

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Транспортные и технологические машины»

САПР САЕ СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2025

УДК 004.94:621
ББК 32.973-02:34.42
С19

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Транспортные и технологические машины»
«24» декабря 2024 г., протокол № 5

Составитель ст. преподаватель Ю. С. Романович

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. Е. Науменко

Методические рекомендации разработаны в соответствии с учебной программой дисциплины «САПР САЕ средства оптимизации» для студентов специальности 7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении» очной и заочной форм обучения и предназначены для использования при выполнении лабораторных работ.

Учебное издание

САПР САЕ СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ

Ответственный за выпуск	И. В. Лесковец
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2025

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Подготовка средствами CAD геометрической модели для параметрической оптимизации	5
2 Лабораторная работа № 2. Подготовка средствами DesignModeler геометрической модели для параметрической оптимизации	9
3 Лабораторная работа № 3. Построение плана и проведение виртуального эксперимента средствами ANSYS Workbench.....	11
4 Лабораторная работа № 4. Прямая параметрическая оптимизация средствами ANSYS Workbench.....	13
5 Лабораторная работа № 5. Параметрическая оптимизация на основе поверхности отклика средствами ANSYS Workbench	15
6 Лабораторная работа № 6. Подготовка геометрической модели к проведению топологической оптимизации	17
7 Лабораторная работа № 7. Топологическая оптимизация по критерию максимальной жесткости.....	19
8 Лабораторная работа № 8. Топологическая оптимизация несущей системы тягово-транспортной машины	21
Список литературы	24

Введение

Целью учебной дисциплины «САПР САЕ средства оптимизации» является формирование специалистов, умеющих обоснованно и результативно применять существующие и осваивать новые знания при проведении оптимизации конструкций транспортно-технологических комплексов средствами САПР.

Задачами учебной дисциплины являются получение углубленных знаний работы в САЕ-среде и овладение вычислительными алгоритмами оптимизации конструкций ТТМ.

Оптимизация – один из этапов процесса разработки, т. е. жизненного цикла продукции, а поэтому технологии оптимизации относят к средствам автоматизированного проектирования. Оптимизация конструкции требует ее параметризации, дающей возможность рассматривать альтернативные варианты, изменяя значения параметров.

Большинство задач оптимизации ставятся вместе с ограничениями, которые могут быть трех типов.

Ограничения первого типа задают область определения переменных оптимизации. Эти ограничения легко выполнить, потребовав, чтобы в процессе поиска переменные не выходили за установленные рамки.

Ограничения второго типа – равенства сокращают размерность пространства решений. Лучшим методом обработки этих ограничений является исключение переменных алгебраическим путем. Однако метод исключения переменных применим только до тех пор, пока уравнения ограничений допускают решение относительно независимых переменных. При наличии нескольких ограничений процесс исключения может стать достаточно громоздким. В некоторых случаях явное решение уравнений может оказаться невозможным. Альтернативой выступает использование штрафных функций.

К третьему типу относятся ограничения-неравенства. Стандартный подход к задачам оптимизации с такими ограничениями состоит в том, чтобы изменить целевую функцию для учета влияния этих ограничений. Целевая функция модифицируется добавлением штрафной функции, увеличивающей ее на большую величину при нарушении ограничений. Идея всех методов штрафных функций проста: при нарушении ограничения к целевой функции добавляется бесконечно большое число, в противном случае (ограничение не нарушено) целевая функция остается прежней.

После выполнения лабораторной работы студент оформляет отчет, содержащий цель работы, постановку задачи с исходными данными, необходимые эпюры результатов и диаграммы, анализ полученных результатов и выводы.

1 Лабораторная работа № 1. Подготовка средствами CAD геометрической модели для параметрической оптимизации

Цель работы: получить практические навыки подготовки геометрических моделей для проведения параметрической оптимизации средствами SpaceClaim.

1.1 Общие сведения

ANSYS Workbench позволяет автоматизировать процесс оптимизации, используя параметрические и моделирующие функции программы, а также ее способности автоматической регенерации модели. Для этого используются модули из раздела Design Exploration панели Toolbox проекта ANSYS Workbench (рисунок 1.1).

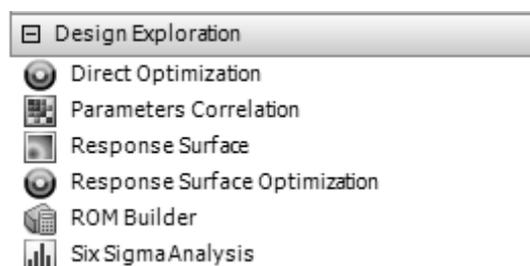


Рисунок 1.1 – Модули для выполнения исследований и оптимизации

Оптимизационные исследования требуют наличия управляемых параметров, ограничений и функций отклика. Для получения последних необходимо выполнить соответствующий анализ модели. Например, для оптимизации значения резонансных частот необходимо предварительно выполнить частотный (модальный) анализ, который даст информацию о собственных частотах конструкции.

1.2 Порядок выполнения работы

Создать новый проект ANSYS Workbench и поместить в рабочую область шаблон линейного статического анализа (Static Structural). В раздел геометрии подключить файл cantilever_bracket.scdoc и открыть его в редакторе SpaceClaim для редактирования.

Модель представляет собой консольный кронштейн, закрепленный по левому торцу и нагруженный по верхней полке давлением величиной 5 МПа (рисунок 1.2). Кроме того, для выполнения параметрической оптимизации требуется создать три управляемых параметра DV1–DV3 (см. рисунок 1.2). Для этого необходимо выбрать инструмент «Вытянуть» (Pull), выделить вертикальную грань прорези, во всплывшей панели вспомогательных настроек выбрать опцию «Линейка» (Ruler) и указать левую торцовую грань. Будет создан размер, равный 50 мм. Для его параметризации следует щелкнуть по символу «P» рядом с размером (рисунок 1.3).

В панели «Группы» (Groups) будет создан управляющий размер, который

необходимо переименовать в DV1.

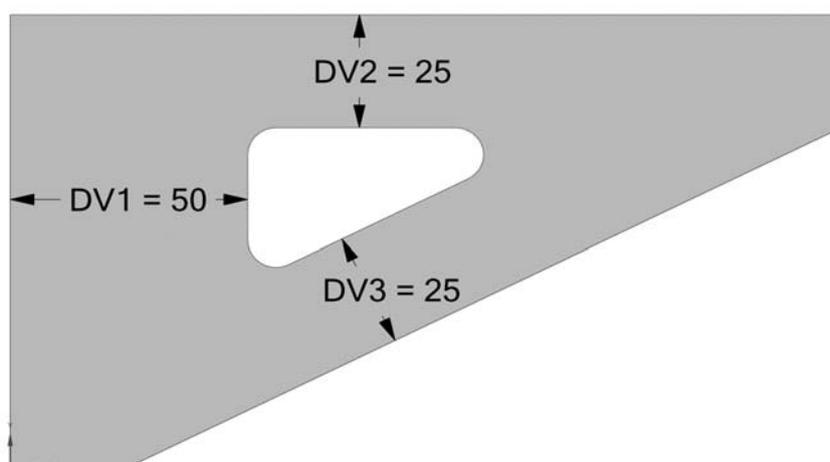


Рисунок 1.2 – Консольный кронштейн с исходными параметрами

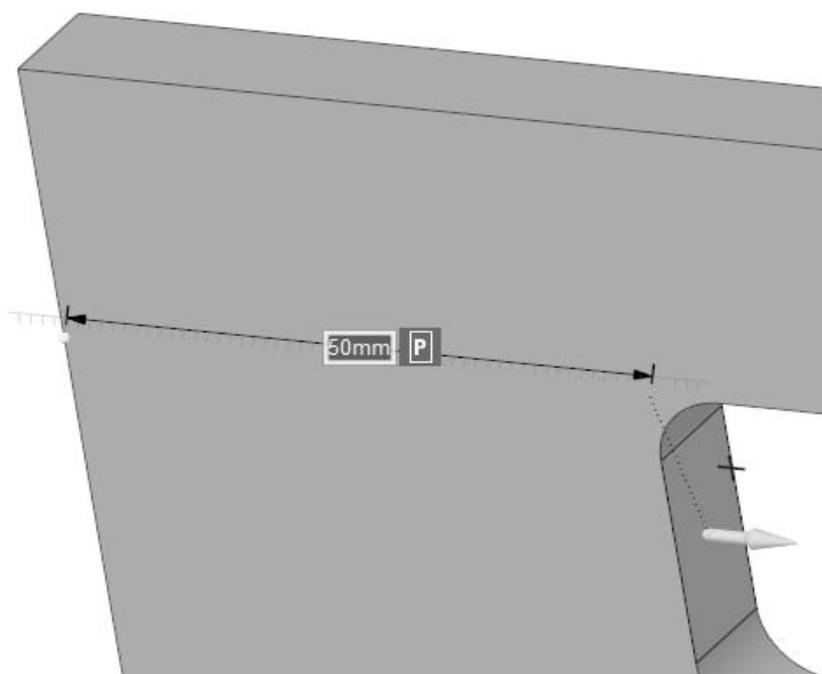


Рисунок 1.3 – Создание первого управляемого параметра DV1

Аналогичным образом создать управляющие размеры DV2 и DV3.

Для получения выходных параметров следует создать расчетную сетку конечных элементов, приложить граничные условия и нагрузки. Для того чтобы избежать концентрации напряжений в зоне крепления кронштейна, вместо жесткой заделки Fixed Support использовать удаленное перемещение Remote Displacement с опцией Behavior = Deformable (рисунок 1.4).

Добавить в проект систему модального анализа, сделав ячейки Engineering Data, Geometry и Model общими с ячейками статического анализа. Закрепить модель, внешнюю нагрузку не задавать. В настройках анализа запросить вычисление одной собственной частоты.

+ Scope	
- Definition	
ID (Beta)	66
Type	Remote Displacement
<input type="checkbox"/> X Component	0. mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0. mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0. mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Rotation X	0. ° (ramped)
<input type="checkbox"/> Rotation Y	0. ° (ramped)
<input type="checkbox"/> Rotation Z	0. ° (ramped)
Suppressed	No
Behavior	Deformable
+ Advanced	

Рисунок 1.4 – Настройки удаленного перемещения Remote Displacement

Запустить статический и модальный анализ на выполнение. По результатам создать эпюры эквивалентных напряжений, суммарных перемещений и первой собственной формы колебаний. Сделать эти результаты выходными параметрами, установив напротив них флажки с символом «P» (рисунок 1.5). Таким же образом создать выходной параметр для массы геометрической модели.

- Scope		- Scope		- Scope	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies	Geometry	All Bodies	Geometry	All Bodies
- Definition		- Definition		- Definition	
Type	Total Deformation	Type	Equivalent (von-Mises) Str...	Type	Total Deformation
By	Time	By	Time	Mode	1.
<input type="checkbox"/> Display Time	Last	<input type="checkbox"/> Display Time	Last	Identifier	
Calculate Time History	Yes	Calculate Time History	Yes	Suppressed	No
Identifier		Identifier		- Results	
Suppressed	No	Suppressed	No	<input type="checkbox"/> Minimum	0. mm
- Results		+ Integration Point Results		<input type="checkbox"/> Maximum	90.7259 mm
<input type="checkbox"/> Minimum	2.73316e-005 mm	- Results		<input type="checkbox"/> Average	23.456 mm
<input checked="" type="checkbox"/> Maximum	8.16694e-002 mm	<input type="checkbox"/> Minimum	0.102947 MPa	Minimum Occurs On	Geom\cantilever_bracket
<input type="checkbox"/> Average	2.72341e-002 mm	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum	88.3239 MPa	Maximum Occurs On	Geom\cantilever_bracket
Minimum Occurs On	Geom\cantilever_bracket	<input type="checkbox"/> Average	22.8803 MPa	- Information	
Maximum Occurs On	Geom\cantilever_bracket	Minimum Occurs On	Geom\cantilever_bracket	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency	363.007 Hz
+ Information		Maximum Occurs On	Geom\cantilever_bracket		
		+ Information			

Рисунок 1.5 – Создание выходных параметров по результатам расчета

После выполнения указанных действий должны быть созданы входные параметры DV1–DV3 и выходные параметры: максимальные эквивалентные напряжения, максимальные суммарные перемещения, значение первой собственной частоты и массы модели (рисунок 1.6).

В результате схема проекта должна выглядеть, как показано на рисунке 1.7. Сохранить проект, сделать выводы, оформить отчет.

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	[-] Input Parameters			
3	[-] [3D] Geometry (A1)			
4	[p] P1	DV1	50	mm [v]
5	[p] P2	DV2	25	mm [v]
6	[p] P3	DV3	25	mm [v]
*	[p] New input parameter	New name	New expression	
8	[-] Output Parameters			
9	[-] [zzz] Static Structural (B1)			
10	[p] P4	Total Deformation Maximum	0.0816694	mm
11	[p] P5	Equivalent Stress Maximum	88.3239	MPa
12	[p] P7	cantilever_bracket Mass	0.848978	kg
13	[-] [zzz] Modal (C1)			
14	[p] P8	Total Deformation Reported Frequency	363.007	Hz
*	[p] New output parameter		New expression	
16	Charts			

Рисунок 1.6 – Набор параметров для выполнения оптимизации

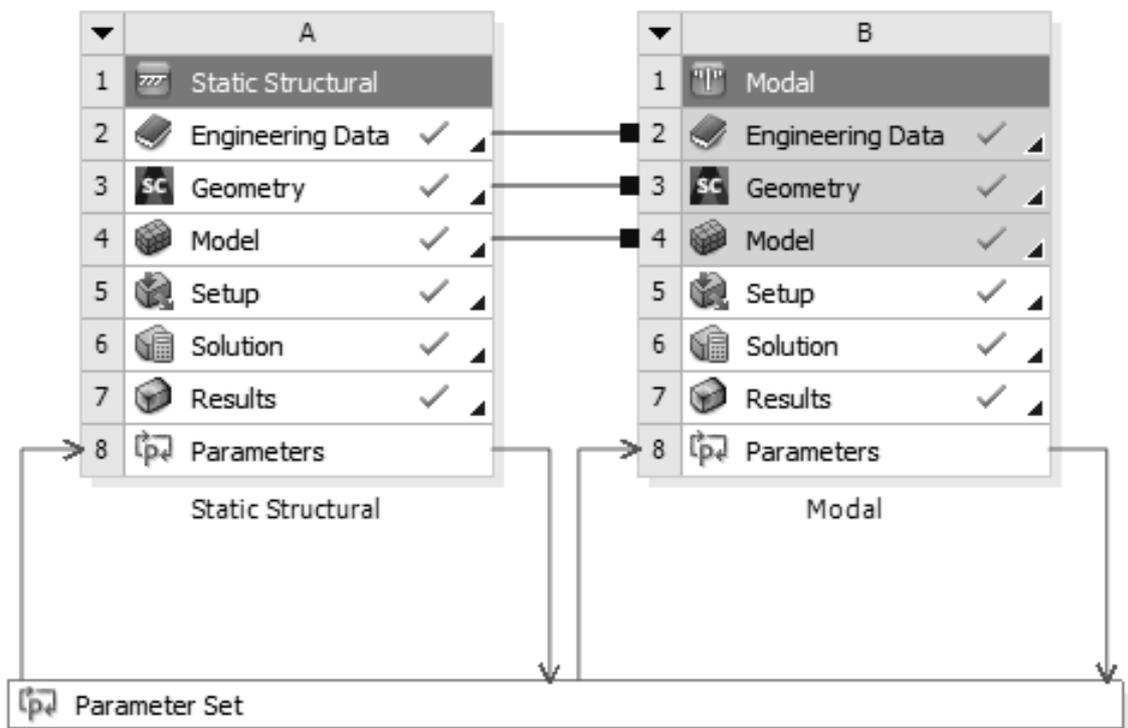


Рисунок 1.7 – Схема проекта с входными и выходными параметрами

Контрольные вопросы

- 1 Порядок создания управляемых параметров модели.
- 2 Порядок создания выходных параметров модели.

2 Лабораторная работа № 2. Подготовка средствами DesignModeler геометрической модели для параметрической оптимизации

Цель работы: получить практические навыки подготовки геометрических моделей для параметрической оптимизации средствами DesignModeler.

2.1 Общие сведения

В основе DesignModeler лежит принцип параметрического моделирования на основании предыстории (history-based parametric workflow), который предполагает создание геометрической модели путем описания последовательности преобразований геометрии. Процесс работы с геометрической моделью построен на использовании объектно-ориентированных средств управления. Этапы работы с геометрической моделью имеют структурное представление в виде дерева. Для каждого объекта в дереве возможен доступ к заданию и редактированию его свойств.

DesignModeler позволяет создавать геометрию различных типов: объемные тела, поверхности (оболочки) и линейные тела. Модуль имеет эффективные инструменты параметризации моделей. Кроме того, DesignModeler предоставляет широкий выбор инструментов для исправления дефектной геометрии и доработки модели.

2.2 Порядок выполнения работы

Создать новый проект ANSYS Workbench и поместить в него шаблон статического анализа. В раздел геометрии подключить файл cantilever_bracket.agdb и открыть его для редактирования с помощью DesignModeler.

В дереве конструирования выделить эскиз Sketch1 и в окне Details View установить флажок «P» напротив размера «H6». В появившемся окне переименовать параметр, назвав DV1, и нажать кнопку ОК (рисунок 2.1). Аналогичным образом создать параметры для размеров «V7» (DV2) и «L8» (DV3) (рисунок 2.2).

Так же, как и в лабораторной работе № 1, добавить шаблон частотного анализа, создать расчетную сетку, задать граничные условия и нагрузки и выполнить расчеты. В качестве выходных параметров выбрать массу модели, максимальные перемещения, максимальные эквивалентные напряжения и первую собственную частоту.

Сохранить проект, сделать выводы, оформить отчет.

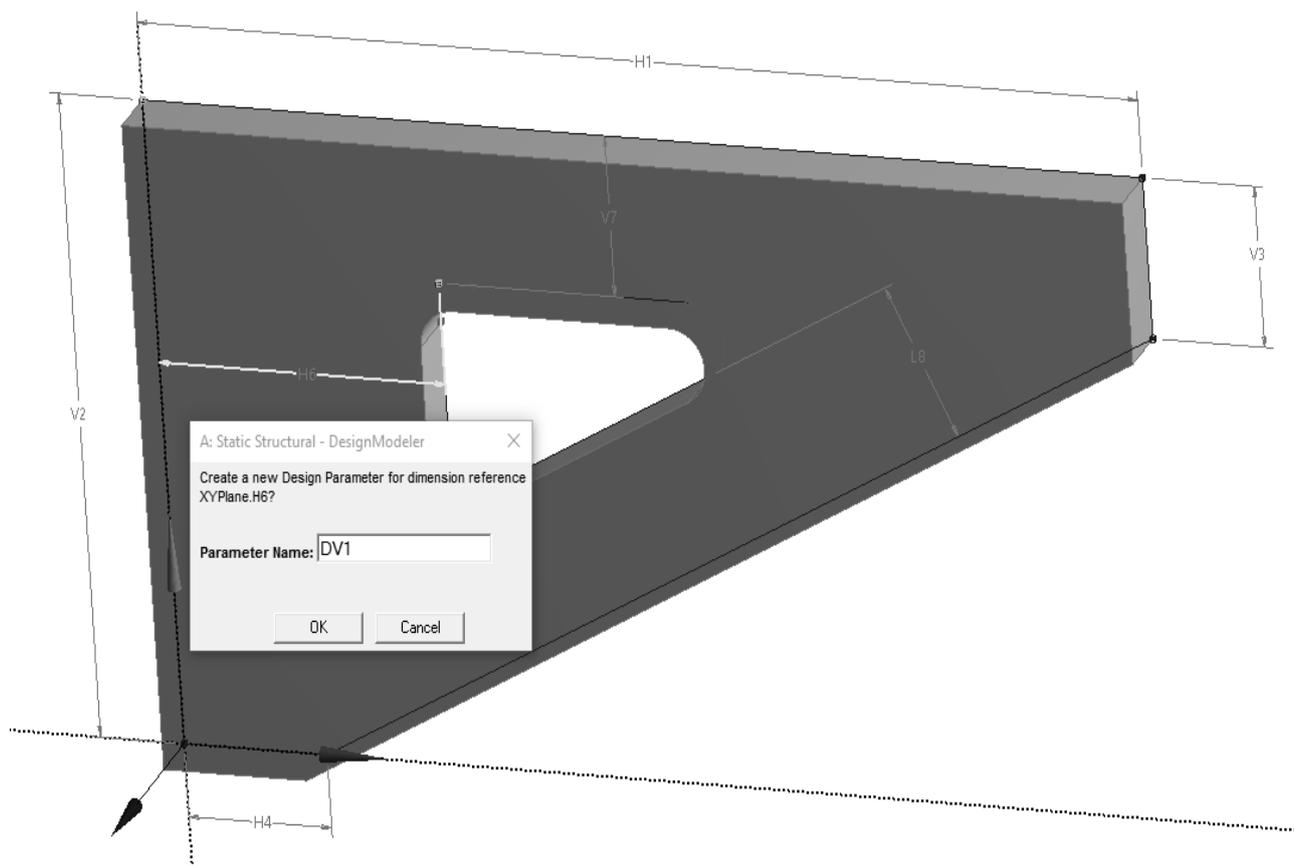


Рисунок 2.1 – Создание первого управляемого параметра DV1

Details View	
Details of Sketch1	
Dimensions: 7	
<input type="checkbox"/> H1	175 mm
<input type="checkbox"/> H4	25 mm
<input checked="" type="checkbox"/> H6	50 mm
<input checked="" type="checkbox"/> L8	25 mm
<input type="checkbox"/> V2	100 mm
<input type="checkbox"/> V3	25 mm
<input checked="" type="checkbox"/> V7	25 mm

Рисунок 2.2 – Размеры модели, выбранные в качестве управляемых параметров

Контрольные вопросы

- 1 Порядок создания управляемых параметров с помощью DesignModeler.
- 2 Особенности построения геометрических моделей с помощью редактора DesignModeler.

3 Лабораторная работа № 3. Построение плана и проведение виртуального эксперимента средствами ANSYS Workbench

Цель работы: получить практические навыки построения плана и проведения вычислительного эксперимента средствами ANSYS Workbench.

3.1 Общие сведения

ANSYS Workbench позволяет автоматизировать процесс оптимизации, используя параметрические и моделирующие функции программы, а также ее способности автоматической регенерации модели. Для этого используются модули из раздела Design Exploration панели Toolbox проекта ANSYS Workbench (рисунок 3.1).

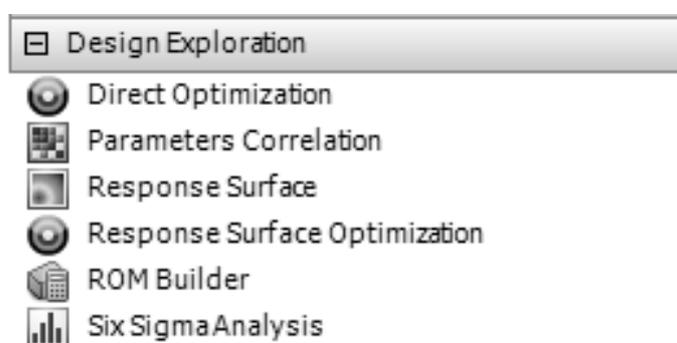


Рисунок 3.1 – Модули для выполнения исследований и оптимизации

ANSYS предоставляет различные типы планов эксперимента (DOE, Design Of Experiments), например на основе латинского гиперкуба (Latin Hypercube Sampling Design) или оптимального заполнения пространства точками выборки (Optimal Space Filling). Основным преимуществом этих методов является то, что количество выборок не зависит от количества параметров. Другой выбор – это план на основе разреженной сетки (Sparse Grid), который первоначально отбирает только несколько точек и адаптивно добавляет новые точки на основе поверхности отклика. Не рекомендуется использовать центральный композитный план (Central Composite Design (CCD)), потому что во многих случаях целевая функция не может быть аппроксимирована квадратичным полиномом, а также для такого плана требуется большое количество опытов для относительно небольшого числа управляемых параметров.

3.2 Порядок выполнения работы

Открыть проект, созданный в лабораторной работе № 1. Сохранить его под новым именем.

Поместить в проект систему Response Surface Optimization, которая автоматически свяжется с блоком Parameter Set (рисунок 3.2).

Открыть для редактирования раздел Design of Experiments. Выбрать тип

плана на основе латинского гиперкуба (Latin Hypercube Sampling Design), а в качестве типа выборки (Samples Type) – полную квадратичную модель (Full Quadratic Model Samples).

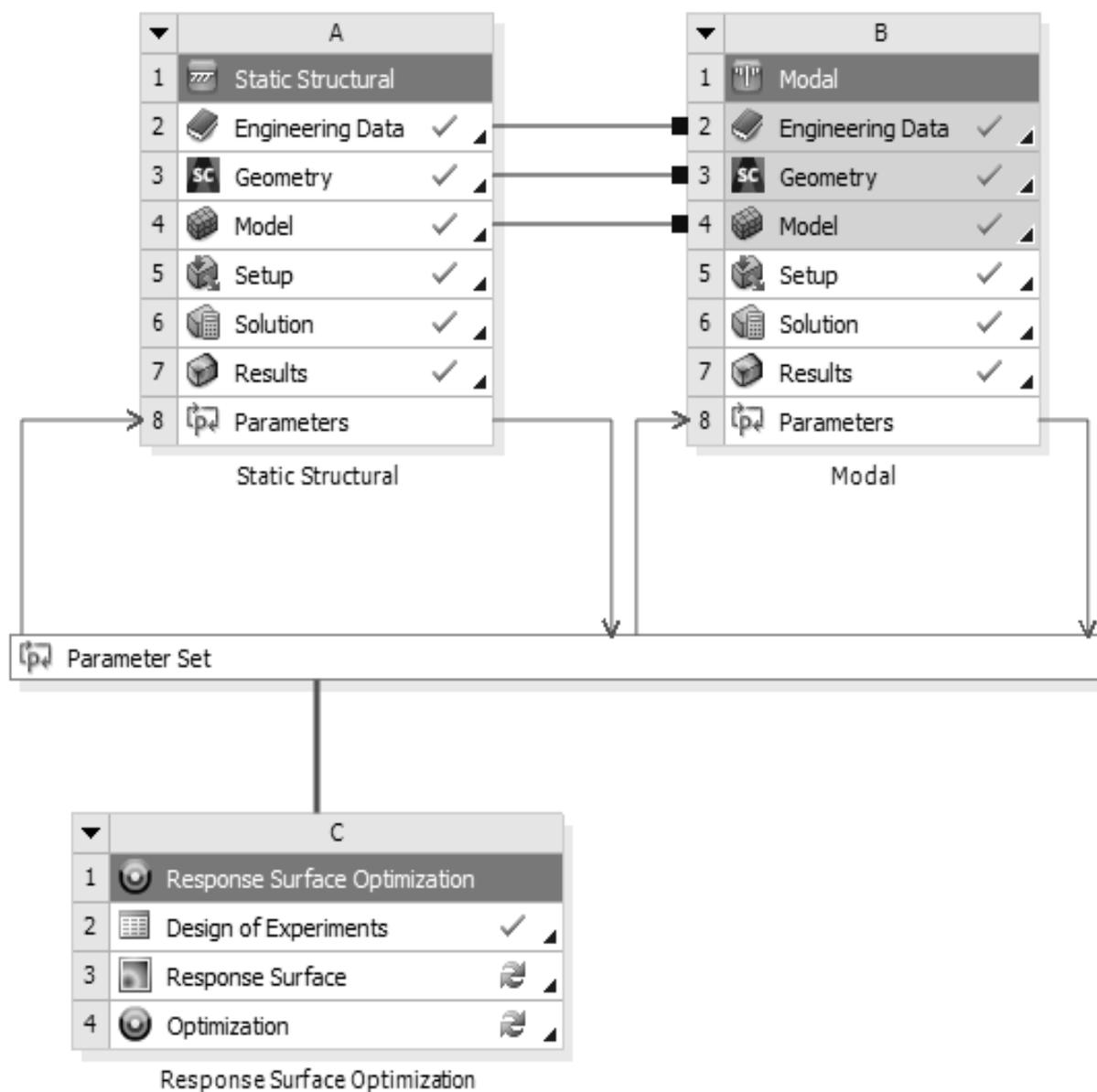


Рисунок 3.2 – Схема проекта для планирования и проведения вычислительного эксперимента

Задать интервалы варьирования управляемых параметров:

- DV1 – от 20 до 50 мм;
- DV2 и DV3 – от 15 до 25 мм.

Обновить проект, нажав на панели инструментов кнопку Update. В результате будет сгенерировано 10 точек плана и выполнен вычислительный эксперимент.

По окончании эксперимента будет автоматически заполнена таблица со значениями выходных параметров (рисунок 3.3).

Сохранить проект, сделать выводы, оформить отчет.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name ▾	P1 - DV1 (mm) ▾	P2 - DV2 (mm) ▾	P3 - DV3 (mm) ▾	P4 - Seqv_max (MPa) ▾	P5 - U_max (mm) ▾	P6 - Freq1 (Hz) ▾	P7 - Mass (kg) ▾
2	1	33.5	19.5	17.5	217.25919	0.13746498	314.57027	0.69044837
3	2	42.5	15.5	23.5	142.60652	0.10278995	336.95637	0.75051886
4	3	21.5	23.5	22.5	180.15786	0.11062901	305.21025	0.72138702
5	4	39.5	21.5	16.5	159.09889	0.11114093	329.05908	0.72381286
6	5	24.5	20.5	18.5	206.72927	0.15240389	297.65508	0.66880468
7	6	48.5	22.5	19.5	108.43557	0.090490986	351.51416	0.79105936
8	7	36.5	24.5	21.5	111.44603	0.090775531	335.63563	0.77864404
9	8	45.5	18.5	20.5	135.69053	0.098353691	343.02324	0.75931689
10	9	30.5	17.5	24.5	150.12017	0.10620228	316.02372	0.72748029
11	10	27.5	16.5	15.5	313.65089	0.24712804	293.19202	0.61182689

Рисунок 3.3 – Таблица результатов вычислительного эксперимента

Контрольные вопросы

- 1 Основные этапы планирования эксперимента.
- 2 Виды планов экспериментов и их свойства.
- 3 Виды экспериментов, их свойства и характерные особенности.
- 4 План полнофакторного эксперимента и его свойства. Матрица спектра плана.

4 Лабораторная работа № 4. Прямая параметрическая оптимизация средствами ANSYS Workbench

Цель работы: получить практические навыки постановки и решения задачи прямой оптимизации средствами ANSYS Workbench.

4.1 Порядок выполнения работы

Открыть проект, созданный в лабораторной работе № 1, и сохранить его под новым именем. Добавить шаблон Direct Optimization из раздела Design Exploration панели Toolbox проекта ANSYS Workbench.

Настроить параметры оптимизации, как показано на рисунке 4.1.

В разделе Objectives and Constraints создать целевую функцию по массе детали и настроить ограничения: максимальное суммарное перемещение – не более 0,21 мм; максимальные эквивалентные напряжения – не более 200 МПа; первая собственная частота – от 260 до 400 Гц (рисунок 4.2).

Задать интервалы варьирования управляемых параметров, как указано в лабораторной работе № 3. В качестве начальных значений задать $DV1 = 35$ мм, $DV2 = DV3 = 20$ мм.

Запустить процесс оптимизации на выполнение, нажав кнопку Update.

В ходе оптимизации программа строит графики изменения целевой функции и ограничений (рисунок 4.3). Штриховыми линиями показаны значения ограничений. На рисунке 4.3 видно, что значения максимальных эквивалентных напряжений и суммарных перемещений превышают установленные предельные

значения. Это говорит о том, что программа пока не нашла значения геометрических параметров DV1–DV3, удовлетворяющих ограничениям.

	A	B
1	Property	Value
2	+ Design Points	
4	+ Failed Design Points Management	
6	- Optimization	
7	Method Selection	Auto
8	Run Time Index	2
9	Estimated Number of Design Points	18
10	Method Name	Screening
11	Tolerance Settings	<input type="checkbox"/>
12	Number of Samples	18
13	Maximum Number of Candidates	3

Рисунок 4.1 – Настройка параметров алгоритма прямой оптимизации

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	Minimize P7	P7 - Mass	Minimize		No Constraint		
4	P4 <= 200 MPa	P4 - Seqv_max	No Objective		Values <= Upper Bound		200
5	P5 <= 0.21 mm	P5 - U_max	No Objective		Values <= Upper Bound		0.21
6	260 Hz <= P6 <= 400 Hz	P6 - Freq1	No Objective		Lower Bound <= Values <= Upper Bound	260	400
*		Select a Parameter					

Рисунок 4.2 – Задание целевой функции и ограничений

	A	B	C
1		Enabled	Monitoring
2	Optimization		
3	Objectives and Constraints		
4	Minimize P7		
5	P4 <= 200 MPa		
6	P5 <= 0.21 mm		
7	260 Hz <= P6 <= 400 Hz		
8	Domain		
14	Raw Optimization Data		
15	Convergence Criteria		
16	Results		

Рисунок 4.3 – Мониторинг процесса оптимизации

По окончании процесса оптимизации проанализировать результаты, выбрать из предложенных кандидатов наилучший и произвести проверку выполнения ограничений путем расчета.

Сохранить проект.

Контрольные вопросы

- 1 Постановка задачи оптимизации, основные этапы и их содержание.
- 2 Стратегии решения многокритериальных задач оптимизации.
- 3 Алгоритм поисковой оптимизации.

5 Лабораторная работа № 5. Параметрическая оптимизация на основе поверхности отклика средствами ANSYS Workbench

Цель работы: получить практические навыки постановки и решения задачи параметрической оптимизации на основе поверхности отклика.

5.1 Общие сведения

Как можно было заметить в ходе выполнения лабораторной работы № 4, процесс прямой оптимизации занимает довольно много времени. Есть возможность ускорить процесс поиска оптимального решения, если на основании данных вычислительного эксперимента построить регрессионные зависимости (модели среднего) выходных параметров от входных.

5.2 Порядок выполнения работы

Открыть проект, выполненный в лабораторной работе № 3, и сохранить его под новым именем. Открыть для редактирования раздел Response Surface шаблона оптимизации.

Выбрать желаемый тип поверхности отклика, остальные настройки оставить по умолчанию. Запустить процесс построения поверхностей отклика, нажав кнопку Update.

По окончании процесса проанализировать построенные поверхности (рисунок 5.1) в разделе Response дерева проекта.

Также проанализировать чувствительность выходных параметров к изменению входных (рисунок 5.2).

Открыть для редактирования раздел Optimization шаблона и выбрать желаемый метод оптимизации, остальные настройки оставить по умолчанию.

В разделе Objectives and Constraints выбрать целевую функцию (масса детали) и задать ограничения, как в лабораторной работе № 4 (см. рисунок 4.2).

Запустить процесс оптимизации на выполнение. По его окончании отметить время, затраченное на решение задачи.

Сравнить результаты оптимизации с результатами, полученными в лабораторной работе № 4. Из предложенных кандидатов (рисунок 5.3) выбрать наилуч-

ший, подготовить геометрическую модель с оптимальными параметрами и проверить выполнение ограничений путем расчета. Сохранить проект.

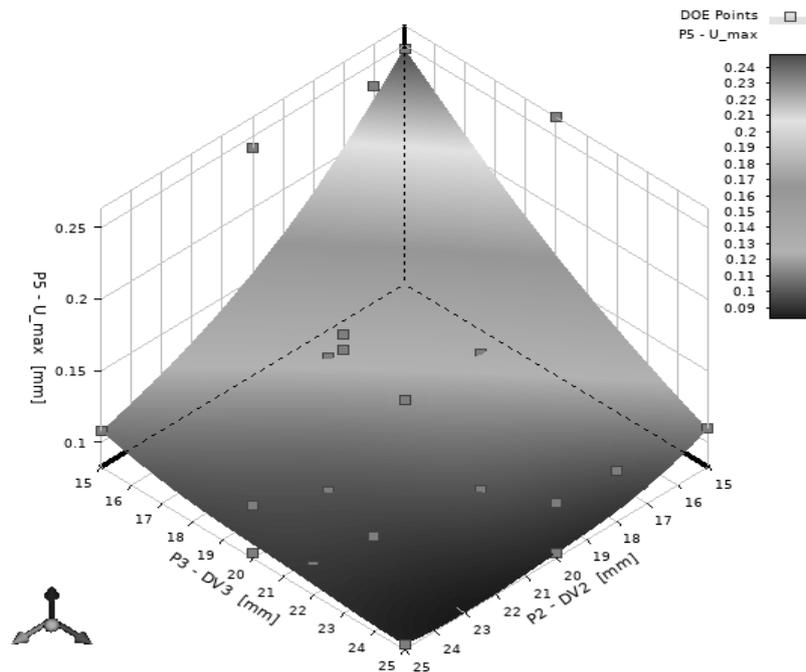


Рисунок 5.1 – Пример поверхности отклика для суммарных перемещений в зависимости от параметров DV2 и DV3

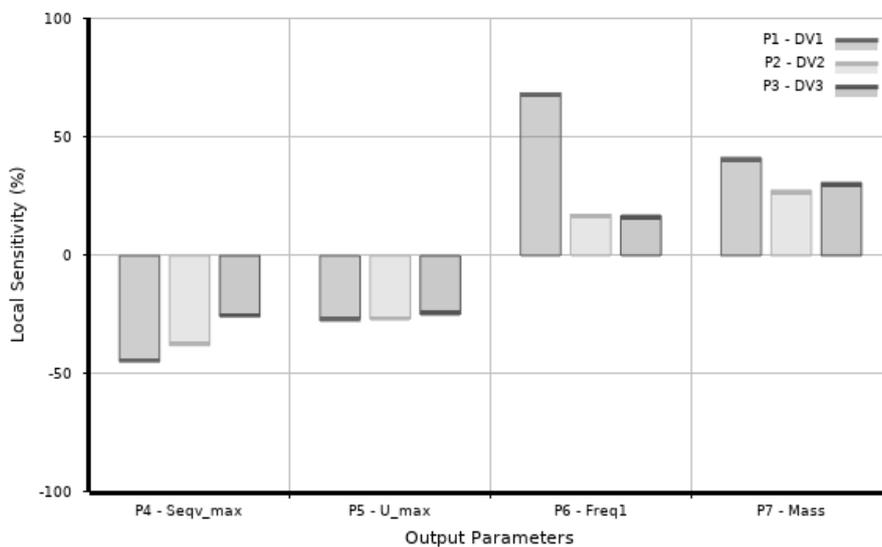


Рисунок 5.2 – Диаграмма чувствительности выходных параметров к изменению входных

	A	B	C	D
1	Optimization Study			
6	Optimization Method			
10	Candidate Points			
11		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
12	P1 - DV1 (mm)	27.339463	30.629264	26.813763
13	P2 - DV2 (mm)	20.012133	17.494519	20.314862
14	P3 - DV3 (mm)	17.926876	18.741402	17.994213
15	P4 - Seqv_max (MPa)	☆☆☆ 199.97244	☆☆☆ 199.98091	☆☆☆ 199.95934
16	P5 - U_max (mm)	☆☆☆ 0.15094109	☆☆☆ 0.16128243	☆☆☆ 0.1489257
17	P6 - Freq1 (Hz)	☆☆☆ 302.10044	☆☆☆ 306.61438	☆☆☆ 301.58024
18	P7 - Mass (kg)	☆ 0.67149748	☆ 0.67184763	☆ 0.67255914

Рисунок 5.3 – Результаты оптимизации на основе поверхности отклика

Контрольные вопросы

- 1 Формулировка понятия «оптимальные параметры».
- 2 Классификация методов поиска экстремума целевой функции.
- 3 Математическая формулировка задачи условной оптимизации.

6 Лабораторная работа № 6. Подготовка геометрической модели к проведению топологической оптимизации

Цель работы: получить практические навыки подготовки геометрических моделей для топологической оптимизации.

6.1 Общие сведения

Топологическая оптимизация (ТО) – это оптимизация распределения материала в проектной области при воздействии на нее заданных нагрузок и использовании ограничений различного рода: геометрических, прочностных, жесткостных и др. ТО является видом оптимизации формы конструкции, иногда именуемой оптимизацией компоновки.

Целью ТО является определение оптимального распределения материала в области проектирования при заданных нагрузках с удовлетворением критериев оптимизации, иначе говоря, определение лучшего использования материала для исследуемого объекта или конструкции так, чтобы целевая функция параметра имела максимальное или минимальное значение при наличии существующих ограничений.

В отличие от традиционной оптимизации, ТО не требует указания параметров оптимизации (т. е. независимых переменных, подвергаемых оптимизации) в явном виде. В топологической оптимизации параметром оптимизации является функция распределения материала по объему конструкции. Таким образом, основная особенность задач оптимизации размеров заключается в том, что область

проектирования известна заранее и она фиксирована в процессе оптимизации, а переменной проектирования является сама форма.

Подготовка геометрической модели для проведения ТО заключается в определении допустимого пространства, в котором может находиться материал, при этом должны быть сохранены места под крепления, нагрузки и т. д.

6.2 Порядок выполнения работы

Создать новый проект ANSYS Workbench и поместить в него шаблон статического анализа Static Structural. Добавить в проект шаблон топологической оптимизации Topology Optimization, связав его с шаблоном статического анализа (рисунок 6.1). Таким образом, результаты статического анализа будут исходными данными для выполнения оптимизации в дальнейшем.

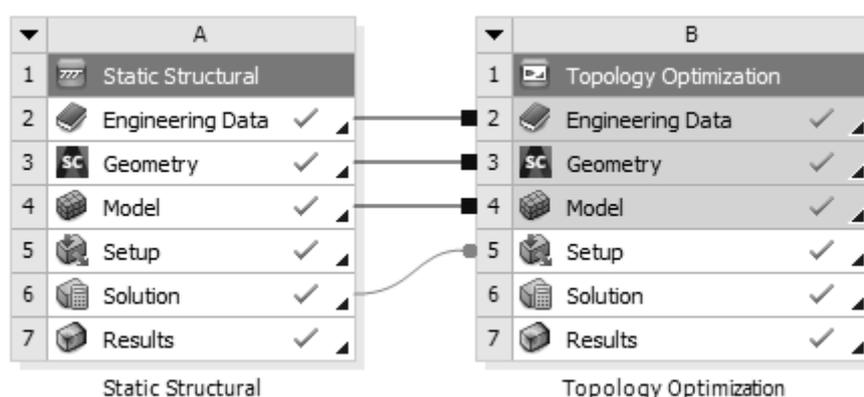


Рисунок 6.1 – Схема проекта для топологической оптимизации

Открыть раздел Geometry для создания геометрической модели с помощью редактора прямого моделирования SpaceClaim. На плоскости XY создать прямоугольник длиной 175 мм и высотой 100 мм. С помощью инструмента «Вытянуть» (Pull) создать параллелепипед шириной 30 мм.

С помощью инструмента «Переместить» (Move) сдвинуть верхние продольные кромки параллелепипеда внутрь на 10 мм, чтобы получить трапециевидное поперечное сечение (рисунок 6.2).

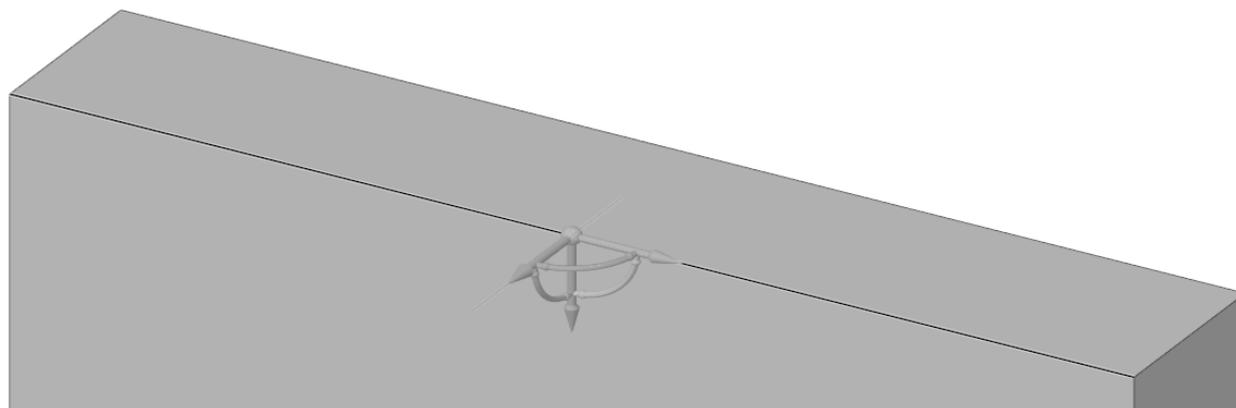


Рисунок 6.2 – Перемещение верхней кромки параллелепипеда

Контрольные вопросы

- 1 Содержание процедуры подготовки геометрической модели для выполнения топологической оптимизации.
- 2 Сущность топологической оптимизации.

7 Лабораторная работа № 7. Топологическая оптимизация по критерию максимальной жесткости

Цель работы: получить практические навыки постановки и решения задач топологической оптимизации по критерию максимальной жесткости.

7.1 Общие сведения

Для выполнения топологической оптимизации требуется проведение предварительных расчетов (статического, частотного и др.) для того, чтобы алгоритмы оптимизации имели информацию о поведении конструкции под действием внешних нагрузок.

Также результат топологической оптимизации сильно зависит от размера конечного элемента, поэтому рекомендуется выполнить серию расчетов, постепенно повышая разрешение модели сеткой конечных элементов.

По умолчанию целевой функцией является податливость конструкции (величина, обратная жесткости), которая подлежит минимизации. В качестве ограничения в таком случае используется величина оставшегося материала в конструкции, который будет распределен таким образом, чтобы обеспечить минимальную податливость, а следовательно, максимальную жесткость.

Следует отметить, что конструкции, получаемые в результате топологической оптимизации, требуют конструкторской проработки с учетом имеющихся технологий производства.

В данной работе попытаемся получить оптимальную форму консольного кронштейна, подобного тому, что приведен в лабораторной работе № 1.

7.2 Порядок выполнения работы

Открыть проект, созданный в лабораторной работе № 6, и запустить среду ANSYS Mechanical.

Создать расчетную сетку конечных элементов, выполнив при необходимости настройки сеточного генератора.

Жестко закрепить одну из торцовых граней модели, на верхнюю полку приложить давление величиной 5 МПа (рисунок 7.1).

Выполнить статический анализ. По его окончании открыть для редактирования раздел Setup шаблона топологической оптимизации.

Ознакомиться с основными настройками решателя (Analysis Settings), области оптимизации (Optimization Region), целевой функции (Objective) и ограничений (Response Constraint). Все настройки оставить по умолчанию, кроме ограничения: задать значение оставшейся массы конструкции, равное 20 %.

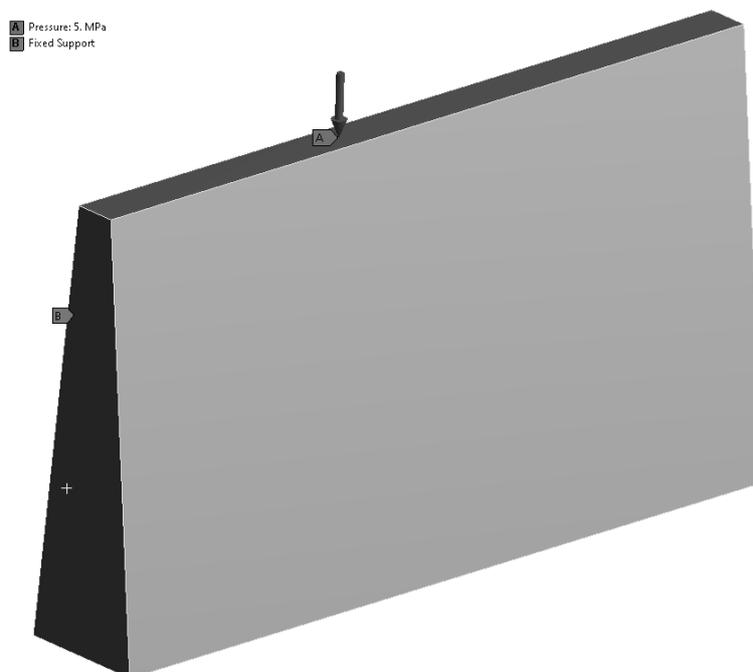


Рисунок 7.1 – Граничные условия и внешняя нагрузка на расчетную область консольного кронштейна

Запустить процесс оптимизации на выполнение. В ходе расчета можно контролировать промежуточный результат с помощью инструмента Topology Density Tracker, который находится в разделе Solution Information.

По окончании процесса оптимизации вывести эпюру распределения псевдоплотности материала и проанализировать результат (рисунок 7.2).

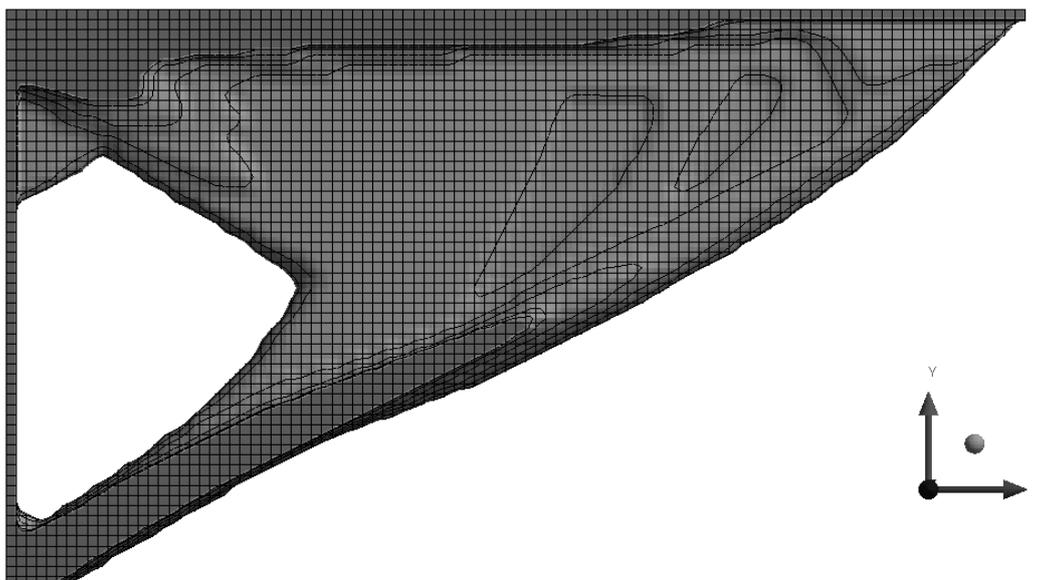


Рисунок 7.2 – Результат топологической оптимизации консольного кронштейна

Отметить степень выполнения ограничения по остаточной массе. Сделать выводы, оформить отчет.

Контрольные вопросы

- 1 Этапы постановки задачи топологической оптимизации.
- 2 Выбор функций отклика при постановке задачи топологической оптимизации. Виды ограничений, накладываемых на функции отклика.

8 Лабораторная работа № 8. Топологическая оптимизация несущей системы тягово-транспортной машины

Цель работы: получить практические навыки постановки и решения задач топологической оптимизации несущих систем ТТМ.

8.1 Порядок выполнения работы

Запустить среду ANSYS Workbench. Открыть архив проекта с именем Lab_8.wbpz. Программа автоматически предложит сохранить проект в рабочую директорию в распакованном виде. *Следует предупредить, что решатель топологической оптимизации не допускает символов кириллицы в имени проекта и в пути к этому проекту.* В противном случае расчет будет останавливаться в самом начале без объяснения причин.

Проект содержит два связанных шаблона статического анализа рамы карьерного самосвала для двух расчетных случаев: экстренного торможения при движении вперед – режим № 3 и экстренного торможения при движении назад – режим № 5 (рисунок 8.1).

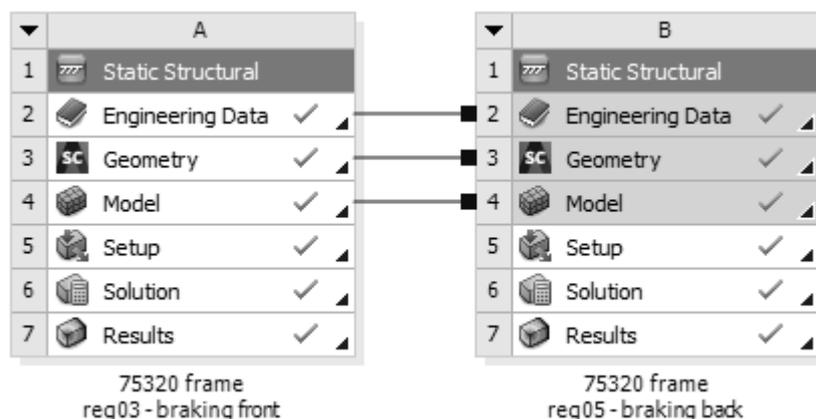


Рисунок 8.1 – Исходная схема проекта

Открыть для редактирования один из разделов Setup и ознакомиться с заданными внешними нагрузками и граничными условиями. Расчетная область, где может находиться материал рамы, приведена на рисунке 8.2. В этой области выделены площадки для приложения нагрузок от грузовой платформы, подвесок, кабины, двигателя, топливного и масляного баков и т. д. В процессе топологической оптимизации между этими площадками будет распределяться материал

для обеспечения требуемых критериев.

Добавить в проект два шаблона топологической оптимизации и связать каждый из них с соответствующим шаблоном статического анализа (рисунок 8.3).

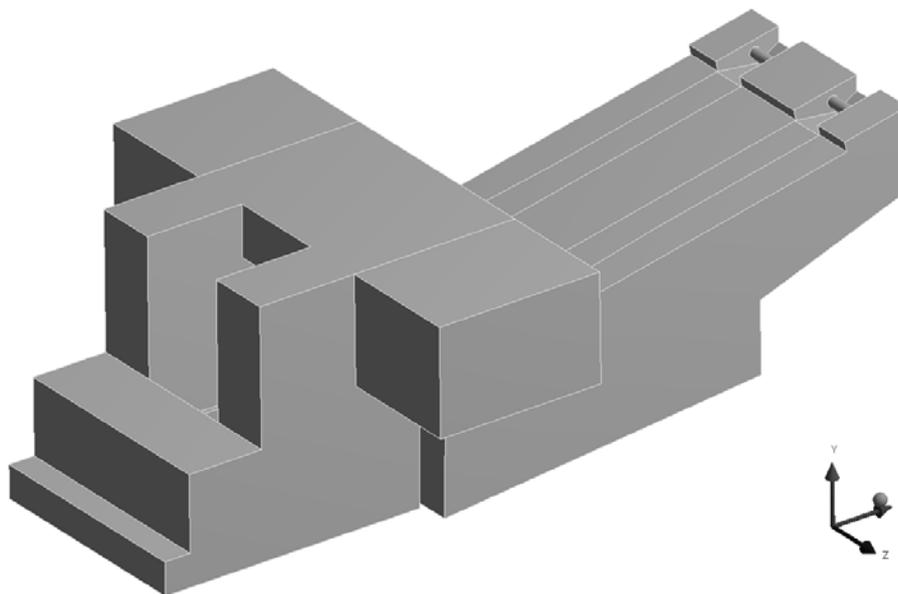


Рисунок 8.2 – Расчетная область рамы карьерного самосвала

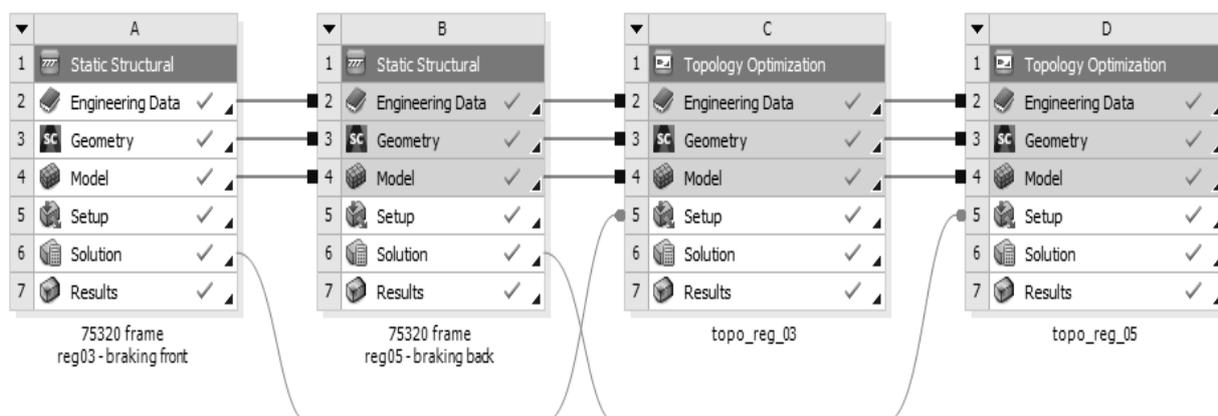


Рисунок 8.3 – Схема проекта со связанными шаблонами топологической оптимизации

Выполнить настройки оптимизации для режима № 3. В разделе Analysis Settings установить значение параметра Convergence Accuracy, равное 1 %. В разделе Optimization Region отключить создание исключаемых из оптимизации областей путем установки значения параметра Boundary Conditions = None. Убедиться, что в качестве функции отклика выбрана податливость модели (Compliance) и целью оптимизации является ее минимизация (Goal = Minimize).

В качестве ограничения задать массу оставшейся части модели, равную 10 % от исходной: Response = Mass, Percent to Retain = 10 %.

Нагрузки, действующие на раму карьерного самосвала, распределяются по бортам неравномерно. Для того чтобы после оптимизации получить симметрич-

ную конструкцию, необходимо добавить технологическое ограничение симметрии относительно плоскости XY (Manufacturing Constraint = Symmetry, Axis = Z).

Выполнить аналогичные настройки для оптимизации по расчетному режиму № 5.

Сохранить проект и запустить процесс оптимизации на выполнение.

После окончания процесса оптимизации вывести и проанализировать полученные результаты (рисунки 8.4 и 8.5). Оценить степень выполнения ограничений по массе оставшейся части конструкции.

Сделать выводы, оформить отчет.

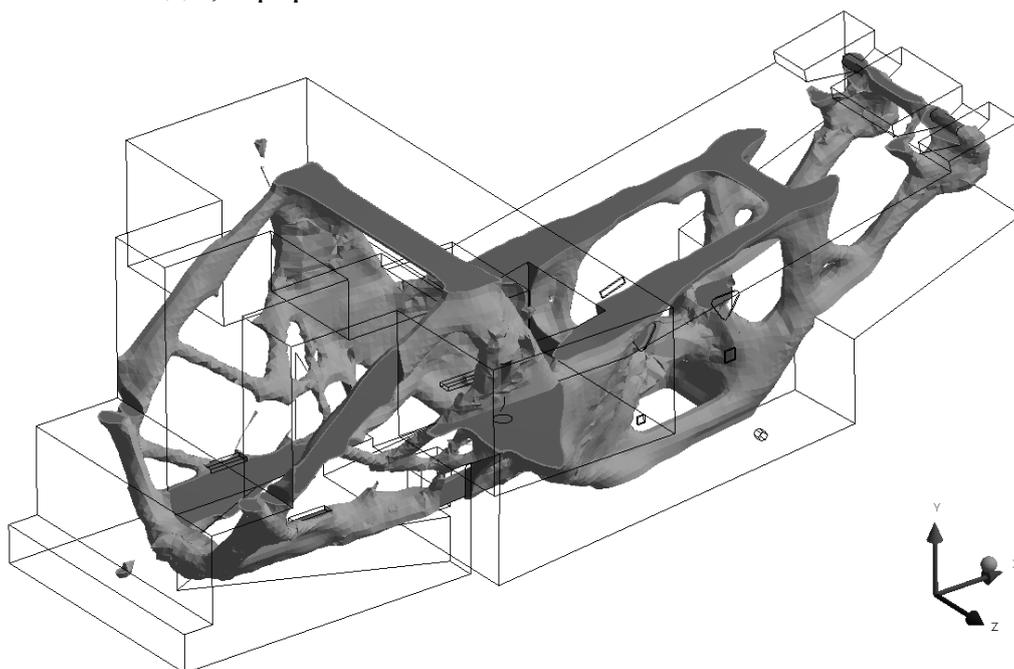


Рисунок 8.4 – Результат топологической оптимизации на режиме № 3

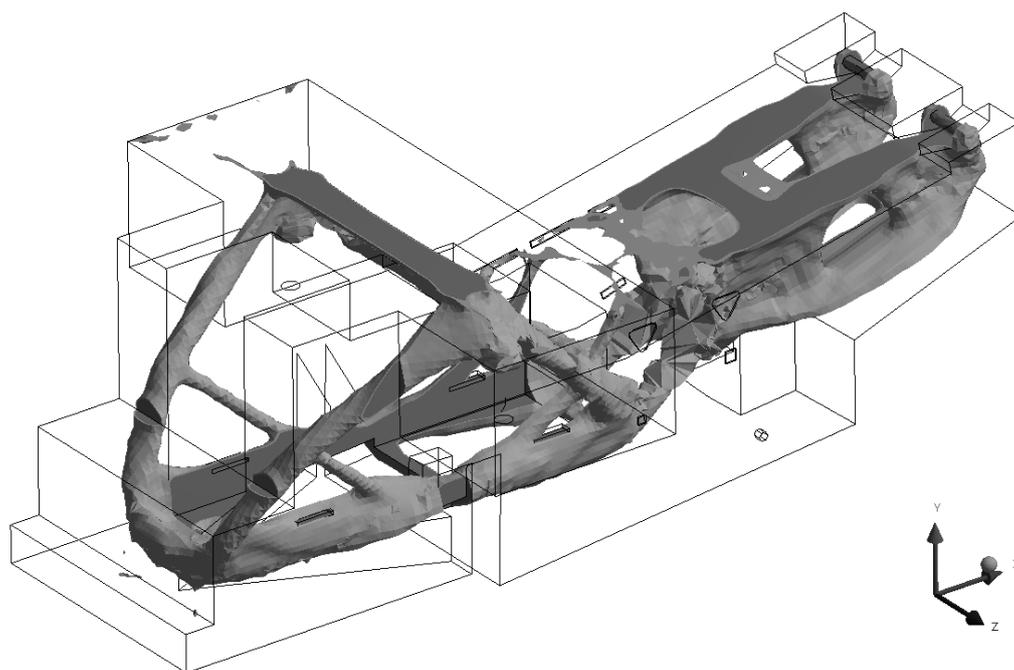


Рисунок 8.5 – Результат топологической оптимизации на режиме № 5

Контрольные вопросы

1 Виды и сущность технологических ограничений, накладываемых на форму конструкции при выполнении топологической оптимизации.

2 Методы топологической оптимизации: ESO/BESO, SIMP, ESO-SIMP, Level-Set.

Список литературы

1 **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем: учебник / В. П. Тарасик. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. – 592 с.

2 **Аттетков, А. В.** Методы оптимизации: учеб. пособие / А. В. Аттетков, В. С. Зарубин, А. Н. Канатников. – М.: РИОР; ИНФРА-М, 2019. – 270 с. – URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=422330> (дата обращения: 28.02.2025).

3 **Струченков, В. И.** Прикладные задачи оптимизации. Модели, методы, алгоритмы: практ. пособие / В. И. Струченков. – М.: СОЛОН-Пресс, 2016. – 314 с. – URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=392265> (дата обращения: 28.02.2025).

4 **Реклейтис, Г.** Оптимизация в технике: пер. с англ.: в 2 кн. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Машиностроение, 1986. – Кн. 1. – 349 с.

5 **Реклейтис, Г.** Оптимизация в технике: пер. с англ.: в 2 кн. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Машиностроение, 1986. – Кн. 2. – 320 с.