции	 Сведения 	
🕂 Шаблоны графика XY	🗄 Изменить настройки	единиц

Рисунок 7.35 – Фрагмент дерева навигатора функций ХҮ



Рисунок 7.36 – Фрагмент дерева навигатора функций ХҮ



Рисунок 7.37 – Амплитудно-частотные характеристики



Рисунок 7.38 – Амплитудно-частотные характеристики

Контрольные вопросы

1 Расскажите о порядке построения геометрической модели несущей системы станка.

2 Расскажите об особенностях подготовки расчетной модели-сборки.

3 Как задать в расчётной модели, представляющей собой сборку, разные материалы?

4 Расскажите как сформировать расчётную модель несущей системы станка на упругих опорах.

5 В исходных данных для проведения расчёта «SOL 103» требуется ли задание нагрузки?

6 Какие дополнительные настройки необходимо сделать для проведения модального решения?

7 Какие дополнительные настройки необходимо сделать для проведения частотного анализа?

8 Какой инструмент используется для отрисовки амплитудно-частотных характеристик?

Список использованных источников

1 Ельцов, М. Ю. Проектирование в NX под управлением Teamcenter / М. Ю. Ельцов, А. А. Козлов, А. В. Седойкин, Л. Ю. Широкова. – М. : ДМК Пресс, 2013. – 752 с.

2 Данилов, Ю. Практическое использование NX / Ю. Данилов, И. Артамонов.
 – М. : ДМК Пресс, 2011. – 332 с.

3 Малюх, В. Н. Введение в современный САПР / В. Н. Малюх. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 192 с.

4 Краснов, М. Unigraphics для профессионалов / М. Краснов, Ю. Чигишев. –М. : ЛОРИ, 2004. – 319 с.

5 Гончаров, П. С. NX для конструктора-машиностроителя. / П. С. Гончаров. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 504 с.

6 Каменев, С. В. Компьютерное моделирование и обработка данных в прикладных научных исследованиях [Текст] : учебное пособие / С. В. Каменев, К. В. Марусич; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Оренбург : Университет, 2013. – 156 с. – Библиогр.: с. 145. – Прил.: с. 146-155. – ISBN 978-5-4417-0194-5.

7 Романенко, К. С. Основы геометрического моделирования в CAD - системе Компас 3D [Текст] : учебное пособие / К. С. Романенко, А. Н. Гончаров; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Оренбург : ОГУ, 2018. – 119 с. : ил.; 2,37 печ. л. – (Новые кадры для оборонно-промышленного комплекса). – Библиогр.: с. 116-118. – ISBN 978-5-7410-1933-7.

8 Поляков, А. Н. Моделирование несущей системы станка с использованием 3D-принтера Dimension Elite [Текст] : учебное пособие / А. Н. Поляков [и др.]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Оренбург : Университет, 2014. – 135 с. : ил. – Библиогр.: с. 87-88. – Прил.: с. 89-135. – ISBN 978-5-4417-0414-4.

9 Каменев, С. В. Инженерный анализ механизмов в системе моделирования движения «Siemens NX» [Электронный ресурс] : учебное пособие / С. В. Каменев; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т». –Электрон. дан. – Оренбург : ОГУ, 2018. –1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с тит. экрана. – ISBN 978-5-7410-1965-8.. – № гос. регистрации 0321900037.

10 Поляков, А. Н. Расчет базовых деталей станков в системе ANSYS [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. Н. Поляков, С. В. Каменев; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Оренбург : ОГУ, 2006. – 112 с. – Библиогр.: с. 105. – Прил.: с. 106. – ISBN 5-7410-0106-8.

11 Поляков А. Н. Расчет несущих систем станков в САЕ-системе Ansys [Текст] : учебное пособие / А. Н. Поляков, С. В. Каменев, К. С. Романенко; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Оренбург : Университет, 2013. – 191 с. : ил. – Прил.: с. 186-190. – Библиогр.: с. 191. – ISBN 978-5-4417-0335-2.

12 Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера [Текст] : практ. руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – 2-е изд., испр. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 272 с. – Библиогр.: с. 269. – ISBN 5-354-00729-1.

13 Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров [Текст] : справ. пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с. : ил – ISBN 5-94275-048-3.

14 Каменев, С. В. Использование САЕ-системы «ANSYS» в инженерной практике [Текст] : учеб. пособие / С. В. Каменев, А. Н. Попов; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2009. – 139 с. – Библиогр.: с. 138. – ISBN 978-5-7410-0867-6.

Приложение А

(обязательное)

Термины, математическое описание топологической оптимизации

А.1 Термины

Фасета многогранника – представляет собой многоугольник, вершины которого являются вершинами многогранника, но который сам не является гранью.

Фасетное тело – тело, состоящее из фасетов (или примитивов). Поэтому фасетное тело – полое.

Конвергентное тело (в терминах Siemens NX) – представление фасетного тела в ядре твердотельного моделирования «Parasolid».

Пенализация – штраф.

Топологическая оптимизация – задача оптимального распределения материала в конструкции при заданном нагружении и принятых геометрических, технологических, конструктивных, а также критериальных ограничениях.

А.2 Математическое описание топологической оптимизации

Сегодня в современных автоматизированных системах моделирования в основном реализуют три метода топологической оптимизации: «Solid Isotropic with Penalization» (SIMP в дословном переводе «Твердый изотропный материал с пенализацией», однако, в отечественной специальной литературе обычно используют термин «Метод пенализации для твердого изотропного тела»), «Evolutionary Structural Optimization» (ESO, русский аналог «Эволюционная структурная оптимизация») и «Level-Set» («Метод установления уровня»).

В общей постановке математическая задача топологической оптимизации представляет собой минимизацию функционала на известном пространстве с набором граничных условий, в том числе и нагрузок.

Минимизация

$$\min_{\rho, x \in \Omega} f(\rho, x) \tag{A.1}$$

где $f(\rho, x) = K(\rho, x)u$

Ограничения

$$g_k(\rho, x) \le 0, k = 0, ..., m$$
, (A.2)

$$0 \le \rho_i \le 1, i = 1, \dots, N_{el}$$
, (A.3)

$$x_{lb} \le x_j \le x_{ub}, j = 1, ..., N_{node},$$
 (A.4)

где ρ, x – векторы конструктивных параметров, соответствующие плотностям и узловым координатам;

 $f(\rho, x)$ – целевая функция;

 $g_k(\rho, x)$ – ограничения типа «неравенство»;

типа «неравенство»; м – число ограничений типа «неравенство»;

 $N_{\it el}$ – число конечных элементов;

N_{node} – число узлов сеточной модели;

*x*_{*lb*}, *x*_{*ub*} – нижняя и верхняя границы варьирования узловых координат;

ρ_{*i*} – относительная плотность материала;

К(р, *x*) – матрица жесткости расчётной модели;

и – упругие перемещения расчётной модели, вызываемые действующей нагрузкой *f*.

Если при решении задачи топологической оптимизации минимизируется упругая податливость («Compliance»), что равносильно обеспечению максимальной жёсткости, то целевая функция приобретёт вид

$$f(\rho, x) = f^{T} u(\rho, x)$$
 (A.5)

Модуль Юнга каждого элемента может быть представлен в виде

$$E_{i} = E_{\min} + (E_{\max} - E_{\min})(\rho_{i})^{p},$$
 (A.6)

где ρ_i – фиктивная плотность конечного элемента $\rho_i = \rho_o x_i$;

ρ_{*o*} – плотность исходного материала;

*E*_{min} – модуль упругости некоторого «фиктивного» материала с пустотами и имеет очень малые значения, но достаточные для исключения сингулярностей в матрице жёсткости, например, сингулярное число не должно быть меньше 10е-6;

*E*_{max} – максимальное значение модуля упругости распределённого материала модели;

p – фактор пенализации или штрафа, иногда называют коэффициент отбраковки, обычно принимается равным 3 или 5.

При использовании метода пенализации для твёрдого изотропного материала создаётся поле виртуальной плотности материала, приводящей к уменьшению податливости конструкции. Назначение метода состоит в уменьшении податливости конструкции вследствие перераспределения материала по объему конструкции при заданных граничных условиях. Реализация метода позволяет сформировать равнопрочную конструкцию. В качестве расчётного параметра рассматривается плотность материала.
Приложение Б

(справочное)

Контактная пара «Frictional»

Б.1 Задание контактных пар

Для создания контакта «Frictional» необходимо с инструментальной панели вызвать меню «Contact», в котором использовать контакт «Frictional» (рисунок Б.1). После этого необходимо в окне настроек последовательно задать поверхности для «Target» и «Contact». После этого подтвердить выбор нажатием кнопки «Apply» (рисунки Б.2 и Б.3).





Details of "Frictional - No Selection To No Sel 👎				
Ξ	Scope			
	Scoping Method	Geometry Selecti		
	Contact	No Selection		
	Target	Apply	Cancel	
	Contact Bodies	No Selection No Selection		
	Target Bodies			
	Target Contact Bodies Target Bodies	Apply No Select No Select	Cancel ction ction	

a)



Рисунок Б.2 – Задание поверхностей «Target»



Рисунок Б.3 – Задание поверхностей «Contact»

Дополнительно в окне настроек для параметра «Friction Coefficient» задать величину 0,15 (или другую, в зависимости от реализуемого контакта).

Б.2 Нанесение сетки со сгущением к центру

Выбор метода формирования сетки. Предлагается использовать «Hex Dominant». Для этого в окне настроек «Detail of «Automatic Method» из списка выбрать опцию «Hex Dominant».

Учитывая, что рассматривается контактная задача, выберем из меню «Mesh Control» на инструментальной панели настройку «Contact Sizing» (рисунок Б.4).



Рисунок Б.4 – Использование настройки «Contact Sizing»

На рисунке Б.5 приведена итоговая сеточная модель.



Рисунок Б.5 – Итоговая модель