

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Транспортные и технологические машины»

САПР МЕХАНИЗМОВ АВТОМОБИЛЕЙ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
1-37 01 02 «Автомобилестроение (по направлениям)»
дневной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.876
ББК 39.9
С64

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Транспортные и технологические машины»
«26» апреля 2023 г., протокол № 8

Составитель ст. преподаватель А. В. Гуркина

Рецензент канд. техн. наук, доц. В. В. Кутузов

Методические рекомендации по дисциплине «САПР механизмов автомобилей» предназначены для студентов специальности 1-37 01 02 «Автомобилестроение» для использования при выполнении практических работ.

Учебное издание

САПР МЕХАНИЗМОВ АВТОМОБИЛЕЙ

Ответственный за выпуск

И. В. Лесковец

Корректор

Т. А. Рыжикова

Компьютерная верстка

Е. В. Ковалевская

Подписано в печать

. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Печать трафаретная. Усл. печ. л.

. Уч.-изд. л.

. Тираж 26 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, 2023

Содержание

Введение	4
1 Практическая работа № 1. Настройка среды Simulink	5
2 Практическая работа № 2. Работа с библиотекой блоков Simulink	9
3 Практическая работа № 3. Построение таблиц истинности логических операторов	14
4 Практическая работа № 4. Настройка решателей обыкновенных дифференциальных уравнений в Simulink	17
5 Практическая работа № 5. Подготовка расчетных моделей тонкостенных конструкций	19
6 Практическая работа № 6. Подготовка расчетных моделей симметричных конструкций	23
7 Практическая работа № 7. Подготовка расчетной модели анализа болтовых соединений	27
8 Практическая работа № 8. Подготовка расчетной модели из нелинейного материала	30
Список литературы	33

Введение

Целью учебной дисциплины «САПР механизмов автомобилей» является освоение студентами общих вопросов автоматизации проектирования автомобиля, его узлов и механизмов.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) являются важнейшими составляющими современных технологий, связанных с автоматизацией производства.

Эффективное применение САПР возможно только при наличии высококвалифицированных инженеров, профессионально владеющих основами автоматизации проектирования, компьютерной техникой и способных быть пользователями САПР.

Целью изучения дисциплины «САПР механизмов автомобиля» является освоение студентами общих вопросов автоматизации проектирования автомобиля, его узлов и механизмов с практическим применением современных программных средств.

В результате выполнения практических заданий обучающиеся получают навыки работы с современными программными средствами моделирования рабочих процессов автомобилей и их систем при выполнении сквозного проектирования.

Выполняя практическое задание, обучающийся формирует электронный отчет о проделанной работе, который может содержать файлы с результатами расчетов, таблицы и графики.

1 Практическая работа № 1. Настройка среды Simulink

Цель работы: ознакомиться с составом библиотеки блоков Simulink, получить навыки основных приемов работы и настроек среды.

1.1 Теоретические сведения

Модуль Simulink является приложением к пакету MATLAB. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом в отличие от классических способов моделирования пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает.

Simulink является достаточно самостоятельным инструментом MATLAB, и при работе с ним совсем не требуется знать сам MATLAB и остальные его приложения. С другой стороны, доступ к функциям MATLAB и другим его инструментам остается открытым и их можно использовать в Simulink. Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (например, Power System Blockset – моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset – набор блоков для разработки цифровых устройств, библиотеки Simscape – для моделирования различных по природе систем на физическом уровне и т. д.).

При работе с Simulink пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков. В ходе моделирования можно следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц.

Для запуска Simulink необходимо предварительно запустить пакет MATLAB. После открытия основного окна MATLAB нужно запустить программу Simulink. Это можно сделать одним из трех способов.

1 Нажать кнопку Simulink (Simulink Library) на панели инструментов командного окна MATLAB.

2 В командной строке главного окна MATLAB напечатать simulink и нажать клавишу Enter на клавиатуре.

3 Выполнить команду Open... в меню File и открыть файл модели.

Последний вариант удобно использовать для запуска уже готовой и отлаженной модели, когда требуется лишь провести расчеты и не нужно добавлять новые блоки в модель. Использование первого и второго способов приводит к открытию окна обозревателя разделов библиотеки Simulink.

Для вызова диалогового окна настройки модели Simulink (рисунок 1.1) необходимо выбрать пункт меню Simulation – Model Configuration Parameters или нажать сочетание клавиш Ctrl + E.

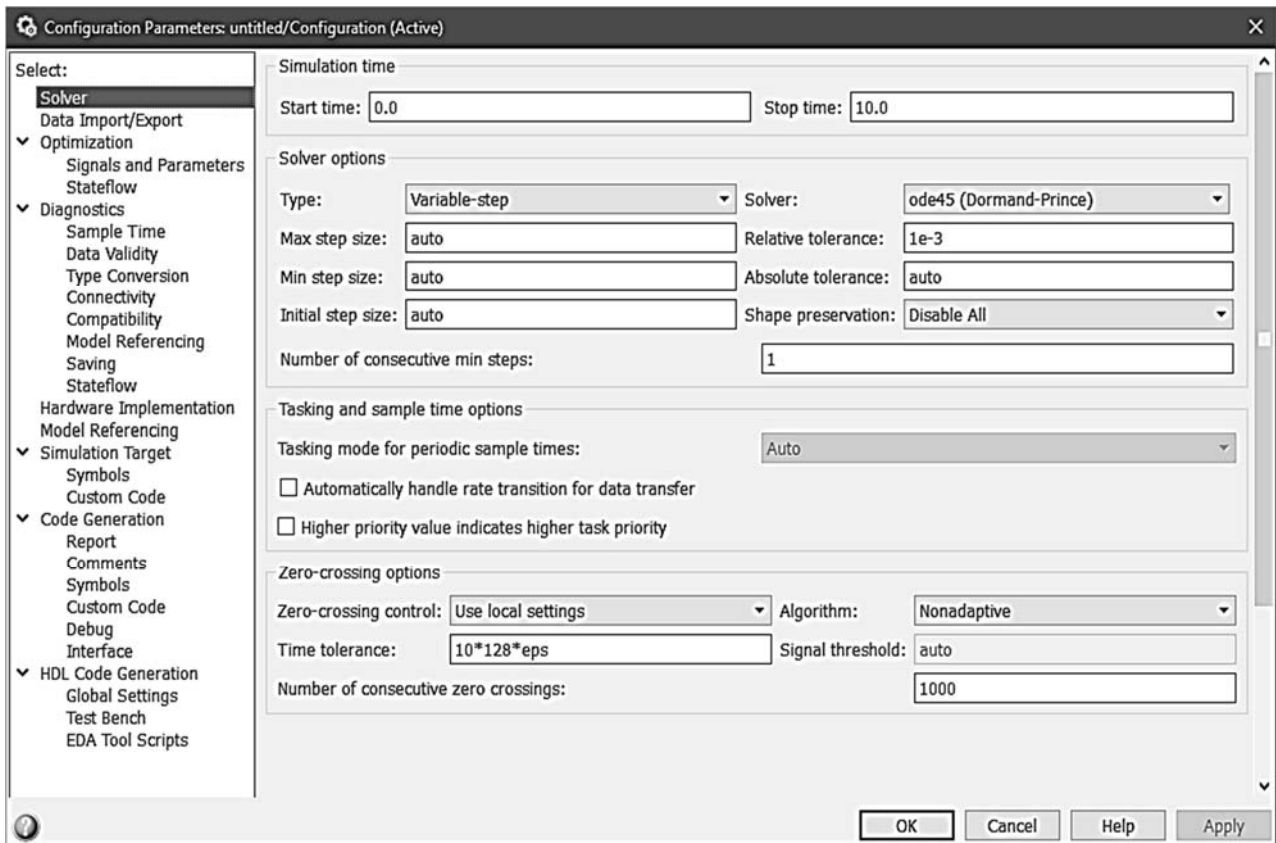


Рисунок 1.1 – Общий вид окна настройки параметров текущей модели Simulink

Перед запуском модели на расчет пользователь может предварительно задать или модифицировать некоторые параметры расчета.

Установка параметров расчета выполняется на вкладке Solver окна конфигурации модели (см. рисунок 1.1). При этом пользователь может установить значения следующих параметров:

- Simulation time / Start time – время начала расчета. Значение этого параметра обычно равно нулю;
- Simulation time / Stop time – время остановки расчета;
- Solver options / Type – тип метода, который будет использоваться при расчете. Возможны два варианта: Variable-step и Fixed-step – методы с переменным и постоянным шагом соответственно. Чаще всего методы с переменным шагом используются для моделирования непрерывных систем, а методы с постоянным шагом – для дискретных;
- Solver options / Solver – метод расчета, относящийся к предварительно выбранному типу;
- Solver options / Max step size и Solver options / Min step size – соответственно максимальный допустимый и минимально допустимый шаг решателя при расчете модели. По умолчанию (auto) максимальный шаг решателя равен $(\text{Stop time} - \text{Start time}) / 50$;
- Solver options / Initial step size – начальный шаг решателя;
- Solver options / Relative tolerance – относительная точность решения, по умолчанию задано значение 0,001;

– Solver options / Absolute tolerance – абсолютная точность решения, по умолчанию установлено значение auto;

– Solver options / Number of consecutive min steps – число последовательных минимальных шагов по времени. При превышении этого параметра расчет останавливается с сообщением об ошибке.

Установка параметров обмена с рабочей областью производится на вкладке Data Import / Export диалогового окна (рисунок 1.2), где расположены элементы, позволяющие управлять вводом и выводом в рабочую область MATLAB промежуточных данных и результатов моделирования.

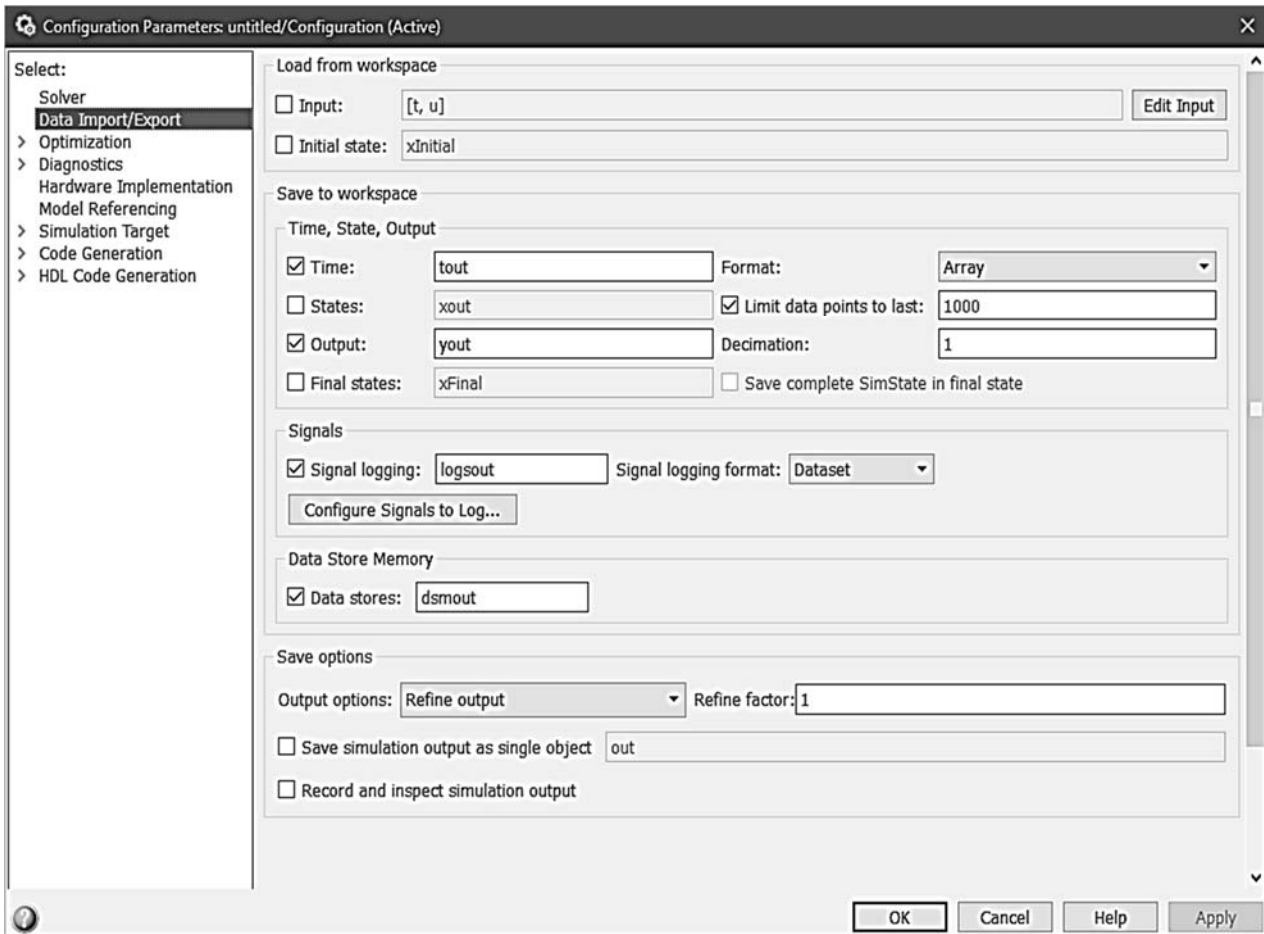


Рисунок 1.2 – Настройки параметров обмена с рабочей областью

Вкладка содержит четыре области (группы):

1) Load from workspace (Загрузить из рабочей области) – указываются имена переменных в рабочей области, которые должны быть переданы в модель в момент начала расчета;

2) Save to workspace (Сохранить в рабочую область) – указываются данные, которые пользователь желает сохранить в рабочей области для дальнейшего использования. При этом может быть выбран формат записи данных и имена соответствующих переменных;

3) Signals – позволяет произвести логирование (логгинг) сигналов и сохранить их в выбранном формате под определенным именем;

4) Save options – параметры записи данных. Параметр Refine factor позволяет записать данные в рабочую область с более мелким шагом, если его значение больше единицы.

Настройки, выполненные в этом окне, относятся к текущей модели Simulink. Для установки необходимых параметров по умолчанию для новых моделей необходимо воспользоваться настройкой самой среды Simulink. Для этого сначала надо открыть обозреватель библиотек, нажав кнопку Simulink (Simulink Library) на панели инструментов командного окна MATLAB, а затем в окне обозревателя выбрать пункт меню File – Preferences... . В открывшемся диалоговом окне (рисунок 1.3) пользователь может установить удобные для себя параметры среды моделирования, которые будут применяться ко всем новым моделям.

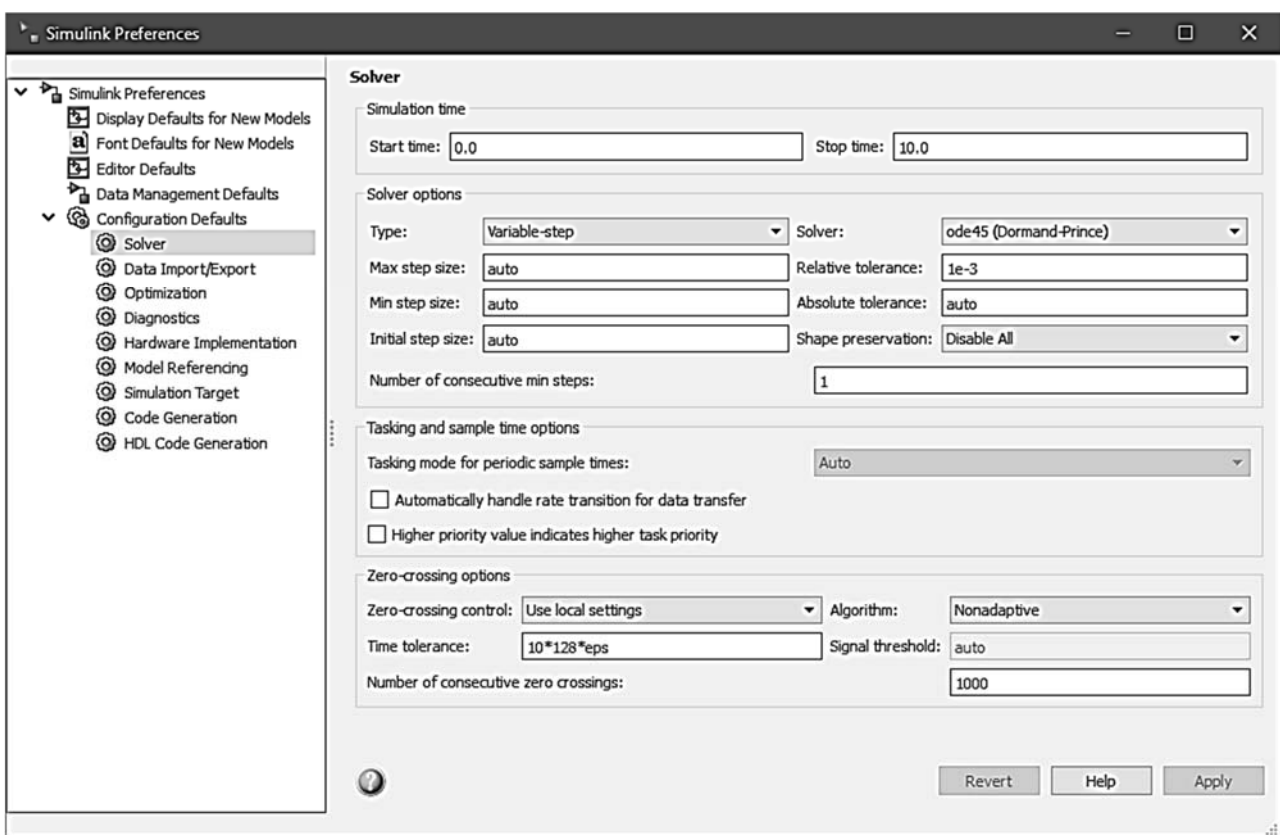


Рисунок 1.3 – Общий вид окна настройки глобальных параметров среды Simulink

1.2 Порядок выполнения работы

Запустить среду Simulink.

Изучить состав главного меню обозревателя библиотек Simulink и главного меню редактора блок-диаграмм.

Ознакомиться с настройками модели по умолчанию.

Открыть редактор глобальных настроек Simulink, ознакомиться с его структурой и значениями параметров.

Контрольные вопросы

- 1 Способы запуска среды Simulink.
- 2 Основные настройки модели по умолчанию и их значения.
- 3 Назначение основных пунктов главного меню редактора модели.
- 4 Основные глобальные настройки среды Simulink.

2 Практическая работа № 2. Работа с библиотекой блоков Simulink

Цель работы: изучить структуру и получить навыки работы с библиотекой визуальных блоков Simulink.

2.1 Теоретические сведения

Библиотека Simulink представляет собой набор визуальных блоков, используя которые можно построить модель практически любой системы. Для большей части блоков существует возможность настройки их параметров, которые отображаются в диалоговом окне. Вызов окна настройки параметров осуществляется двойным щелчком по блоку левой клавишей мыши.

Список разделов библиотеки Simulink представлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида.

Библиотека Simulink содержит следующие основные разделы:

- Commonly Used Blocks – часто используемые блоки;
- Continuous – линейные блоки, необходимые для работы с непрерывными (аналоговыми) сигналами;
- Discontinuous – блоки, реализующие различные виды нелинейностей;
- Discrete – дискретные блоки, необходимые для работы с дискретными (цифровыми) сигналами;
- Logic and Bit Operations – блоки, реализующие логические и битовые операции;
- Lookup Tables – таблицы поиска различных размерностей;
- Math Operations – блоки математических операций;
- Model Verification – блоки верификации модели;
- Ports & Subsystems – порты и подсистемы;
- Signal Routing – маршрутизаторы сигналов;
- Sinks – регистрирующие устройства;
- Sources – источники сигналов и воздействий;
- User Defined Functions – функции, определенные пользователем.

Для того чтобы развернуть или свернуть узел дерева библиотеки блоков, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши.

При выборе раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое (рисунок 2.1).

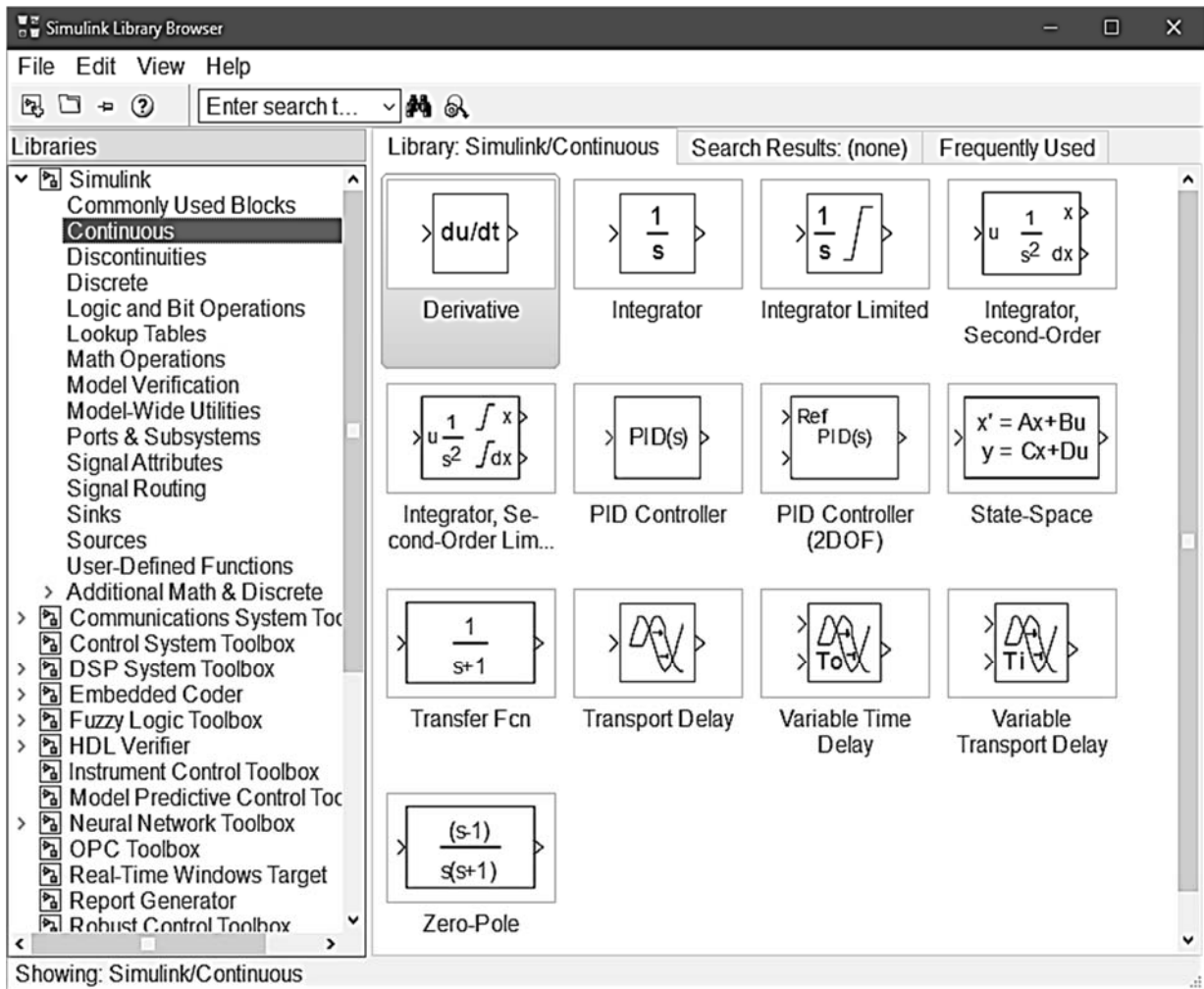


Рисунок 2.1 – Внешний вид окна библиотеки блоков Simulink

Окно обозревателя библиотеки блоков содержит следующие элементы:

- заголовок с названием окна – Simulink Library Browser;
- меню с командами File, Edit, View, Help;
- панель инструментов с ярлыками наиболее часто используемых команд;
- окно поиска блока по имени или его части;
- список разделов библиотеки, реализованный в виде дерева в левой части окна;
- окно содержимого выделенного раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков);
- строку состояния, содержащую подсказку по выполняемому действию.

Пункт View главного меню обозревателя библиотек позволяет пользователю настроить внешний вид по своему усмотрению. Так, например, выбрав пункт View – Icon size, можно изменить размер пиктограмм блоков, отображаемых в правой части обозревателя. Пункты View – Increase Font Size (Ctrl + +) и View – Decrease Font Size (Ctrl + –) позволяют увеличить и уменьшить размер шрифта подписей блоков и разделов библиотеки.

Создание модели в Simulink.

Для создания модели в Simulink необходимо разместить в рабочей области графические блоки, реализующие элементы математической модели или выполняющие вспомогательные функции, и соединить их линиями распространения сигналов.

Для добавления блока в модель достаточно просто перетащить его мышкой в окно модели. Для блоков каждого вида существует определенный набор параметров, для настройки которых используется диалоговое окно.

На рисунке 2.2 показано окно модели, содержащее блоки.

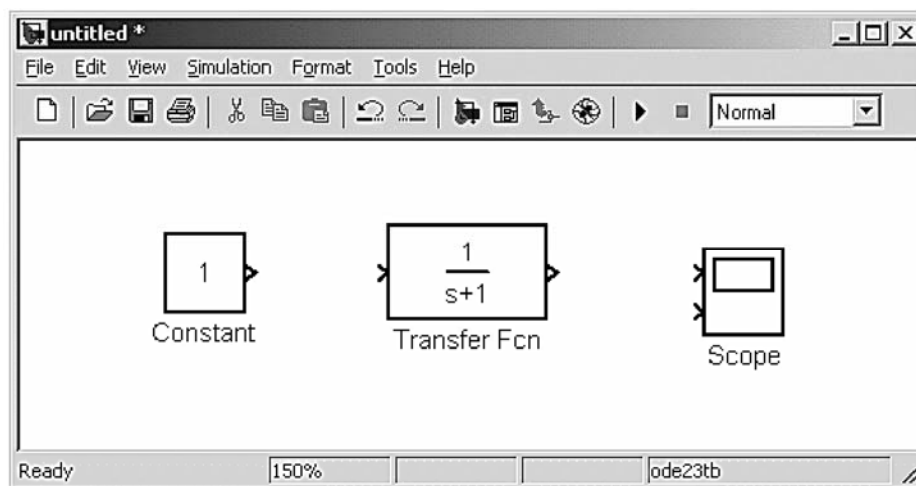


Рисунок 2.2 – Окно модели, содержащее блоки

Для манипуляций с блоками и сигнальными линиями в основном используется мышь и клавиатурные сокращения. Основные операции сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Основные операции с блоками и линиями

Манипуляция мышью или сочетание клавиш	Действие
1	2
Щелчок левой кнопкой мыши на блоке или линии	Выделение блока или линии
SHIFT + щелчок левой кнопкой мыши на блоке или линии	Добавление линии или блока к выделенным элементам
Щелчок ПКМ на блоке или линии	Контекстное меню блока или линии
Перетаскивание блока с нажатой левой кнопкой мыши	Перемещение блока с сохранением соединения линий
Перетаскивание линии с нажатой левой кнопкой мыши	Перемещение линейного сегмента линии без нарушения связей
Перетаскивание блока с нажатой правой кнопкой мыши	Копирование и перемещение блока
Перетаскивание блока с нажатой левой кнопкой мыши + CTRL	

Окончание таблицы 2.1

1	2
Перетаскивание линии с нажатой правой кнопкой мыши	Разветвление линии из точки щелчка
Перетаскивание блока с нажатой левой кнопкой мыши + SHIFT	Перетаскивание блока с отсоединением линий
Выделение одного блока, затем щелчок левой кнопкой мыши + CTRL по другому блоку	Соединение выхода первого блока с первым свободным входом второго
Двойной щелчок левой кнопкой мыши на блоке	Вызов окна параметров блока
Двойной щелчок левой кнопкой мыши в пустом месте окна	Вставка текста в место щелчка
CTRL+C, CTRL + X, CTRL + V	Буфер обмена: копирование, вырезание, вставка
CTRL + R	Вращение блока на 90°
CTRL + I	Отражение блока слева направо (сверху вниз)

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу мыши), а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре.

Для изменения размеров блока требуется выбрать блок, установить курсор в один из углов блока и, нажав левую клавишу мыши, изменить размер блока (курсор при этом превратится в двухстороннюю стрелку).

Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные программой «по умолчанию». Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей мыши, указав курсором на изображение блока. Откроется окно редактирования параметров данного блока. При задании численных параметров следует иметь в виду, что в качестве десятичного разделителя должна использоваться точка, а не запятая. После внесения изменений нужно закрыть окно кнопкой ОК. На рисунке 2.3 в качестве примера показаны блок, моделирующий передаточную функцию, и окно редактирования параметров данного блока.

После установки на схеме всех блоков из требуемых библиотек нужно выполнить соединение элементов схемы. Для соединения блоков необходимо указать курсором на «выход» блока, а затем нажать и, не отпуская левую клавишу мыши, провести линию к входу другого блока. После чего отпустить клавишу. В случае правильного соединения изображение стрелки на входе блока изменяет цвет. Для создания точки разветвления в соединительной линии нужно подвести курсор к предполагаемому узлу и, нажав *правую* клавишу мыши, протянуть линию.

После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню File/Save As... в окне схемы и указав папку и имя файла. Следует иметь в виду, что имя файла не должно превышать 32 символа, должно начинаться с буквы и не может содержать символы кириллицы и

спецсимволы. Это же требование относится и к пути файла (к тем папкам, в которых сохраняется файл). При последующем редактировании схемы можно использовать пункт меню File/Save. При повторных запусках программы Simulink загрузка схемы осуществляется с помощью меню File/Open... в окне обозревателя библиотеки или из основного окна MATLAB.

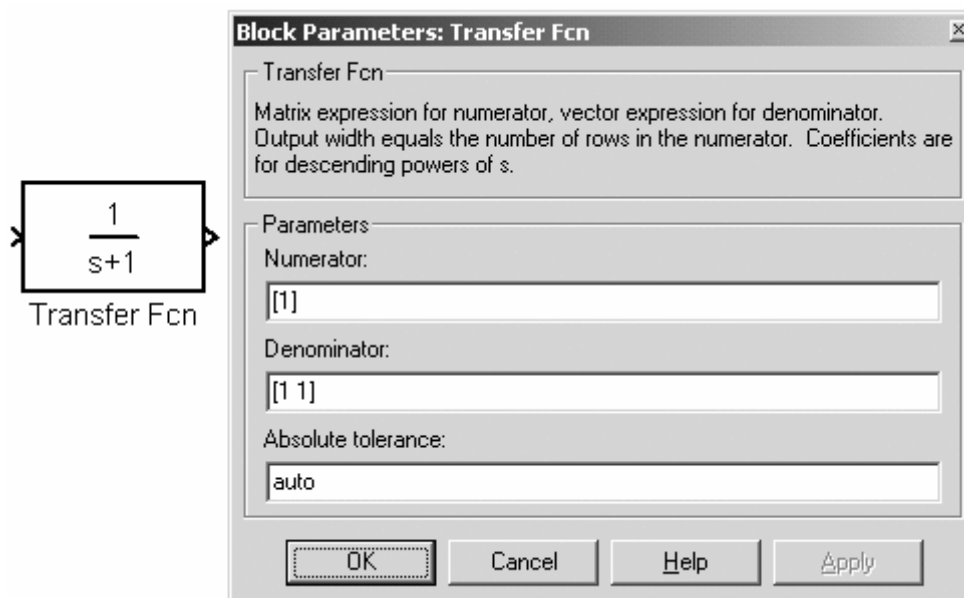
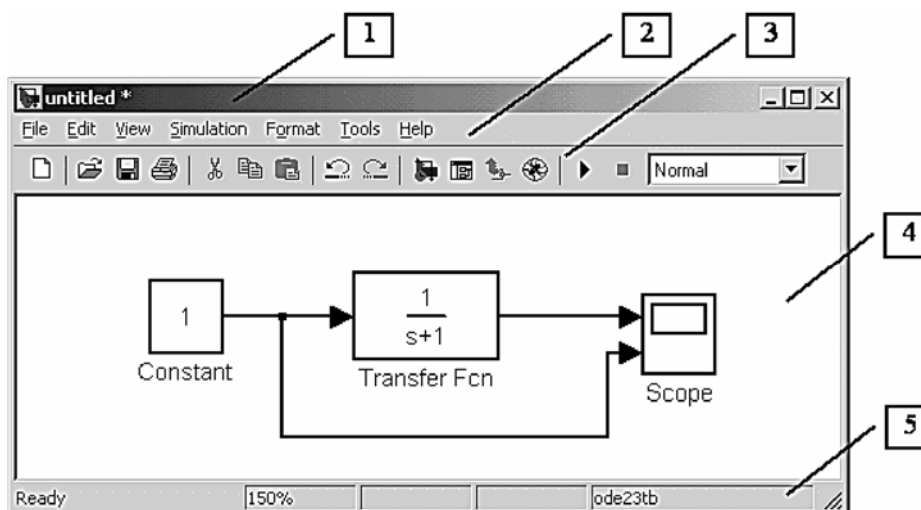


Рисунок 2.3 – Блок, моделирующий передаточную функцию, и окно редактирования параметров блока

Для удаления линии требуется выбрать линию (так же, как это выполняется для блока) и нажать клавишу Delete на клавиатуре. Схема модели, в которой выполнены соединения между блоками, показана на рисунке 2.4.



1 – заголовок с названием окна; 2 – меню с командами; 3 – панель инструментов; 4 – окно для создания схемы модели (рабочая область); 5 – строка состояния

Рисунок 2.4 – Схема модели

2.2 Порядок выполнения работы

Запустить Simulink.

Открыть обозреватель библиотек блоков, ознакомиться с их составом, структурой и назначением.

Получить базовые навыки составления блок-диаграмм: перемещение блоков из библиотеки и размещение в окне редактора, построения соединительных линий и их разветвления, поворота, масштабирования, изменения визуальных свойств блоков (тип и размер шрифта подписи, цвет контура и фона).

Контрольные вопросы

- 1 Основные библиотеки блоков Simulink и их назначение.
- 2 Способы помещения выбранного блока в окно редактора блок-диаграмм.
- 3 Основные операции с блоками: поворот, отражение, масштабирование, дублирование, построение и разветвление соединительных линий.
- 4 Основные операции соединения блоков, их редактирование.

3 Практическая работа № 3. Построение таблиц истинности логических операторов

Цель работы: получить практические навыки составления таблиц истинности логических функций.

3.1 Теоретические сведения

В алгебре логики используются чаще всего следующие логические операторы:

- отрицание (инверсия, логическое НЕ, NOT);
- конъюнкция (логическое умножение, логическое И, AND);
- дизъюнкция (логическое сложение, логическое ИЛИ, OR);
- исключающая дизъюнкция (исключающее ИЛИ, XOR).

Операция отрицания выполняется над одним оператором. Такие операции называются *одноместными*, или *унарными*. Все остальные операции выполняются над двумя операндами и называются *двуместными*, или *бинарными*.

При выполнении операции конъюнкции результатом будет истина только в том случае, когда оба операнда истинны.

Во всех остальных случаях результатом выполнения конъюнкции будет ложь.

Например, высказывание А «число 7 – простое» истинно, высказывание В «число 10 – четное» истинно. Высказывание «число 7 – простое и число 10 – четное» истинно. Высказывания «число 7 – непростое и число 10 – четное»,

«число 7 простое и число 10 нечетное», «число 7 непростое и число 10 нечетное» ложны.

Результатом выполнения операции дизъюнкции будет ложь только в том случае, когда оба операнда ложны. Для получения истины хотя бы один операнд должен быть истинным.

Например, три составных высказывания «число 7 – простое или число 10 – четное», «число 7 – непростое или число 10 – четное», «число 7 простое или число 10 нечетное» истинны, высказывание «число 7 – непростое или число 10 – нечетное» ложно.

Для задания логических операций используются таблицы истинности. В таблицах истинности перечисляются все возможные комбинации значений логических переменных (операндов) и результаты выполнения соответствующих логических операций. Как правило, используются обозначения логических значений 0 (ложь) и 1 (истина).

В таблице 3.1 приведены таблицы истинности для основных логических операций.

Таблица 3.1 – Основные логические операции

Операнды		Отрицание	Конъюнкция	Дизъюнкция	Исключающая дизъюнкция
A	B	$\neg A$	$A \text{ AND } B$	$A \text{ OR } B$	$A \text{ XOR } B$
0	0	1	0	0	0
0	1	–	0	1	1
1	0	0	0	1	1
1	1	–	1	1	0

Логические выражения реализуются блоком логических операций Logical Operation.

Выходным сигналом блока является 1, если результат вычисления логической операции есть «ИСТИНА», и 0 – если результат «ЛОЖЬ».

Входные сигналы блока могут быть скалярными, векторными или матричными.

Если входные сигналы – векторы или матрицы, то блок выполняет поэлементную логическую операцию, при этом размерность входных сигналов должна совпадать.

Если часть входных сигналов – векторы или матрицы, а другая часть входных сигналов – скаляры, то блок выполняет логическую операцию для скалярных входных сигналов и каждого элемента векторных или матричных сигналов.

Размерность выходного сигнала в этом случае будет определяться размерностью векторных или матричных входных сигналов.

При выполнении логической операции отрицания блок будет иметь лишь один входной порт.

Входные сигналы могут быть как действительного, так и логического типа (boolean).

Примеры использования блока Logical Operation показаны на рисунке 3.1.

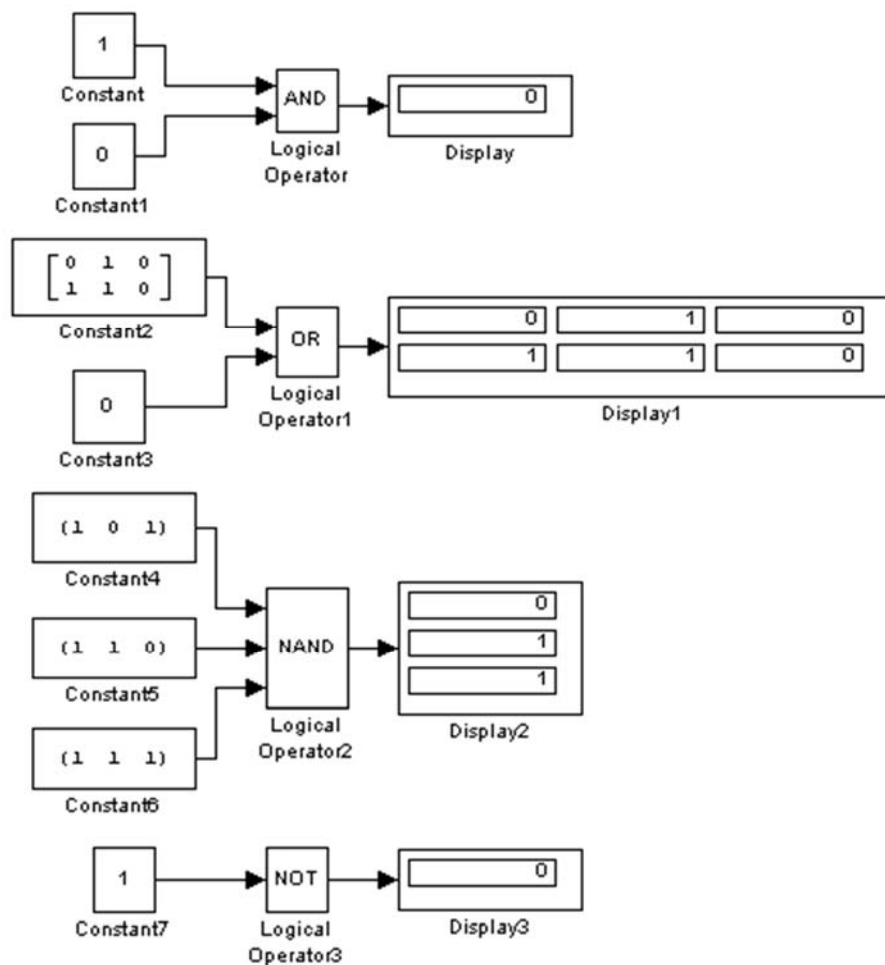


Рисунок 3.1 – Примеры использования блока Logical Operation

3.2 Порядок выполнения работы

Составить таблицу истинности для логических выражений (функций), приведенных в таблице 3.2. Перебрать все возможные варианты значений аргументов и их сочетания.

Таблица 3.2 – Индивидуальные задания

Вариант	Выражение
1	2
1	$(A \text{ AND } \neg B) \text{ OR } (\neg A \text{ AND } B) \text{ OR } (A \text{ AND } B)$
2	$(A \text{ XOR } B) \text{ AND } (A \text{ AND } B \text{ AND } \neg C) \text{ XOR } (A \text{ AND } \neg B)$
3	$\neg A \text{ AND } \neg B \text{ AND } \neg C \text{ OR } A \text{ AND } B \text{ AND } C$
4	$\neg A \text{ AND } B \text{ OR } \neg A \text{ AND } \neg C \text{ OR } \neg B \text{ XOR } \neg C$
5	$B \text{ AND } (\neg B \text{ AND } C \text{ OR } \neg B \text{ AND } A) \text{ AND } \neg A$

Окончание таблицы 3.2

1	2
6	$\neg(A \text{ AND } B \text{ OR } \neg C) \text{ OR } \neg B$
7	$A \text{ AND } (\neg A \text{ AND } B \text{ XOR } A \text{ AND } \neg C) \text{ AND } \neg A$
8	$A \text{ AND } (\neg A \text{ AND } B \text{ OR } A \text{ AND } \neg B) \text{ OR } \neg B$
9	$C \text{ AND } (\neg(A \text{ OR } B) \text{ XOR } A \text{ AND } B)$
10	$\neg A \text{ OR } \neg B \text{ AND } (\neg A \text{ OR } A \text{ AND } B) \text{ OR } \neg B$

Выполнить проверку составленной таблицы истинности, реализовав логическую функцию в виде блок-диаграммы Simulink.

Контрольные вопросы

- 1 Составьте таблицу истинности логической операции AND.
- 2 Составьте таблицу истинности логической операции XOR.
- 3 Составьте таблицу истинности логической функции $(A \text{ OR } B) \text{ AND } C$.

4 Практическая работа № 4. Настройка решателей обычных дифференциальных уравнений в Simulink

Цель работы: получить практические навыки настройки параметров решателя ОДУ в Simulink.

4.1 Теоретические сведения

Simulink имеет в своем составе обширный набор методов решения (решателей) с постоянным (Fixed-step) и переменным (Variable-step) шагом.

По сути решатели – это числовые алгоритмы интегрирования, которые вычисляют динамику системы в течение определенного промежутка времени, используя информацию, содержащуюся в модели.

Simulink предоставляет решатели для выполнения симуляции широкого диапазона типов систем, включая системы непрерывного времени (аналоговые), дискретного времени (цифровые), гибридные (со смешанным сигналом) и системы с различными периодами дискретизации сигнала.

Правильный выбор и настройка решателя позволяют выполнить симуляцию жёстких систем и систем с разрывами.

Ниже приведено краткое описание решателей, используемых в Simulink.

Методы с постоянным шагом:

- ode1 – метод Эйлера. Явный одношаговый метод первого порядка. Требует небольших вычислительных затрат, но обладает сравнительно низкой точностью;
- ode2 – метод Хойна. Явный одношаговый метод второго порядка;

- ode4 – явный одношаговый метод Рунге – Кутты 4-го порядка;
- ode5, ode8 – явные одношаговые методы Дормана – Принса 5-го и 8-го порядков точности соответственно;
- ode14x – метод Ньютона с экстраполяцией. Неявный одношаговый метод. Требуется значительных вычислительных затрат, но обладает высокой точностью при прочих равных условиях, чем другие методы.

Методы с переменным шагом:

- ode23 – явный одношаговый метод переменного (2-го или 3-го) порядка точности. Может быть более эффективен для решения систем низкой жесткости при наличии грубых допусков на точность, чем метод ode45;
- ode45 – явный одношаговый метод Рунге – Кутты с переменной точностью. Решение 5-го порядка используется в качестве начального значения для следующего шага, а решение 4-го порядка – для определения локальной погрешности выполненного шага интегрирования (с целью последующего управления длиной шага);
- ode113 – метод Адамса. Многошаговый метод переменного порядка (1...13). Может быть более эффективен, чем метод ode45, при жестких допусках на точность решения;
- ode15s, ode23s – многошаговый и одношаговый методы переменного порядка соответственно. Эффективны при решении жестких систем при наличии грубых допусков на точность.

4.2 Порядок выполнения работы

Индивидуальные задания для выполнения работы взять из [8, подраздел 7.2]. Составить уравнения движения двухмассовой колебательной системы. Создать блок-диаграмму Simulink для решения уравнений движения.

Настроить модель таким образом, чтобы сохранять в рабочую область результаты моделирования: перемещения и скорости сосредоточенных масс, усилия в упругих и диссипативных элементах.

В окне Configuration Parameters модели (Ctrl + E) выбрать тип решателя с переменным шагом (Variable-step).

Выбрать решатель ode23, оставив остальные параметры по умолчанию. Запустить симуляцию модели.

Построить графики результатов, оценить количество шагов времени, необходимых для решения задачи.

Установить параметру Relative tolerance значение $1e-4$. Повторить симуляцию модели. Построить графики результатов.

Сравнить их с графиками, полученными в предыдущем случае.

Повторить запуск симуляции со значением параметра Relative tolerance, равным $1e-6$. Сравнить результаты.

Вернуть параметру Relative tolerance значение $1e-3$. Сравнить между собой результаты симуляции, выбрав решатели ode45, ode23s, ode15s.

Сделать выводы относительно влияния параметров решателя на точность получаемых результатов.

Контрольные вопросы

- 1 Характеристика решателей Simulink.
- 2 Основные настройки решателей и их рекомендуемые значения.
- 3 Методика выбора решателя для моделирования.
- 4 Особенности применения решателей с постоянным шагом.
- 5 Особенности применения решателей с переменным шагом.

5 Практическая работа № 5. Подготовка расчетных моделей тонкостенных конструкций

Цель работы: получить практические навыки подготовки оболочечных расчетных моделей.

5.1 Теоретические сведения

Расчетные модели с использованием оболочечных конечных элементов имеют ряд преимуществ по сравнению со стержневыми моделями, а в некоторых случаях их применение может дать существенный эффект с точки зрения как оптимизации конструкций, так и скорости, наглядности и простоте получения результатов расчета с использованием современных программных комплексов.

К преимуществам оболочечных расчетных моделей можно отнести следующие:

- подробный и наглядный анализ напряженно-деформированного состояния;
- точный расчет на устойчивость в пределах упругих деформаций, что особенно важно при расчетах рам на основе сварных двутавров переменного сечения;
- существенно большие возможности выполнения различных видов нелинейного анализа и, как следствие, выявление и более полное использование имеющихся резервов по несущей способности в сравнении со стержневыми моделями;
- в отдельных случаях (например, при построении расчетной модели рамы на основе двутавров переменного сечения) оболочечную модель оказывается построить быстрее, чем ее стержневую аппроксимацию стержневыми элементами постоянного сечения;
- возможность учета начальных несовершенств (например, кривизна стенки) или грибовидности фланцев в соединениях с высокопрочными преднапряженными болтами при использовании объемных элементов;
- оболочечные модели с применением нелинейного деформационного расчета можно применять при построении таблиц коэффициентов φ , φ_e , φ_b для профилей, отличных от нормированных в СНиП.

Следует отметить также, что иногда методики СНиП вообще не позволяют выполнить анализ несущей способности, в таких случаях альтернативы моделям с применением оболочечных, а иногда и объемных элементов просто не существует.

Оболочечные расчетные модели используются для анализа конструкций, у которых один из размеров значительно (в 100–500 и более раз) меньше двух других размеров.

Примерами конструкций, для которых оправдано использование оболочечных моделей, являются элементы кузова или кабины автомобиля, протяженные пролетные конструкции.

Геометрическую модель оболочечной конструкции можно создать с нуля в какой-либо САД-системе либо преобразовать существующую твердотельную модель в оболочечную средствами SolidWorks либо SolidWorks Simulation.

5.2 Порядок выполнения работы

Открыть в SolidWorks файл `solid_to_sheet.sldprt` с твердотельной объемной моделью кронштейна. Модель выполнена средствами листового металла постоянной толщины (рисунок 5.1).

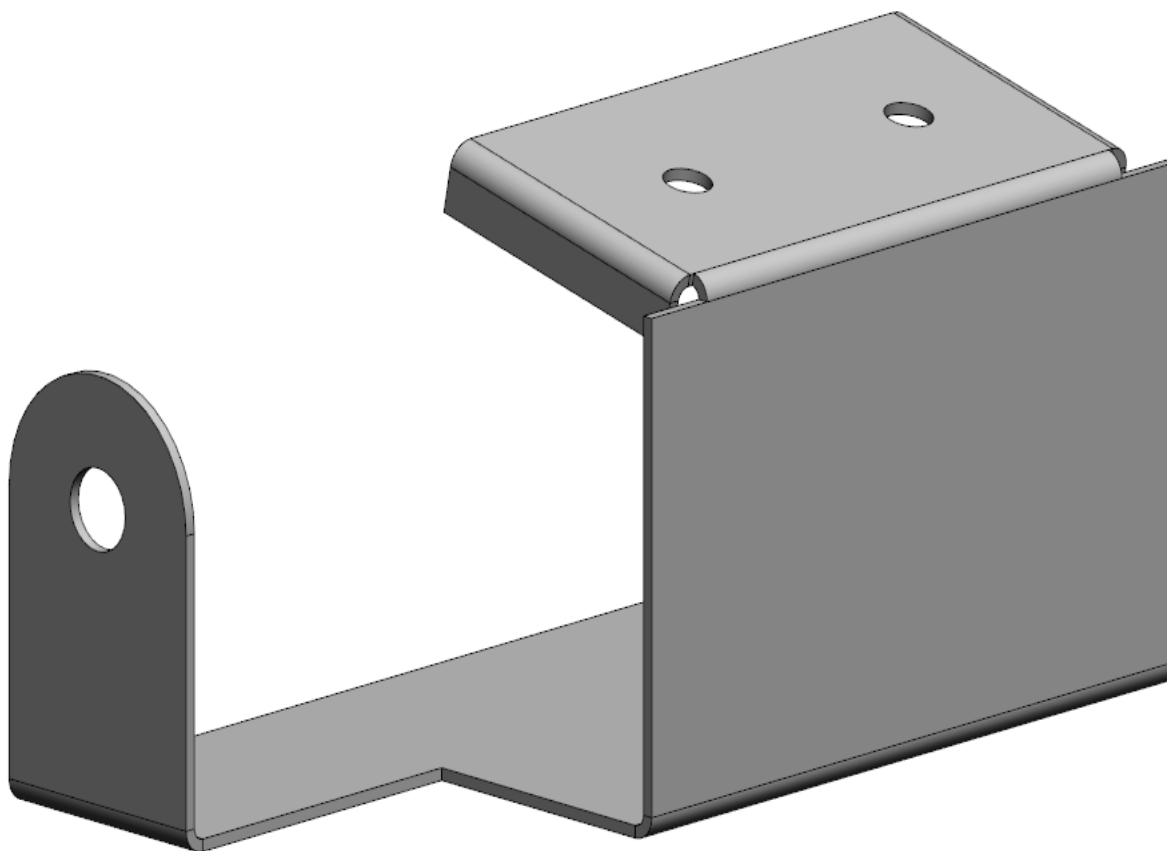


Рисунок 5.1 – Геометрическая твердотельная модель кронштейна

Для преобразования объемной модели в оболочечную необходимо воспользоваться командой Вставка – Поверхность – Срединная поверхность (Insert – Surface – Midsurface).

В диалоговом окне выбрать одну наружную и одну парную ей внутреннюю поверхности детали, после чего нажать кнопку «Найти парные грани» (Find Face Pairs).

SolidWorks выберет все сопряженные наружные и внутренние грани, результаты работы можно оценить в графическом окне (рисунок 5.2).

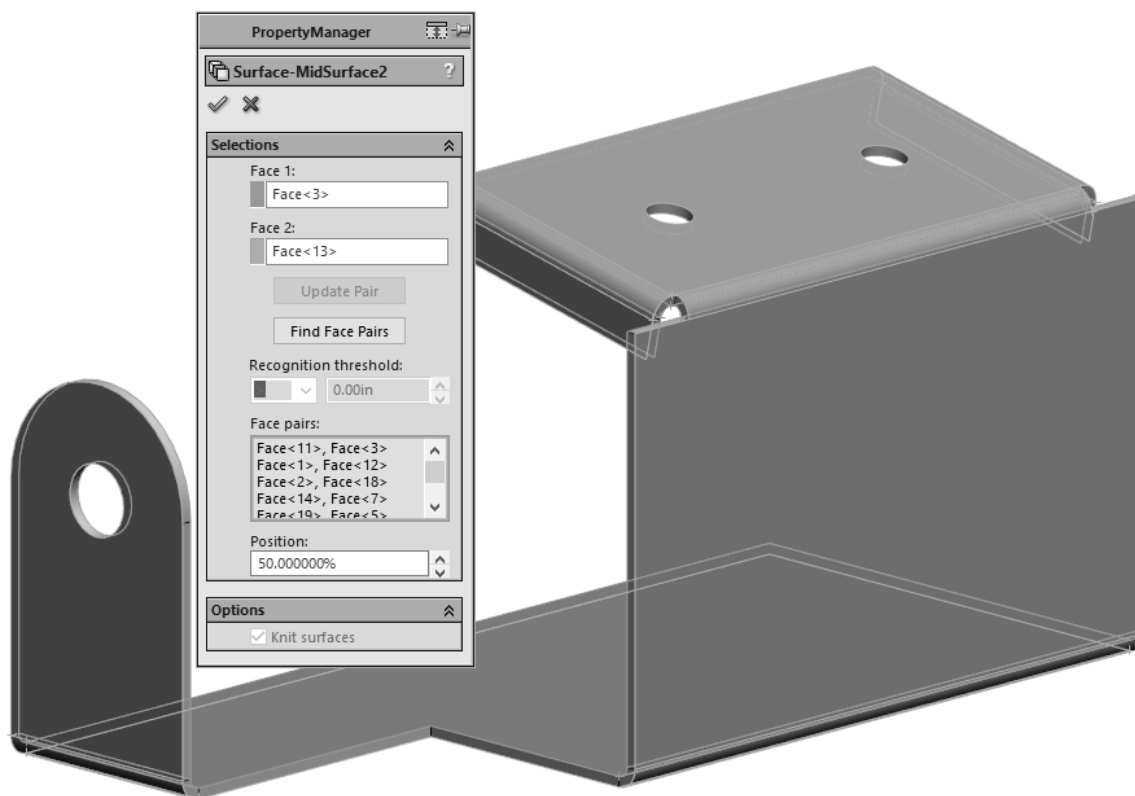


Рисунок 5.2 – Результат работы команды «Найти парные грани»

Завершить выполнение команды, нажав кнопку «ОК» в диалоговом окне SolidWorks. В результате твердотельная модель преобразуется в оболочечную.

Удалить из модели объемное тело, оставив только поверхность. Сохранить файл в рабочей директории под новым именем.

Создать новое статическое исследование SolidWorks Simulation.

Программа автоматически выбирает оболочечные конечные элементы для поверхностных геометрических моделей.

В диалоговом окне настроек исследования выбрать итерационный метод решения FFEPlus.

Из библиотеки материалов выбрать материал Легированная сталь (Alloy Steel) и применить к модели.

Выбрать формулировку оболочки «Тонкая» (Thin), задать ее толщину равной 3,8 мм (рисунок 5.3).

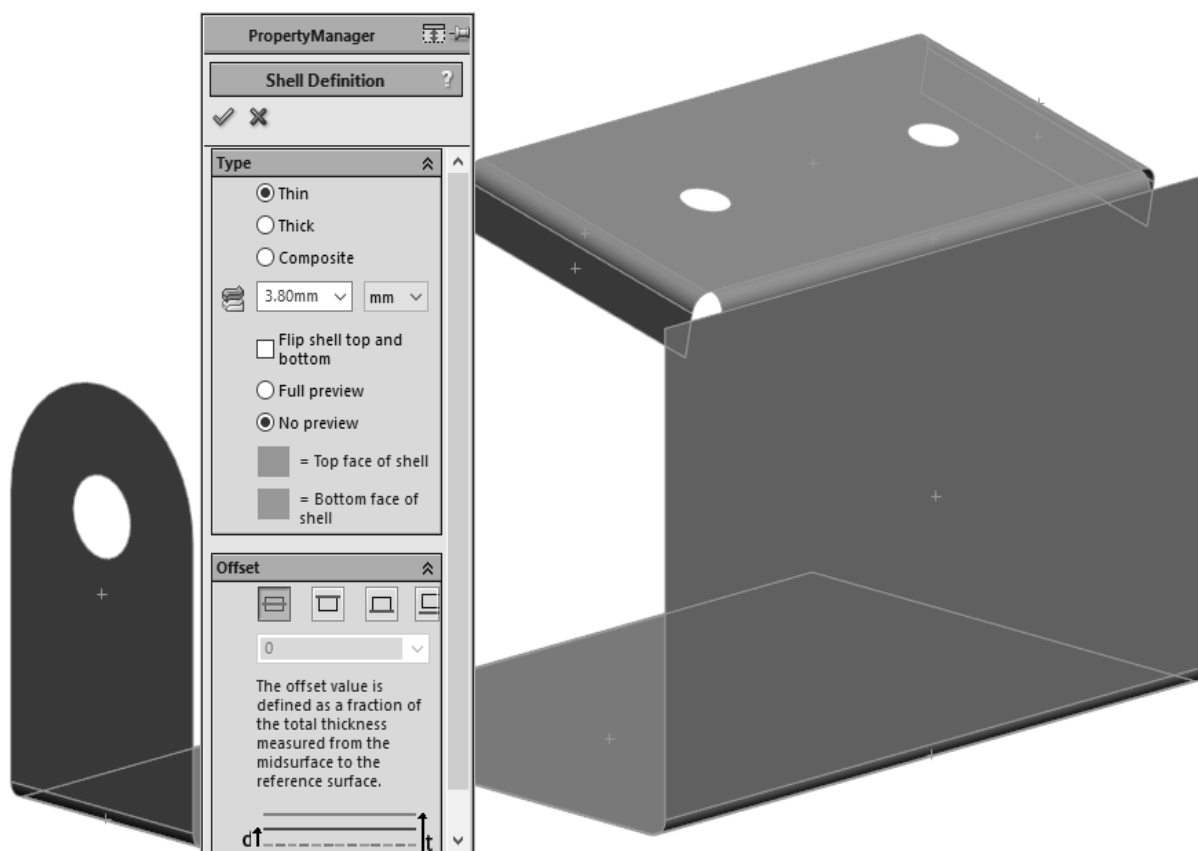


Рисунок 5.3 – Задание толщины оболочки

Смещение относительно срединной поверхности (симметрично в обе стороны) оставить по умолчанию.

Зафиксировать три круговых кромки отверстий.

Следует отметить, что оболочечные конечные элементы имеют шесть степеней свободы в каждом узле – три поступательные и три вращательные – и граничное условие «Зафиксированный» отнимет их все.

В то же время граничное условие «Неподвижный» фиксирует только поступательные степени свободы в узлах, оставляя вращательные.

Приложить давление величиной 6900 Па, как показано на рисунке 5.4.

Построить сетку конечных элементов, передвинув ползунок размера элемента в крайнее правое положение.

После построения оранжевым цветом будут выделены нижние поверхности оболочки, которые должны находиться на одной стороне геометрической модели.

Запустить исследование на выполнение.

По окончании расчета исследовать поля напряжений и перемещений на верхних и нижних поверхностях оболочек.

Сделать выводы.

Сохранить файл.

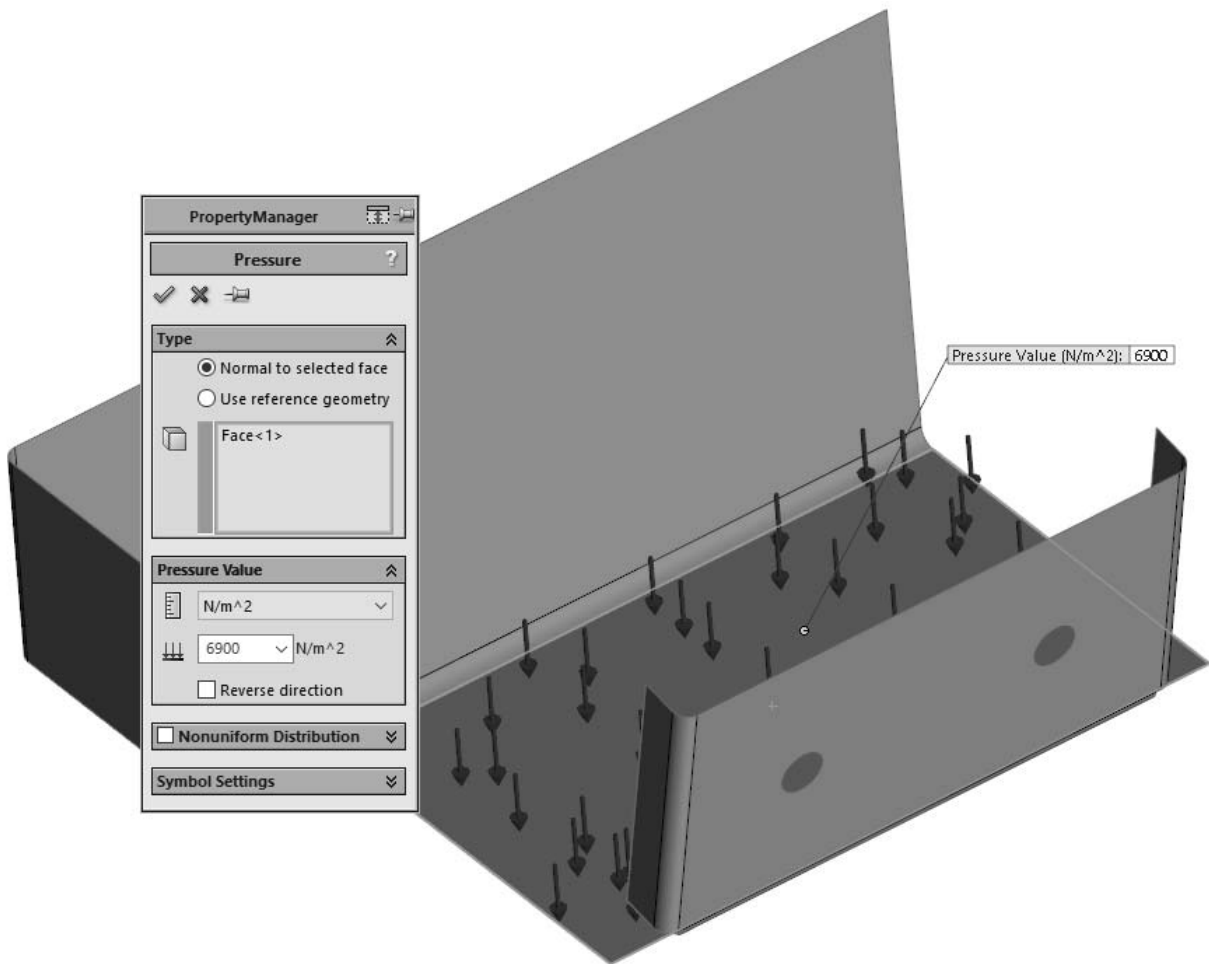


Рисунок 5.4 – Давление, приложенное к внутренней поверхности кронштейна

Контрольные вопросы

- 1 Особенности оболочечных конечных элементов.
- 2 Способы подготовки геометрической модели для использования оболочечных конечных элементов.
- 3 Анализ результатов расчета модели с использованием оболочек.

6 Практическая работа № 6. Подготовка расчетных моделей симметричных конструкций

Цель работы: получить практические навыки подготовки моделей к расчету с учетом симметрии.

6.1 Теоретические сведения

В инженерной практике довольно часто встречаются ситуации, когда конструкция имеет одну или несколько плоскостей симметрии и действующие нагрузки также симметричны относительно тех же плоскостей.

В таких ситуациях можно сэкономить временные и вычислительные ресурсы, поставив задачу с использованием только части конструкции (половины, четверти и т. д.).

Важно отметить, что поскольку объемные и оболочечные конечные элементы имеют разное число степеней свободы, то и подходы к заданию граничных условий симметрии для таких моделей различаются.

Так, для объемных моделей достаточно запретить перемещение грани, лежащей в плоскости симметрии, в нормальном направлении.

Для оболочечных конечных элементов, помимо фиксации перемещения по нормали к плоскости симметрии, необходимо дополнительно запретить вращения относительно осей, ортогональных к нормали.

Таким образом, для оболочечных моделей фиксируется одно перемещение и два вращения.

6.2 Порядок выполнения работы

Открыть файл `vessel_symmetry.sldprt`, который содержит геометрическую модель сосуда, нагруженного внутренним давлением. В силу симметрии рассматривается только четверть конструкции.

Файл содержит две конфигурации:

- 1) для объемной модели (Default);
- 2) для оболочечной модели (Shells).

Необходимо выполнить расчет обеих конфигураций с различным типом конечного элемента и сравнить результаты.

По умолчанию активной является конфигурация с объемной моделью.

Создайте новое статическое исследование SolidWorks Simulation. Из библиотеки материалов выберите легированную сталь (Alloy Steel).

На внутренние поверхности приложите давление, равное 1,38 МПа (рисунок 6.1).

Задайте граничное условие симметрии на торцовых поверхностях модели, совпадающих с плоскостями симметрии (рисунок 6.2).

Зафиксируйте одну из угловых вершин (рисунок 6.3). Это придаст модели дополнительную стабильность при расчете, и в случае корректного задания граничных условий реакция в этой вершине должна быть близка к нулю.

Постройте сетку конечных элементов. Сохраните проект и запустите исследование на расчет.

По окончании расчета выведите и проанализируйте поле эквивалентных напряжений по Мизесу.

Сделайте активной конфигурацию с оболочечной моделью. Создайте новое статическое исследование SolidWorks Simulation, задайте материал. Определите толщину оболочки, равную 12,7 мм.

Приложите давление в поверхностям модели, равное 1,38 МПа.

Задайте граничное условие симметрии, выбрав все кромки по периметру модели. Программа автоматически фиксирует необходимые степени свободы.

Зафиксируйте по всем степеням свободы одну из вершин конструкции,

совпадающих с осью вращения.

Постройте сетку конечных элементов. Сохраните проект и запустите исследование на расчет.

По окончании расчета выведите и проанализируйте поле эквивалентных напряжений по Мизесу на верхней стороне оболочки.

Сравните результаты двух расчетов. Вычислите относительную разницу максимальных напряжений. Сделайте вывод.

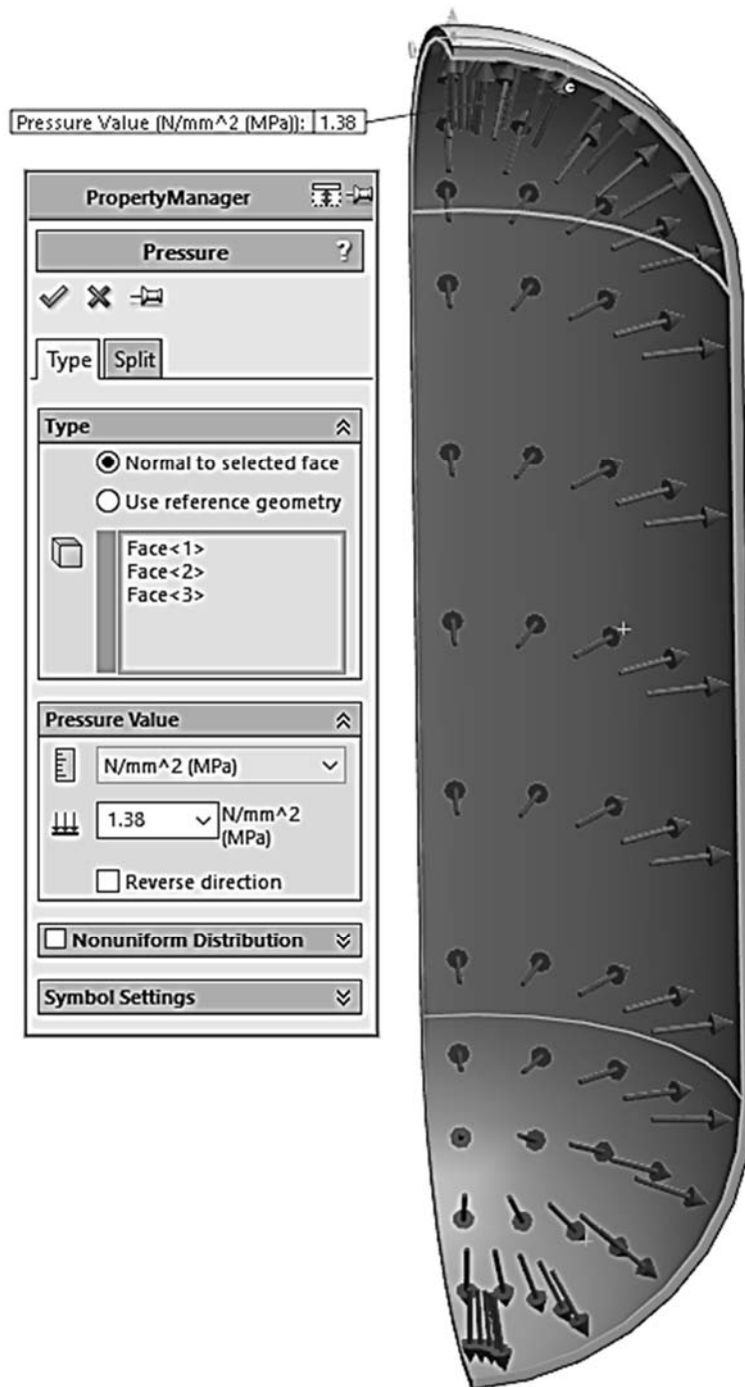


Рисунок 6.1 – Давление на внутренних поверхностях сосуда

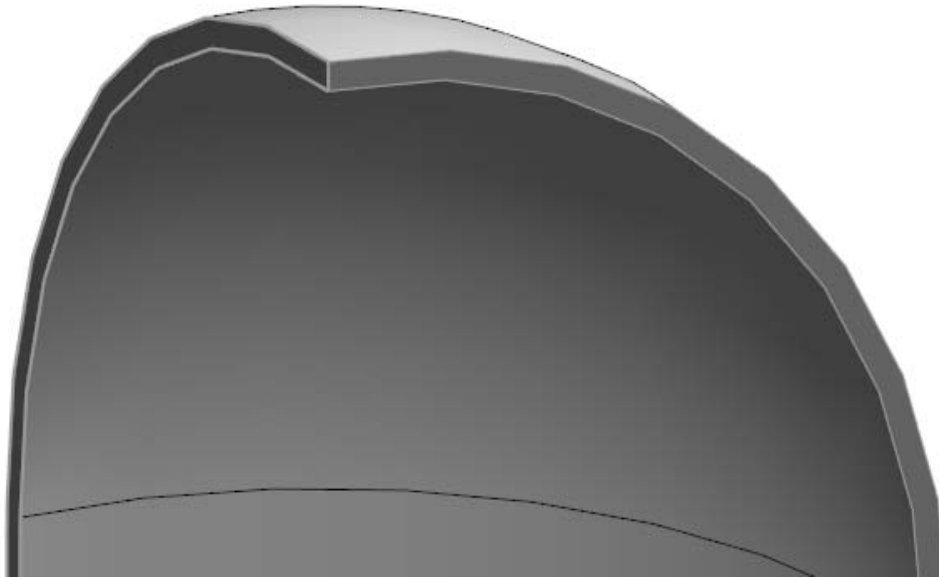


Рисунок 6.2 – Граничное условие симметрии на торцовых гранях

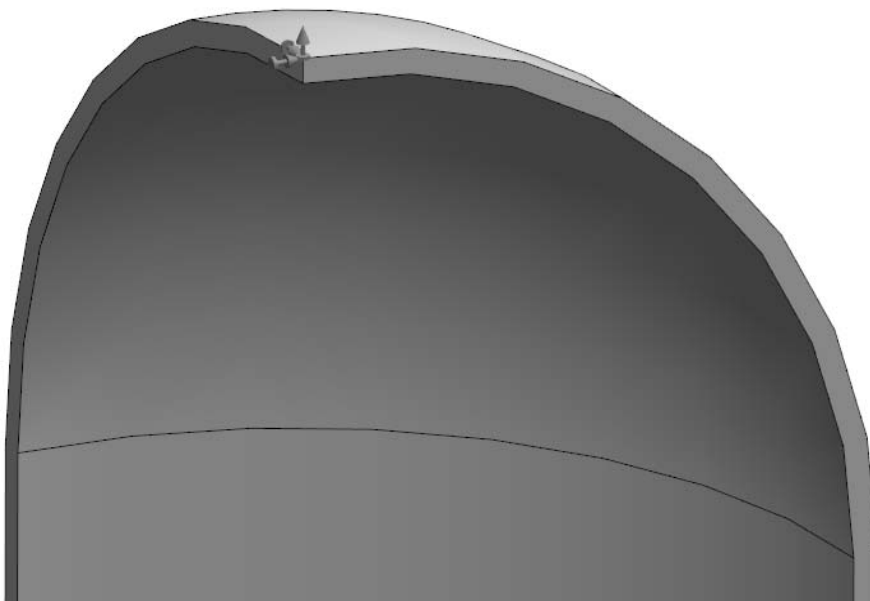


Рисунок 6.3 – Зафиксированная вершина

Контрольные вопросы

- 1 Предпосылки для использования граничных условий симметрии при расчете конструкций.
- 2 Особенности использования граничных условий симметрии для объемной конструкции.
- 3 Особенности использования граничных условий симметрии для тонкостенной (оболочечной) конструкции.

7 Практическая работа № 7. Подготовка расчетной модели анализа болтовых соединений

Цель работы: получить практические навыки подготовки к расчету моделей, содержащей болтовые соединения.

7.1 Теоретические сведения

В машиностроении применяют три основных вида крепежных резьбовых соединений:

- 1) болтами с гайками;
- 2) ввертными болтами (винтами);
- 3) шпильками.

Детализированное моделирование резьбовых соединений представляет определенные трудности, поскольку придется решать контактную задачу и разрешать сеткой конечных элементов резьбу.

Для корректного описание резьбового участка рекомендуется использовать размер конечного элемента, составляющий 25 % от шага резьбы, что, в свою очередь, приведет к значительному увеличению размерности задачи.

Кроме того, возникает проблема задания предварительной затяжки соединения.

Поскольку крепежные элементы стандартизованы и подбираются по специальным методикам, то обычно при расчете конструкций методом конечных элементов прибегают к упрощению соединительных элементов и выполняют их в виде балок постоянного сечения либо используют так называемые виртуальные соединители, которые предоставляются функционалом расчетной программы.

Инструменты SolidWorks Simulation позволяют пользователю определить тип соединителя, выбрать для него материал из библиотеки или задать свойства вручную, определить усилие предварительной затяжки, установить желаемый коэффициент запаса и сравнить его с рассчитанным.

7.2 Порядок выполнения работы

Откройте файл `bolted_connection.sldprt`, который содержит модель кронштейна, прикрепленного к некому основанию.

Поведение основания под нагрузкой расчетчика не интересует, поэтому оно будет заменено специальным видом контакта «виртуальная стенка».

Создайте новое статическое исследование Simulation. Из библиотеки выберите и примените к детали сталь AISI 1020.

Задняя стенка кронштейна совпадает со справочной плоскостью «Справа». Создайте контакт типа «Виртуальная стенка» между задней стенкой кронштейна и справочной плоскостью.

Оставьте виртуальную стенку жесткой, коэффициент трения задайте равным 0,1.

С помощью контекстного меню группы «Соединения» создайте соединитель типа «Болт основания», выбрав круговую кромку отверстия на передней грани кронштейна и справочную плоскость «Справа» (рисунок 7.1).

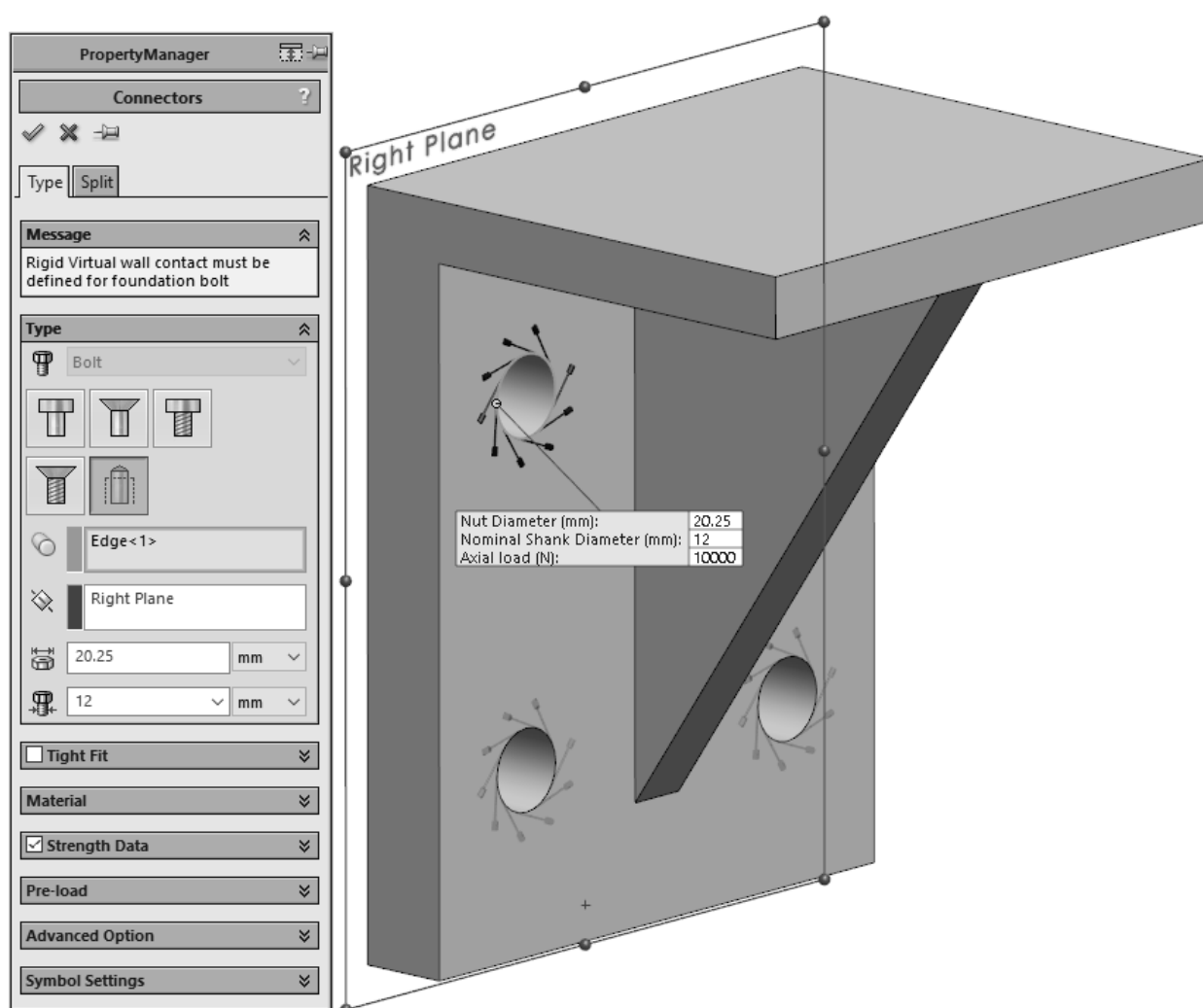


Рисунок 7.1 – Параметры болтового соединителя

Установите диаметр контактной поверхности шайбы 20,25 мм, диаметр стержня болта – 12 мм.

Убедитесь, что в качестве материала для болта задана легированная сталь.

В разделе «Данные прочности» задайте площадь поперечного сечения болта по внутренней части витков резьбы, равную 86 мм².

Установите осевую силу предварительной затяжки болта, равную 10000 Н. Закройте диалоговое окно кнопкой ОК и повторите процесс для остальных отверстий.

На верхнюю грань кронштейна приложите равномерную силу величиной 15 кН.

Создайте сетку конечных элементов. Полностью готовая к расчету модель должна иметь вид, как на рисунке 7.2.

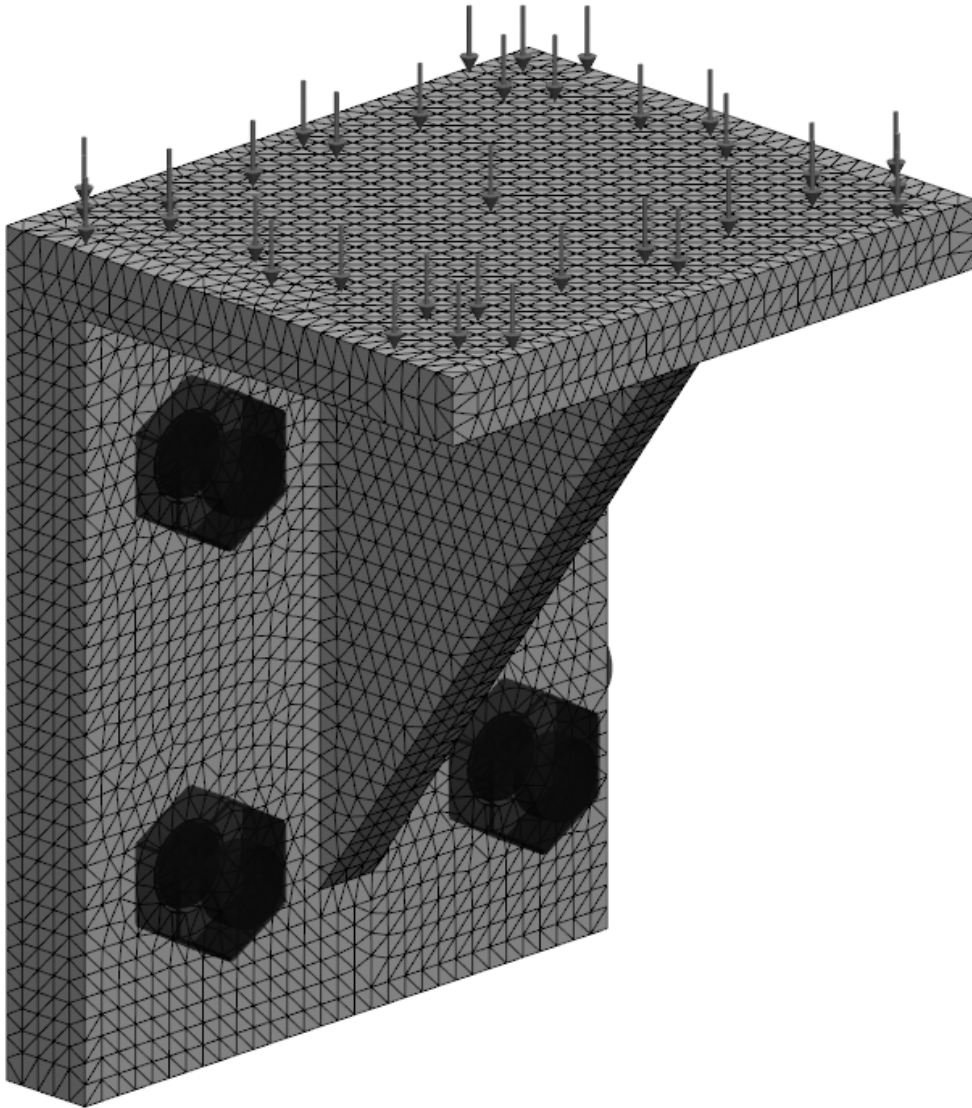


Рисунок 7.2 – Готовая к расчету модель с болтовыми соединителями

Сохраните проект и запустите модель на расчет.

По окончании расчета выведите поля напряжений и перемещений, проанализируйте результаты.

Определите места с высокими градиентами напряжений.

Выведите эпюру проверки болта, которая отображает рассчитанные коэффициенты запаса болтов и сравнивает их с заданными.

Оцените значения рассчитанных коэффициентов запаса.

Уменьшите размер конечных элементов в местах с высокими градиентами напряжений.

Для этого воспользуйтесь инструментом «Применить элемент управления сеткой» в контекстном меню раздела «Сетка».

Сохраните проект и перезапустите расчет.

Оцените результаты расчета и сравните их с предыдущими.

Контрольные вопросы

- 1 Преимущества использования виртуальных соединителей в расчетных моделях.
- 2 Основные типы и настройки виртуальных болтовых соединителей.
- 3 Анализ результатов расчета модели с болтовыми соединителями.

8 Практическая работа № 8. Подготовка расчетной модели из нелинейного материала

Цель работы: получить практические навыки задания свойств нелинейного (сверхупругого) материала.

8.1 Теоретические сведения

В инженерной практике встречаются исследования, требующие учета нелинейных свойств материалов, когда нет линейной зависимости между напряжениями и деформациями, как в законе Гука.

На характер этой зависимости может влиять история нагружения конструкции, продолжительность действия нагрузок, тепловые воздействия, величина деформаций и другие факторы.

Некоторые материалы проявляют существенную нелинейность уже при малых деформациях.

Примерами являются чугун и некоторые керамические материалы. Однако при снятии нагрузки, ведущей к умеренной деформации, они возвращаются в исходное состояние по той же диаграмме деформации, т. е. их отклик является упругим.

Для описания таких материалов необходима нелинейная упругая модель.

Для учета нелинейных свойств металлических материалов требуется задание упруго-пластической кривой деформирования за пределом текучести.

Особый класс представляют собой сверхупругие материалы, которые имеют существенно нелинейные зависимости напряжений от деформаций.

Для описания механических свойств таких материалов разработаны специальные энергетические модели (Муни – Ривлина, Блатц – Ко, Огдена и др.), параметры которых получают на основе обработки экспериментальных данных.

8.2 Порядок выполнения работы

Откройте файл сборки `nl_o_ring.sldasm`, содержащий геометрические модели уплотнительного кольца, корпуса с канавкой и прижимной пластины (рисунок 8.1). Вследствие круговой симметрии модели анализируется сектор величиной 1 град.

Создайте новое нелинейное исследование и настройте его параметры, как показано на рисунке 8.2.

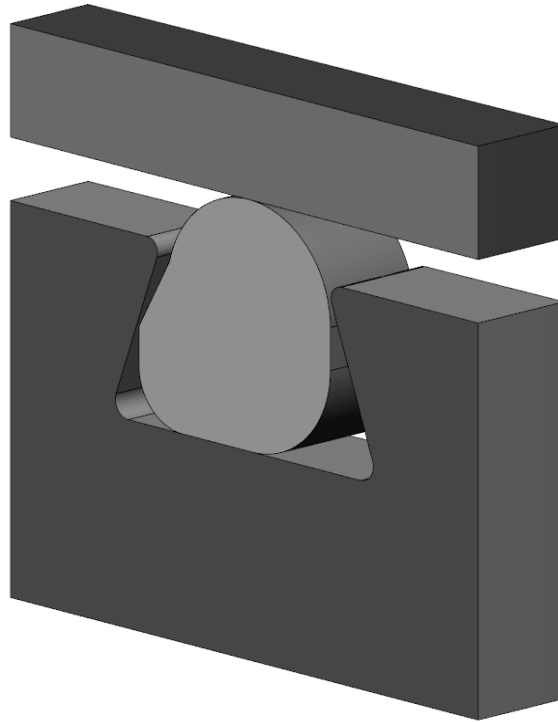


Рисунок 8.1 – Геометрическая модель с резиновым уплотнением

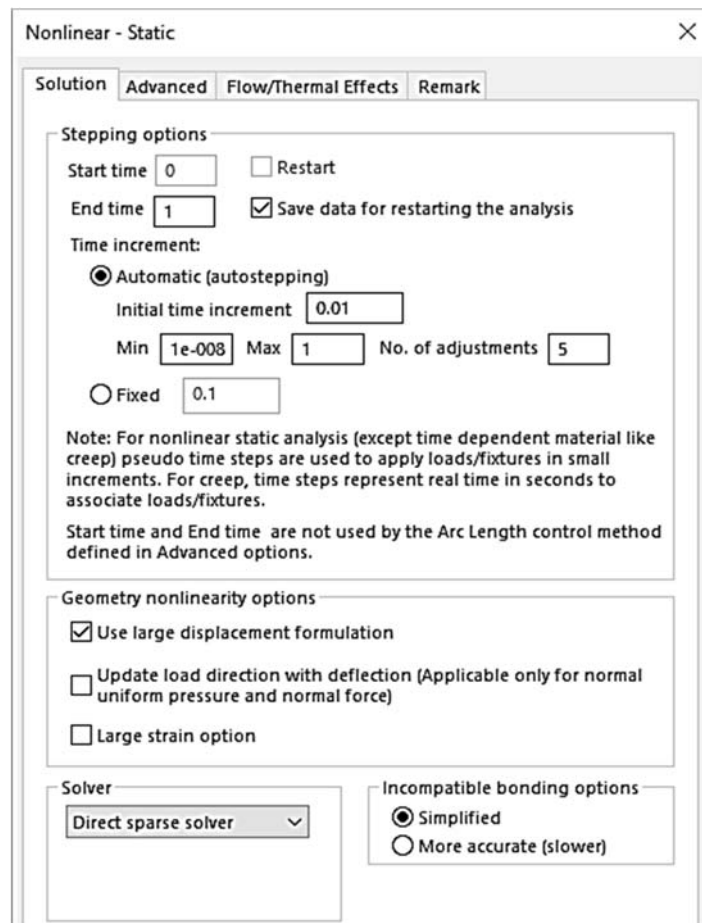


Рисунок 8.2 – Настройки нелинейного исследования

Из стандартной библиотеки материалов выберите сталь AISI 304 и примените его для корпуса с канавкой и прижимной пластины.

Создайте новый материал пользователя для уплотнительного кольца.

В качестве модели материала выберите опцию Сверхупругий – Mooney Rivlin.

Выберите систему единиц СИ и введите следующие параметры материала:

– коэффициент Пуассона – 0,4995;

– коэффициент теплового расширения – 0,00067;

– первая постоянная материала – 5,791596126e6 Па;

– вторая постоянная материала – 1,447899032e6 Па;

– плотность – 1000 кг/м³ (величина плотности не имеет значения в данном исследовании, но является требуемым физическим свойством);

– прочность при растяжении – 1,37871e7 Па.

Примените созданный материал к уплотнительному кольцу и закройте диалоговое окно.

Примените граничные условия симметрии по соответствующим граням всех деталей. Для этого в разделе расширенных креплений выберите пункт «На плоских гранях», выберите передние и задние плоские грани всех деталей и задайте им перемещение по нормали равное нулю.

Для фиксации модели в радиальном направлении выберите наружную цилиндрическую грань корпуса и в разделе расширенных креплений задайте ей радиальное перемещение равное нулю.

Задайте нижней грани корпуса нормальное перемещение, равное нулю.

Задайте перемещение верхней грани прижимного кольца, равное 1,4 мм, направленное в сторону корпуса.

Определите наборы контактов между соответствующими гранями всех компонентов модели.

Выберите боковые грани уплотнительного кольца в качестве контактных, а ответные поверхности корпуса и прижимной пластины – в качестве целевых. Тип контакта установите «Нет проникновения», формулировку контакта – «Узел к поверхности».

Постройте сетку конечных элементов со средним размером, равным 1,25 мм, сохраните проект и запустите исследование на расчет.

По окончании расчета выведите поля эквивалентных напряжений, контактного давления, вертикальных перемещений.

Оцените поведение уплотнительного кольца при сжатии, создав анимацию результатов.

Постройте график вертикальной реакции корпуса.

Контрольные вопросы

1 Основные источники нелинейностей.

2 Порядок задания свойств сверхупругих материалов.

3 Основные настройки нелинейного решателя SolidWorks Simulation.

Список литературы

- 1 **Берлинер, Э. М.** САПР конструктора машиностроителя / Э. М. Берлинер, О. В. Таратынов. – Москва: ИНФРА-М, 2015. – 288 с.
- 2 **Основы автоматизированного проектирования: учебник / под ред. А. П. Карпенко.** – Москва: ИНФРА-М, 2015. – 329 с.
- 3 **Алямовский, А. А.** SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
- 4 **Дударева, Н. Ю.** SolidWorks 2011 на примерах / Н. Ю. Дударева, С. А. Загайко. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. – 496 с.
- 5 **Гультияев, А.** Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс / А. Гультияев. – Санкт-Петербург: Питер, 2002. – 432 с.
- 6 **Дементьев, Ю. В.** САПР в автомобиле- и тракторостроении: учебник / Ю. В. Дементьев, Ю. С. Щетинин; под ред. В. М. Шарипова. – Москва: Академия, 2004. – 224 с.
- 7 **Дьяконов, В. П.** MATLAB 6.5 SP1 / 7 / 7SP1 / 7SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – Москва: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.
- 8 **САПР механизмов автомобилей: методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальности 1-37 01 02 «Автомобилестроение» / сост. Ю. С. Романович.** – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 40 с.