

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Основы проектирования машин»

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИЗДЕЛИЙ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий
на основе трехмерных технологий»
очной и заочной форм обучения*

Часть 2



Могилев 2023

УДК 621.81
ББК 34.44
К65

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Основы проектирования машин» «22» марта 2023 г.,
протокол № 8

Составитель канд. техн. наук, доц. А. П. Прудников

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е. В. Ильюшина

Изложены краткие теоретические сведения и приведены примеры решения задач, выполняемых на практических занятиях студентами специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИЗДЕЛИЙ

Часть 2

Ответственный за выпуск	А. П. Прудников
Корректор	А. А. Подошевка
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 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 Моделирование в Компас-3D.....	5
2 Анимация движения механизма в Компас-3D	8
3 Моделирование в SolidWorks.....	11
4 Кинематический анализ в SolidWorks для плоских механизмов	13
5 Кинематический анализ в SolidWorks для объемных механизмов.....	17
6 Кинематический анализ в SolidWorks для зубчатых механизмов	19
7 Кинематический анализ в SolidWorks для кулачковых механизмов.....	23
8 Силовой анализ в SolidWorks для плоских механизмов	26
9 Силовой анализ в SolidWorks для объемных механизмов.....	29
10 Силовой анализ в SolidWorks для зубчатых механизмов	30
11 Силовой анализ в SolidWorks для кулачковых механизмов.....	31
12 Моделирование в NX.....	31
13 Кинематический анализ в NX.....	34
14 Силовой анализ в NX.....	36
15 Моделирование в MSC.ADAMS.....	38
16 Симуляционное моделирование подъемного механизма в MSC.ADAMS	41
17 Симуляционное моделирование кулачково-рычажного механизма в MSC.ADAMS	44
Список литературы	47

Введение

Методические рекомендации составлены в соответствии с учебной программой по дисциплине «Конструирование и расчет изделий» для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» очной и заочной форм обучения.

Целью изучения дисциплины «Конструирование и расчет изделий» является ознакомление с основами проектирования изделий и выбором оптимальной конструкции изделия, изучение расчетов конструкции на прочность, жесткость и надежность, оценка эффективности принимаемых решений.

Конструирование и расчет является одним из основных этапов проектирования изделия, целью которого является установление необходимых размеров узлов и деталей, соответствующих заданным нагрузкам и условиям работы.

В краткой форме изложены расчет соединений и основы работы в САПР для анализа механизмов, приведены примеры решения задач по темам практических занятий [1, 2].

Отчет по практическому занятию выполняется на отдельном листе либо в тетради. Рисунки и таблицы выполняют карандашом, а текст – ручкой.

Целью методических рекомендаций является помощь студентам для самостоятельной подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Конструирование и расчет изделий».

1 Моделирование в Компас-3D

Цель занятия: освоение приемов работы в Компас-3D.

Внешний и внутренний контур деталей при работе с прикладной библиотекой Shaft 2D строится поэтапно. Эта библиотека позволяет выполнять чертежи деталей, состоящих из набора различных простейших геометрических поверхностей вращения и призматических поверхностей. Также существует возможность дополнить чертеж детали шлицами, шпоночными пазами и другими конструктивными элементами. Кроме того, с помощью этой системы можно проектировать зубчатые передачи. В первую очередь необходимо проанализировать, какую форму и размеры имеют отдельные составляющие поверхности детали, и дополнительные конструктивные элементы (рисунок 1.1).

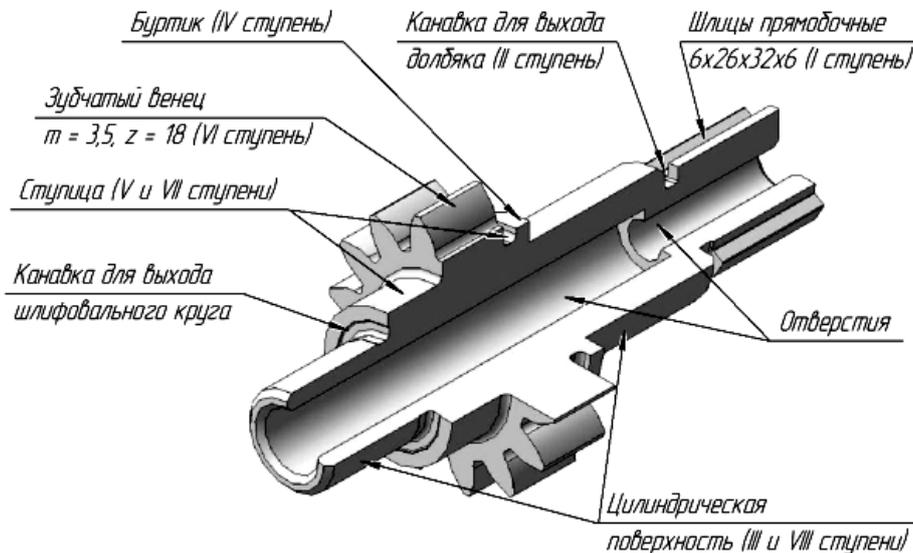


Рисунок 1.1 – Модель детали «Вал-шестерня»

Подключите библиотеку построения тел вращения Shaft 2D [3]:

Нажмите на кнопку «Менеджер библиотек» на Инструментальной панели Стандартная.

В открывшемся окне слева из списка выберите раздел Расчет и построение, а справа – Компас Shaft 2D.

Подключите раздел библиотеки Построение модели.

В строке меню открывшегося окна Компас Shaft 2D включите команду построения Новой модели и выберите тип отрисовки модели – в разрезе.

Установите и зафиксируйте курсор мыши в начале координат фрагмента (крайняя левая точка модели вала).

Постройте первую ступень вала – прямобочные шлицы $6 \times 26 \times 32 \times 6$.

Включите команду «Простые ступени» и из списка выберите построение Цилиндрической ступени.

В появившемся окне установите следующие параметры: длина 30 мм, диаметр 32 мм, фаска слева $2 \times 45^\circ$ (размерные значения рекомендуется выбирать из базы).

Закончите выбор параметров кнопкой «ОК».

Выберите команду «Дополнительные элементы ступени» и из появившегося списка выберите элементы «Шлицы» – «Прямобоочные».

Оставьте параметры, предложенные в появившемся окне, без изменения и нажмите кнопку «ОК».

С помощью команды «Простые ступени» постройте вторую ступень вала – канавку для выхода долбяка (диаметр 20 мм, длина 4 мм, галтель слева и справа радиусом 1 мм).

Самостоятельно постройте III, IV и V цилиндрические ступени вала

Постройте VI ступень вала – зубчатый венец шириной 18 мм, $m = 3,5$ мм, $z = 18$.

Включите команду построения «Элементов механической передачи» и из списка выберите построение Шестерни цилиндрической зубчатой передачи.

В открывшемся окне Комплекс программ GEARS включите команду «Запуск расчета», в следующем окне – «Геометрический расчет» и выберите вариант «По диаметрам вершин колес».

В окне Геометрический расчет установите следующие параметры: число зубьев ведущего колеса 18, ведомого – 36; модуль зацепления 3,5 мм; ширина зубчатых венцов 18 мм; диаметры вершин колес 70 мм и 133 мм; диаметры роликов колес назначьте рекомендуемые из списка (6, 212 мм). Остальные параметры оставьте без изменения.

Перейдите и включите команду «Выполнить расчет». В области окна Ход расчета появляется отметка об удовлетворительности заданных параметров качеству зацепления или даются рекомендации о их изменении. Если введенные параметры в норме, завершите расчет.

В окне «Выбор объекта построения» выберите Шестерня $z = 18$, выполните фаски $2 \times 45^\circ$, включите флажок «Размеры» и завершите команду построения кнопкой «ОК».

Достройте оставшиеся ступени внешней поверхности вала.

Постройте внутреннюю поверхность вала.

Включите команду построения отверстий Простые ступени и из списка выберите элемент «Цилиндрическая ступень».

Введите в открывшемся окне параметры отверстия: диаметр 10 мм, длина 40 мм, фаска слева $1,5 \times 45^\circ$.

Перетащите курсором разделитель ступеней вниз, чтобы отверстие располагалось с левого торца детали.

Постройте вторую ступень отверстия, для этого выделите в Дереве построений только что построенную I ступень, включите команду «Простые ступени», «Цилиндрическая ступень».

В поле диаметр введите значение диаметра отверстия – 16 мм, фаска справа 1,5 мм и завершите команду построения отверстия.

Выполните на последней цилиндрической ступени канавку для выхода шлифовального круга.

Перейдите в окно построения внешних ступеней детали. Выделите цилиндр $D = 25$ мм в Дереве построений, включите команду «Дополнительные элементы ступеней». В открывшемся списке выберите элемент «Канавка для выхода шлифовального круга».

Из предлагаемых системой вариантов выберите канавку для шлифования по цилиндру и торцу соответствующего вала положения, измените буквенное обозначение выносного элемента и нажмите кнопки «Применить» (на изображении вала появится только обозначение выносного элемента).

Постройте твердотельную модель вала. Запустите команду «Генерация твердотельной модели» из меню Дополнительные построения.

Задача для самостоятельного решения

Задание для самостоятельной работы приведено на рисунке 1.2. Необходимо построить 3D-модель вала (размеры задать самостоятельно).



Рисунок 1.2 – 3D-модель вала

Контрольные вопросы

- 1 Для чего служит библиотека Shaft 2D?
- 2 Как построить зубчатый венец?
- 3 Как построить отверстие?
- 4 Как сделать канавку для выхода шлифовального круга?

2 Анимация движения механизма в Компас-3D

Цель занятия: получение практических навыков работы с анимацией движения механизма в Компас-3D.

В режиме сборки при создании анимации к компонентам можно применять следующие действия:

- перемещение элемента или элементов сборки по траектории, которую можно задать с помощью 3D-сплайнов и 3D-ломаных;
- вращение компонента вокруг осей;
- управление прозрачностью элемента;
- использование переменных;
- создание траектории любой точки.

Для режима перемещения и вращения в отдельном диалоге могут задаваться такие параметры, как направление, скорость, время.

Режимы анимации Перемещение и Вращение могут быть применены в сборках над деталями и подсборками. Если в сборке присутствует подсборка, то применить какое-либо действие к ее компонентам невозможно, только к самой подсборке, потому что фактически все детали этой подсборки считаются зафиксированными.

Библиотека анимации вызывается нажатием кнопки «Менеджер библиотек» и находится в разделе «Прочие». Если пользователь часто пользуется библиотекой, то ее можно вынести отдельной иконкой на любую из панелей инструментов. Для этого потребуется: открыть ее в Менеджере библиотек; войти в меню Сервис – Настройка интерфейса; в окне Категории найти поле Библиотека анимации (по умолчанию она будет предпоследней в списке); схватить пиктограмму в правом поле Команды и перетащить на любую удобную панель инструментов. После таких нехитрых манипуляций библиотеку анимации можно будет вызывать одним нажатием на соответствующую пиктограмму.

Пункт Возврат в исходное состояние возвращает модель после очередной визуализации в исходное состояние, то есть все исключенные сопряжения включаются в расчет, тем самым возвращая компоненты в исходные точки с наложенными между ними связями. Такой маневр эффективен, потому что мы можем в любой момент остановить анимацию, если вдруг что-то пойдет не так. Вручную снова накладывать сопряжения очень долго, поэтому таким способом не только возвращается начало сценария, но и сама сборка возобновляет все связи и перестраивается в исходное положение.

Рассмотрим простейший пример анимации – перемещение шайбы вдоль оси болта [4]. Перед тем как приступить к созданию сценария анимации, необходимо создать сопряжения данных элементов, а также построить траекторию перемещения шайбы.

Для начала вставляем в сборку в начало координат элемент «Болт М8×16g×35 ГОСТ 7798–70», чтобы он сразу зафиксировался. Далее вставляем в сборку элемент «Шайба С.8.37 ГОСТ 11371–78» и настраиваем связи. Два элемента должны быть соосны. Можно также связать эти детали

совпадением соответствующих плоскостей, чтобы шайба не вращалась относительно оси болта. Лишим шайбу всех степеней свободы, создав сопряжение *На расстоянии* от шляпки болта равное 40 мм. В контексте сборки построим эскиз с отрезком, который начинается от проекции одной из граней шайбы длиной заведомо больше, чем расстояние сопряжения *На расстоянии* (рисунок 2.1). Это делается для того, чтобы в дальнейшем продемонстрировать, как работает функция соударения компонентов.

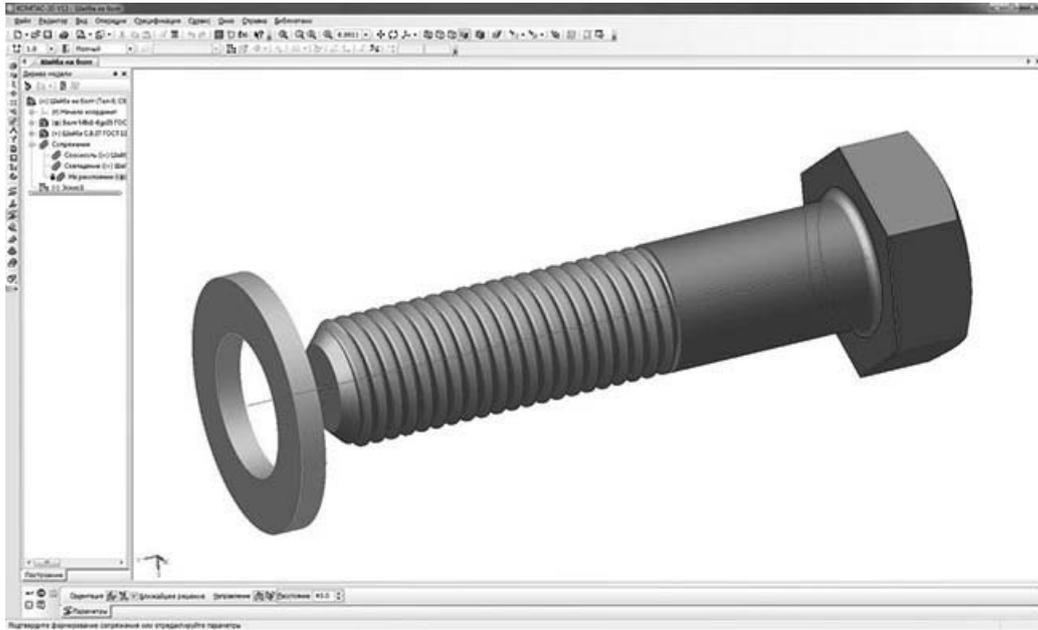


Рисунок 2.1 – Создание эскиза отрезка траектории в контексте сборки и настройка сопряжений

Для данного сценария сделаем всего один шаг – Шаг 1. Создавать его из меню Шаги нет необходимости, потому что при старте диалогового окна библиотеки анимации Шаг 1 присутствует в контексте сценария по умолчанию.

Следующий этап – добавление компонента, который будет подвергаться перемещению. В меню Компоненты и переменные выбираем пункт Добавить компоненты – В дереве сборки. Выбираем в дереве построения шайбу (элемент в окне сборки подсвечивается красным цветом) и нажимаем Ок в появившемся окошке. Также элемент можно выбрать в окне модели, нажав, к примеру, на любую из его граней. Шайба появляется в дереве анимации в соответствующем шаге.

Чтобы построить траекторию, необходимо выделить в дереве анимации шайбу (в окне сборки она подсвечивается желтоватым цветом) и войти в меню Параметры. Выбираем пункт Добавить траекторию – В дереве сборки и указываем в окне сборки левой клавишей мыши отрезок. В появившемся диалогом окне настраиваем направление (прямое или обратное), скорость перемещения или время, за которое шайба должна пройти данный путь.

В дереве анимации в раскрывающемся списке Шаг 1 – Шайба С.8.37 ГОСТ 11371–78 появляется пиктограмма траектории, одновременно с этим в дереве построения сборки появляется 3D-сплайн. При создании сценария ани-

мации сопряжения элементов, участвующие в визуализации и перемещении в пространстве, следует исключить из дерева построения. Это можно сделать, не выходя из диалога сценария анимации.

Как уже упоминалось ранее, в этом примере можно описать функцию соударения компонентов при движении. Для этого в меню Соударения выбираем пункт Выбрать компоненты и в дереве построения или окне сборки указываем шайбу и болт. В меню Анимация – Настройки необходимо включить опцию Останавливать при соударении. После запуска анимации, как только шайба коснется шляпки болта, сборка выделяется красным цветом и анимация останавливается, что указывает на соударение компонентов. Это частный случай, когда специально было сделано преднамеренное превышение пути перемещения. В реальности такая функция носит более значимый характер – она служит для выявления коллизий при взаимном движении узлов и деталей в механизмах машин.

Для воспроизведения анимации воспользуемся меню Воспроизведение.

Для анимации вращения потребуется всего один шаг, поэтому, как и в предыдущем примере, при открытии диалога библиотеки анимации Шаг 1 уже присутствует в дереве анимации. Подробно расписывать все действия не имеет смысла, поэтому будем акцентировать внимание лишь на каких-то новых настройках. В данном примере необходимо добавить в дерево анимации компонент «Коленчатый вал» и выбрать ось вращения. Для этого требуется зайти в меню Параметры и выбрать пункт Вращение – Ось вращения – В дереве сборки.

В функционале Компас-3D, помимо позиционирующих сопряжений, присутствуют сопряжения механической связи: вращение – вращение, вращение – перемещение, кулачок – толкатель. Перемещение компонентов между собой происходит с учетом ограничений, налагаемых позиционирующими сопряжениями. Данные сопряжения позволяют немного увеличить потенциал операций вращения и перемещения при создании анимации.

Задача для самостоятельного решения

В анимации присутствует болт, две скрепляемые пластины, шайба обычная, шайба стопорная и гайка. В сборке зафиксируем болт, а остальные элементы сопряжем с ним соответствующими связями. Прделаем следующую последовательность: свинчивание гайки и снятие ее, снятие шайбы стопорной, снятие шайбы обычной, снятие одной пластины, а затем и другой. Все компоненты по мере снятия будут исчезать с помощью функции прозрачности компонента. После этого соберем всю сборку в обратном порядке.

Контрольные вопросы

- 1 Для чего используется анимация в Компас-3D?
- 2 Какие действия можно применить к компонентам сборки при создании анимации?
- 3 Как применить в сборке эффект вращения?
- 4 Какие применяются сопряжения механической связи для анимации?

3 Моделирование в SolidWorks

Цель занятия: получение практических навыков моделирования в SolidWorks.

Система трехмерного проектирования SolidWorks предназначена для создания конструкторской и технологической документации. В данной системе возможно создание трехмерных моделей деталей, сборочных единиц и рабочих чертежей.

При запуске SolidWorks по умолчанию открывается среда разработки. Для создания новой детали, сборки или чертежа необходимо воспользоваться командой «Файл – Создать» либо кнопкой «Создать».

После создания детали на экране отображается поле для проектирования, с левой стороны поля изображается дерево проектирования. В модели новой детали в дереве проектирования доступны для работы плоскости «Спереди», «Сверху», «Справа», а также исходная точка, расположенная в центре модели.

При работе с трехмерными изображениями деталей необходимо начинать с создания эскизов. Для создания эскизов следует выбрать одну из доступных плоскостей, щелкнув на плоскости в дереве проектирования левой клавишей мыши. Создание нового эскиза осуществляется при помощи команды «Вставка – Эскиз» либо при помощи кнопки «Эскиз». Во время нахождения в режиме эскиза становятся доступными команды создания и редактирования элементов эскиза «Линия», «Дуга», «Окружность», «Сплайн», «Прямоугольник», «Точка», «Осевая линия», «Преобразование объектов», «Зеркальное отражение», «Скругление», «Фаска», «Смещение объектов», «Отсечь», «Вспомогательная геометрия», «Прямоугольный массив», «Круговой массив».

Для создания простых трехмерных объектов следует воспользоваться командой «Вытянутая бобышка/основание». Данная команда позволяет на основании эскиза построить твердотельное изображение элемента, сечение которого определяется эскизом. Эскиз должен быть замкнут, линии эскиза не должны пересекаться. Перед выполнением команды следует закрыть эскиз. Команда «Вытянутая бобышка/основание» позволяет создавать трехмерные изображения деталей в нескольких режимах.

Для редактирования эскиза необходимо выбрать в дереве проектирования соответствующий элемент и нажать правую клавишу мыши, выбрать из контекстного меню команду «Редактировать эскиз».

Эскизы можно создавать не только на плоскостях дерева проектирования, но и на плоских поверхностях твердотельных изображений деталей.

Для построения изображений необходимо использовать команды работы с эскизами и трехмерными моделями, такие как зеркальное отражение, скругление, фаска, смещение, отсечь, удлинить, прямоугольный и круговой массив и др.

Рисование прямоугольника:

- нажмите на Corner Rectangle (Угловой прямоугольник) на панели инструментов «Sketch» (Инструменты эскиза);

- нажмите на исходную точку эскиза, чтобы начать рисование прямоуголь-

ника и переместите указатель вверх и вправо, чтобы создать прямоугольник, нажмите еще раз кнопку мыши, чтобы закончить рисование прямоугольника.

Добавление размеров:

- нажмите кнопку Smart Dimension (Автоматическое нанесение Размеров) на панели инструментов «Dimensions / Relations» (Размеры/взаимосвязи);
- нажмите на верхнюю линию прямоугольника;
- нажмите на текстовую область над линией, где указан размер. Появится диалоговое окно Modify (Изменить). Введите требуемый размер.

Изменение значений размеров:

- дважды нажмите на редактируемый размер. Появится диалоговое окно Modify (Изменить);
- введите новый размер в диалоговом окне Modify (Изменить).

Задача для самостоятельного решения

Построить твердотельную модель по эскизу на рисунке 3.1. Толщину детали задать самостоятельно.

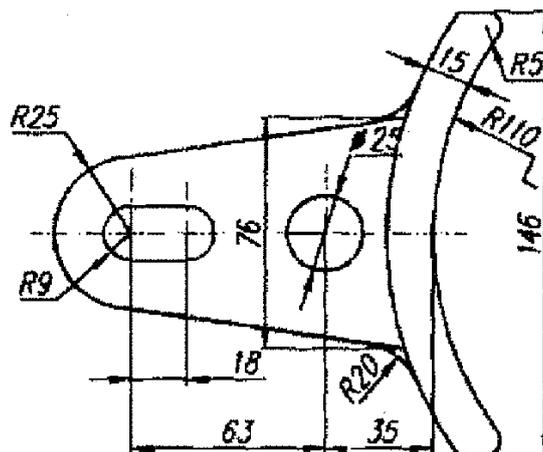


Рисунок 3.1 – Задание для самостоятельного решения

Контрольные вопросы

- 1 Как создать новый эскиз?
- 2 Как отредактировать эскиз?
- 3 Как проставить линейный размер?
- 4 Как создать твердотельную модель методом вытягивания?
- 5 Какие требования к эскизу для создания элемента вращения?

4 Кинематический анализ в SolidWorks для плоских механизмов

Цель занятия: получение практических навыков в проведении кинематического анализа в SolidWorks для плоских механизмов.

Механизм, представленный на рисунке 4.1, состоит из пяти подвижных звеньев: кривошипа 1, кулисного камня 2, кулисы 3, ползуна 4, ползуна 5 и неподвижной стойки. Все звенья, соединяясь между собой, образуют семь одноподвижных кинематических пар, из них четыре шарнирно-неподвижные в точках O_1 , O_2 , A , B и три поступательные – в точках A' , B' , C . Все звенья строятся с учетом их действительных размеров без учета масштаба [5].

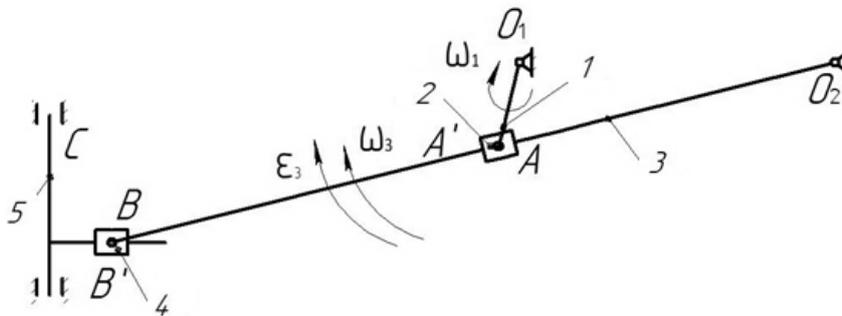


Рисунок 4.1 – Схема механизма

После того как механизм собран необходимо сделать неактивной вкладку «Компоновка» (в верхнем меню SolidWorks). В верхнем меню «Добавления SolidWorks» проверяется подключен ли модуль «SolidWorks Motion».

Внизу экрана следует перейти в окно «Исследование движения». Вкладка переключается на режим «Анализ движения».

В меню «Motion Manager» выбирают «Двигатель» .

В свойствах «Двигатель» указываем (рисунок 4.2):

- тип двигателя: «Вращающийся двигатель»;
- компонент: выбирают кривошип;
- направление: выбирают шарнир опоры O_1 (окружность), вокруг которого будет вращаться кривошип. Для изменения направления вращения (по часовой стрелке или против) необходимо нажать иконку .

Указывается частота вращения двигателя (для рассматриваемого примера 88 об/мин).

Для выполнения расчета построенной модели механизма необходимо нажать «Рассчитать» .

Если механизм работает, то все кинематические пары назначены верно, в случае ошибки и невозможности выполнения расчета необходимо перепроверить назначенные взаимосвязи (кинематические пары).

Следует изменить шкалу времени, чтобы выполнялся ровно один оборот

кривошипа, количество секунд, за которое выполняется один оборот кривошипа, определяется как

$$t = \frac{60}{n_{\text{кр}}} = \frac{60}{88} = 0,68 \text{ с,}$$

где $n_{\text{кр}}$ – частота вращения кривошипа, об/мин.

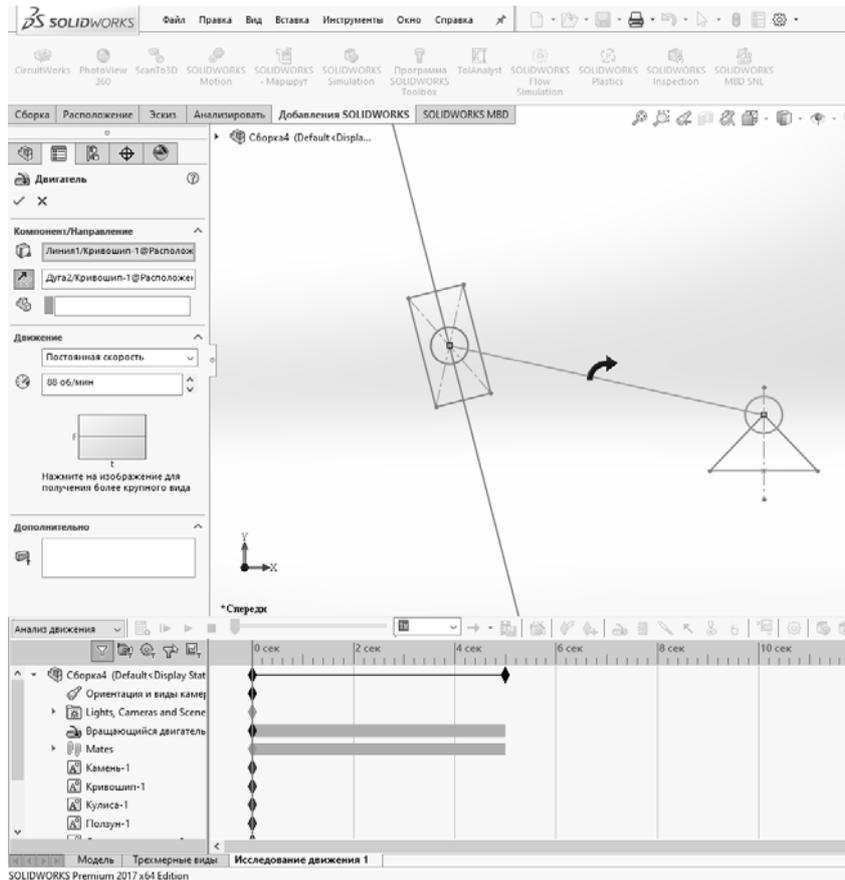


Рисунок 4.2 – Настройка двигателя

Для изменения времени расчета движения механизма с зажатой клавишей «Alt» мышкой перетаскивают конечную ключевую точку на шкале времени в начало. Далее, нажав правой клавишей мыши по этой точке, переходят в ее контекстное меню и выбирают «Редактировать время в ключевой точке», в появившемся окне вводят 0,68 с.

Затем нажимают «Рассчитать».

Для увеличения плавности движения в меню «Motion Manager» выбирают «Свойства исследования движения» .

Увеличивают количество кадров в секунду.

Для получения необходимых результатов анализа движения в меню «Motion Manager» выбирают «Результаты и эюры» .

Для измерения скорости и ускорения какой-либо точки механизма в свойствах «Результаты и эюры» выбираем:

- категорию «Перемещение / Скорость / Ускорение»;
- подкатегорию «Поступательная скорость» или «Поступательное ускорение»;
- результирующий компонент «Величина» (абсолютное значение скорости или ускорения точки), для ускорения можно также выбрать тангенциальную или нормальную составляющую. Для поступательного перемещения ползуна следует указать ось, вдоль которой он перемещается.

Выбирают точку, для которой необходимо измерить скорость или ускорение.

В соответствующем окне указывается, какому звену принадлежит эта точка. Если требуется выбрать точку другого звена, то следует правой клавишей мыши нажать на выбранную точку, вызвав контекстное меню, указать в нем «Выбрать другой» и из предложенного списка выбрать нужную.

Во вкладке «Параметры вывода» для точки можно включить отображение вектора скорости или ускорения на механизме (рисунок 4.3).

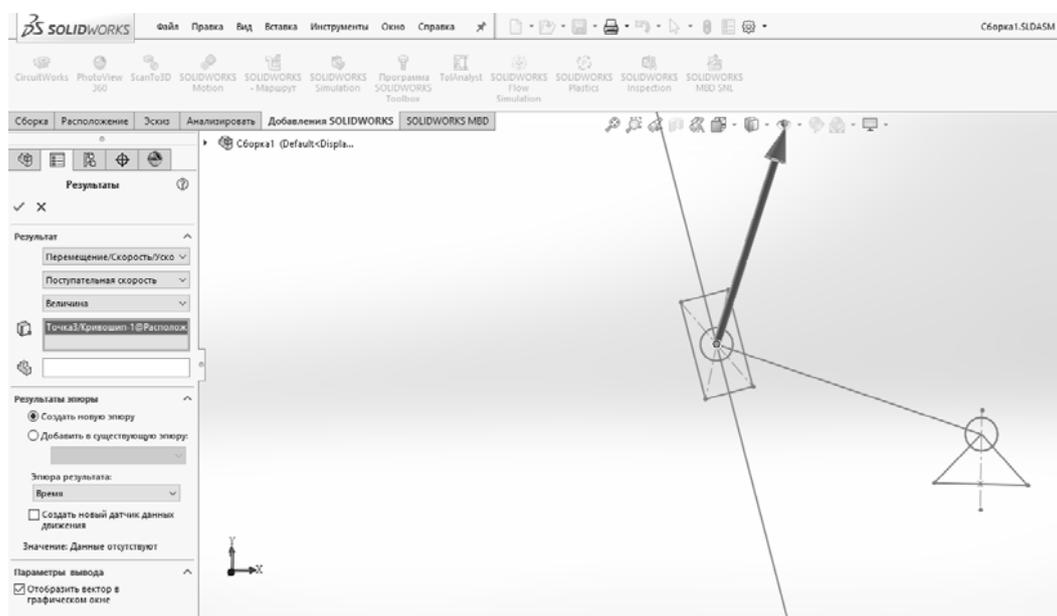


Рисунок 4.3 – Измерение скорости точки

Для измерения угловой скорости и ускорения звена в свойствах «Результаты и эюры» выбирают:

- категорию «Перемещение / Скорость / Ускорение»;
- подкатегорию «Угловая скорость» или «Угловое ускорение»;
- результирующий компонент «Величина»;
- требуемое звено.

Получаемые результаты выводятся на экран и хранятся во вкладке «Результаты».

Для редактирования и отображения результата необходимо, нажав по нужному результату правой клавишей мыши, зайти в его контекстное меню и выбрать «Редактировать определение» (для изменения исходных данных для этого результата) или «Отобразить эюру» (для отображения результата в виде графика).

Если во вкладке «Результаты» нажать правой клавишей мыши на название отображаемой эпюры, зайти в контекстное меню и выбрать «Экспорт в электронную таблицу», то полученные значения будут экспортированы в Excel.

Для измерения перемещения ползуна (выходного звена) в свойствах «Результаты и эпюры» выбирают:

- категорию «Перемещение / Скорость / Ускорение»;
- подкатегорию «Линейное перемещение»;
- результирующий компонент: указать ось, вдоль которой выходное звено перемещается;
- элемент выходного звена.

Задача для самостоятельного решения

Исходные данные (рисунок 4.4): $H = 260$ мм (ход выходного звена ползуна); $K = 1,37$ (коэффициент производительности станка); $O_1O_2 = 450$ мм (межосевое расстояние).

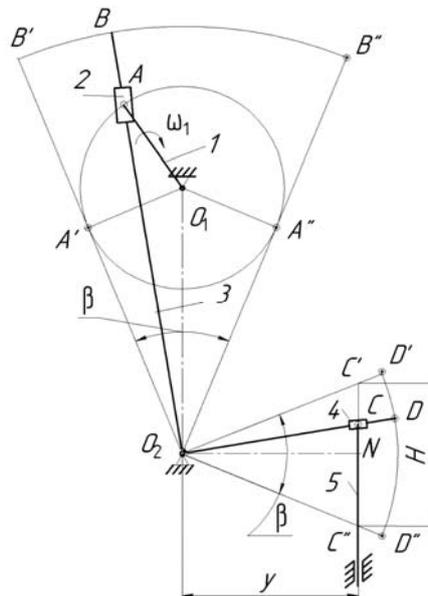


Рисунок 4.4 – Схема механизма насоса с качающейся кулисой

Контрольные вопросы

- 1 Как задать двигатель для ведущего звена?
- 2 Как изменить время расчета движения механизма?
- 3 Как задать отображение результата кинематического анализа?

5 Кинематический анализ в SolidWorks для объемных механизмов

Цель занятия: получение практических навыков в проведении кинематического анализа в SolidWorks для объемных механизмов.

Для расчета движение компонента в SolidWorks Motion применяется полное кинематическое моделирование.

Исследования движения не изменяют модель сборки или ее свойства. Они моделируют и анимируют движение, указанное Вами для модели. Можно использовать сопряжения SolidWorks для ограничения движения компонентов в сборке при моделировании движения модели.

Можно использовать анализ движения для точного моделирования и анализа движения сборки, принимая в расчет элементы исследования движения (включая силы, пружины, демпферы и трение).

Базовое движение можно использовать для создания примерных эффектов двигателей, пружин, конфликтов и притяжения в сборках. Basic Motion учитывает массу при расчете движения. Basic Motion рассчитывается достаточно быстро, чтобы эта функциональность могла использоваться для создания презентационных анимаций на основе физического моделирования.

Анализ движения в SolidWorks Motion для объемных механизмов выполняется аналогично плоским механизмам.

В результате анализа можно:

1 Отследить траекторию движения точки в сборке:

- в исследовании Анализ движения нажмите Результаты и эпюры (панель инструментов MotionManager);
- в PropertyManager в разделе Результат в поле Категория выберите Перемещение / Скорость / Ускорение;
- в параметре Подкатегория выберите Путь отслеживания;
- выберите точку или вершину в сборке.

2 Создать эпюру линейного перемещения, скорости или ускорения движущейся детали при ее движении относительно другой детали или исходной точки сборки:

- в исследовании Анализ движения нажмите Результаты и эпюры  (панель инструментов MotionManager);
- в PropertyManager в разделе Результат в поле Категория выберите Перемещение / Скорость / Ускорение;
- выберите Линейное перемещение / Поступательная скорость / Поступательное ускорение;
- в разделе Выбор результирующего компонента выберите параметр Компонент X, Компонент Y или Компонент Z для расчета величины результата в выбранном направлении;
- выберите одну грань детали или точку или вершину для расчета движения детали по отношению к исходной точке сборки.

3 Создать эпюру углового перемещения, скорости или ускорения детали при ее движении относительно другой детали или исходной точки сборки:

- в исследовании Анализ движения нажмите Результаты и эпюры (панель инструментов MotionManager);

- в PropertyManager в разделе Результат в поле Категория выберите Перемещение / Скорость / Ускорение;

- для параметра Подкатегория выберите Угловое перемещение / Угловая скорость / Угловое ускорение;

- в разделе Выбор результирующего компонента выберите Величина – вычисление величины вдоль результирующего вектора по отношению к глобальным координатам.

Задачи для самостоятельного решения

Смоделируйте механизм (рисунок 5.1) и определите угловую скорость и ускорение всех звеньев (исходными данными задаться самостоятельно).

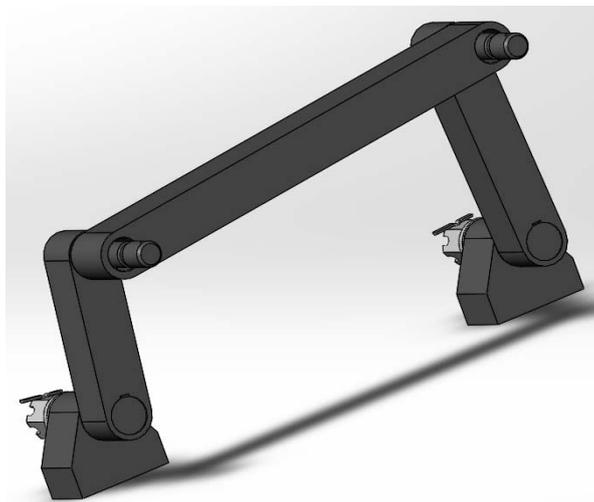


Рисунок 5.1 – Исследуемый механизм

Контрольные вопросы

- 1 Какие задачи решаются в ходе кинематического анализа?
- 2 Как определить скорость точки при поступательном движении звена?
- 3 Как определить ускорение при вращательном движении звена?

6 Кинематический анализ в SolidWorks для зубчатых механизмов

Цель занятия: получение практических навыков в кинематическом анализе в SolidWorks для зубчатых механизмов.

Выполним кинематический анализ зубчатого механизма, приведенного на рисунке 6.1. Исходные данные для анализа: $n_{\text{дв}} = 3000 \text{ мин}^{-1}$ (частота вращения двигателя); $n_{\text{кр}} = 600 \text{ мин}^{-1}$ (частота вращения кривошипа) [5].

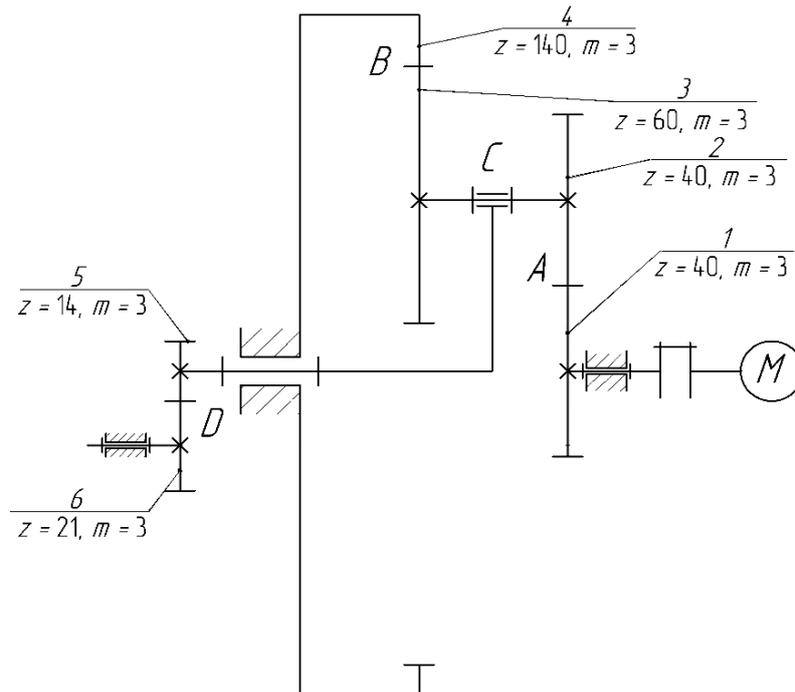


Рисунок 6.1 – Зубчатая передача

После того как конструкция зубчатого механизма собрана необходимо установить взаимодействие между зубчатыми колесами.

Рассмотрим колеса 1 и 2.

В меню SolidWorks кликают «Условия сопряжения». В свойствах сопряжений раскрывают список «Механические сопряжения». Выбираем в них «Редуктор». Для свойства «Выбор сопряжений» – выбирают поверхности зубьев (например, впадин между зубьями). В свойстве «Пропорция» необходимо скорректировать указанные там размеры так, чтобы они соответствовали передаточному отношению, которое определяется как отношение числа зубьев этих колес. В числителе находится число зубьев колеса, которое выбрано первым при указании поверхности зубьев.

В данном случае

$$i = \frac{z_1}{z_2} = \frac{40}{40} = 1.$$

То есть указанные в строке «Пропорция» размеры должны быть одинаковыми.

Режим «Реверс» связан с тем, в какую сторону будет вращаться сопрягаемое колесо. Так, при внешнем зацеплении колеса должны вращаться в разные стороны, а при внутреннем – в одну. Подтверждают создание взаимосвязи.

С помощью функции «Переместить компонент» / «Вращать компонент» необходимо проверить, что направление вращения колес верно. Если оно не совпадает, то правой клавишей мыши кликают на созданное сопряжение (оно располагается в дереве конструирования во вкладке «Mates») и в появившемся контекстном меню выбирают «Редактировать определение». Далее переключают режим «Реверс» в свойствах сопряжения.

Рассмотрим колеса 3 и 4.

В меню SolidWorks кликают «Условия сопряжения». В свойствах сопряжений раскрывают список «Механические сопряжения». Выбирают в них «Редуктор», а далее – поверхности зубьев рассматриваемых колес. В свойстве «Пропорция» необходимо скорректировать указанные там размеры так, чтобы они соответствовали передаточному отношению, которое определяется как отношение числа зубьев этих колес. В данном случае

$$i = \frac{z_4}{z_3} = \frac{140}{60} = 2,33 .$$

Например, если первое значение в свойстве «Пропорция» 172,5 мм, то, соответственно, второе будет $172,5 \cdot 2,33 = 402,5$ мм.

С помощью функции «Переместить компонент» / «Вращать компонент» необходимо проверить, что направление вращения колес верно.

Рассмотрим колеса 5 и 6.

В меню SolidWorks кликают «Условия сопряжения». В свойствах сопряжений раскрывают список «Механические сопряжения». Выбирают в них «Редуктор», далее – поверхности зубьев рассматриваемых колес. В свойстве «Пропорция» необходимо скорректировать указанные там размеры так, чтобы они соответствовали передаточному отношению, которое определяется как отношение числа зубьев этих колес. В данном случае

$$i = \frac{z_6}{z_5} = \frac{21}{14} = 1,5 .$$

Например, если первое значение в свойстве «Пропорция» 55,5 мм, то, соответственно второе будет $55,5/1,5 = 37$ мм.

С помощью функции «Переместить компонент» / «Вращать компонент» необходимо проверить, что направление вращения колес верно.

В верхнем меню «Добавления SolidWorks» проверяют, что подключен модуль «SolidWorks Motion».

Внизу переходят в окно «Исследование движения».

Переключают вкладку на «Анализ движения».

В меню Motion Manager выбирают Двигатель  (рисунок 6.2):

– тип двигателя «Вращающийся двигатель»;

– компонент «Цилиндрическая грань отверстия колеса 1»;

– направление «Цилиндрическая грань отверстия колеса 1» Для изменения направления вращения (по часовой стрелке или против) необходимо нажать .

Указывают частоту вращения двигателя (в рассматриваемом примере 3000 об/мин).

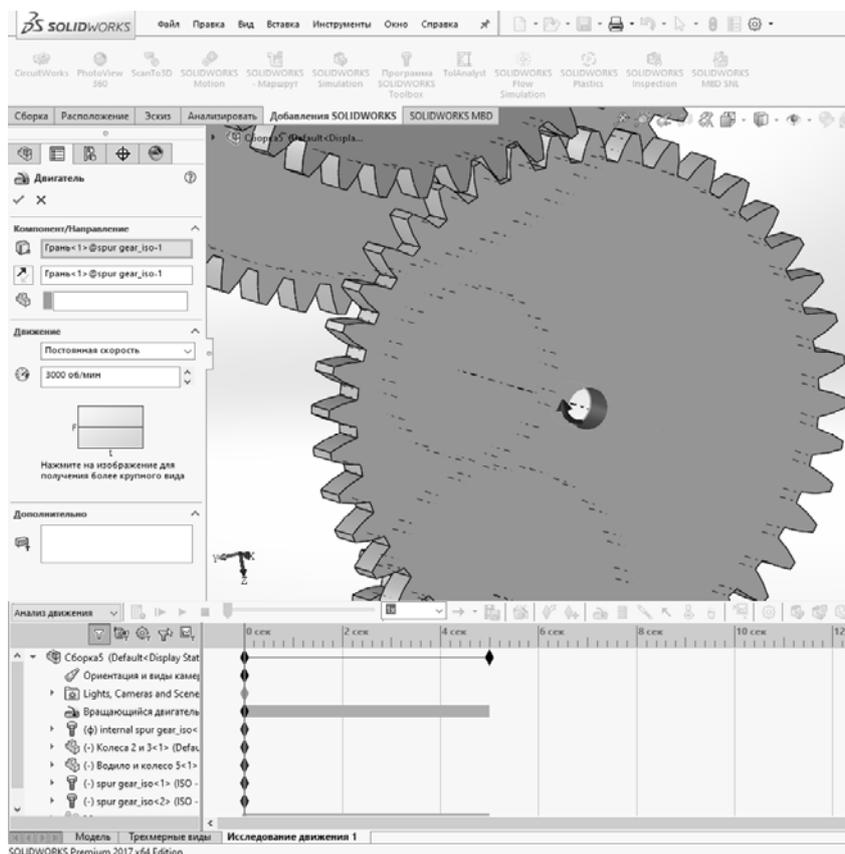


Рисунок 6.2 – Настройка двигателя

Для увеличения плавности движения в меню «Motion Manager» выбирают «Свойства исследования движения» . Увеличивают «Количество кадров в секунду».

Нажимают на кнопку «Рассчитать».

Для получения необходимых результатов в меню «Motion Manager» выбирают «Результаты и эпюры» .

Для измерения скорости колеса выбирают (рисунок 6.3):

– категория «Перемещение / Скорость / Ускорение»;

– подкатегория «Угловая скорость»;

– результирующий компонент (указать ось, вдоль которой расположена ось вращения колеса).

Выбирают плоскую грань требуемого колеса.

Получаемые результаты выводятся на экран и хранятся во вкладке «Результаты». Для редактирования и отображения результата необходимо,

нажав по нужному результату правой клавишей мыши, зайти в контекстное меню и выбрать «Редактировать определение» – для изменения исходных данных этого результата – или «Отобразить эпюру» – для показа результата.

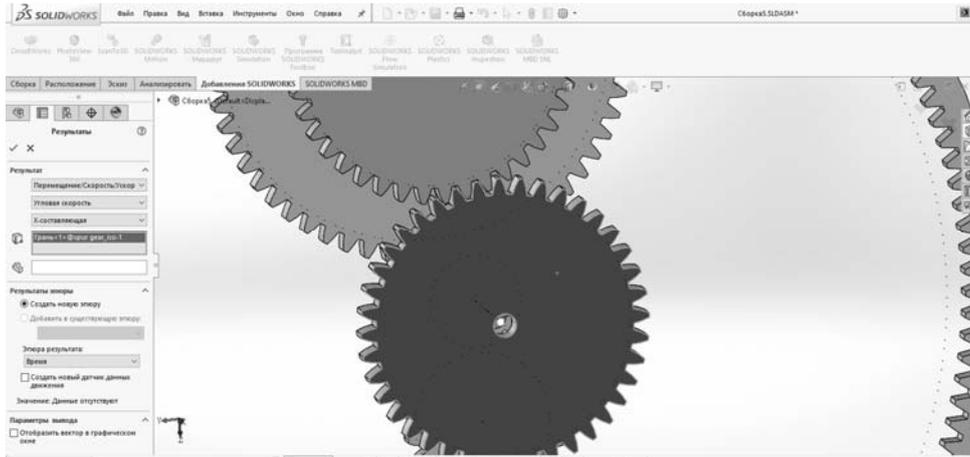


Рисунок 6.3 – Получение результата измерения скорости вращения колеса

Задача для самостоятельного решения

Выполнить кинематический анализ зубчатого механизма, приведенного на рисунке 6.4. Исходные данные: $m = 3$ мм (модуль); $n_{дв} = 1800$ мин⁻¹ (частота вращения вала двигателя); $i_{H4} = 4,5$ (передаточное отношение планетарной передачи); $z_5 = 8$; $z_6 = 26$ (числа зубьев); знак передаточного отношения «+».

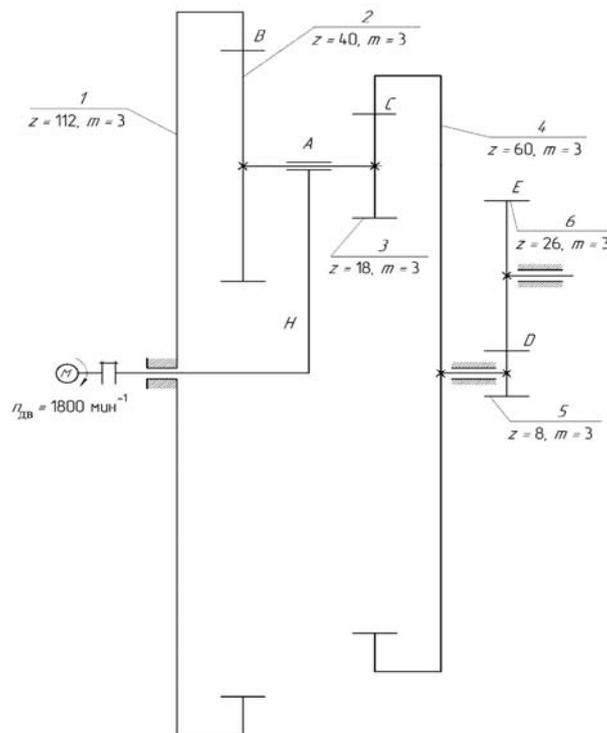


Рисунок 6.4 – Кинематическая схема зубчатого механизма

Контрольные вопросы

- 1 Для чего необходимо механическое сопряжение «Редуктор»?
- 2 Как задать передаточное отношение для анализируемого зубчатого механизма?
- 3 Как задать двигатель для ведущего колеса?

7 Кинематический анализ в SolidWorks для кулачковых механизмов

Цель занятия: получение практических навыков в кинематическом анализе в SolidWorks для кулачковых механизмов.

Выполним кинематический анализ кулачкового механизма, приведенного на рисунке 7.1 [5].

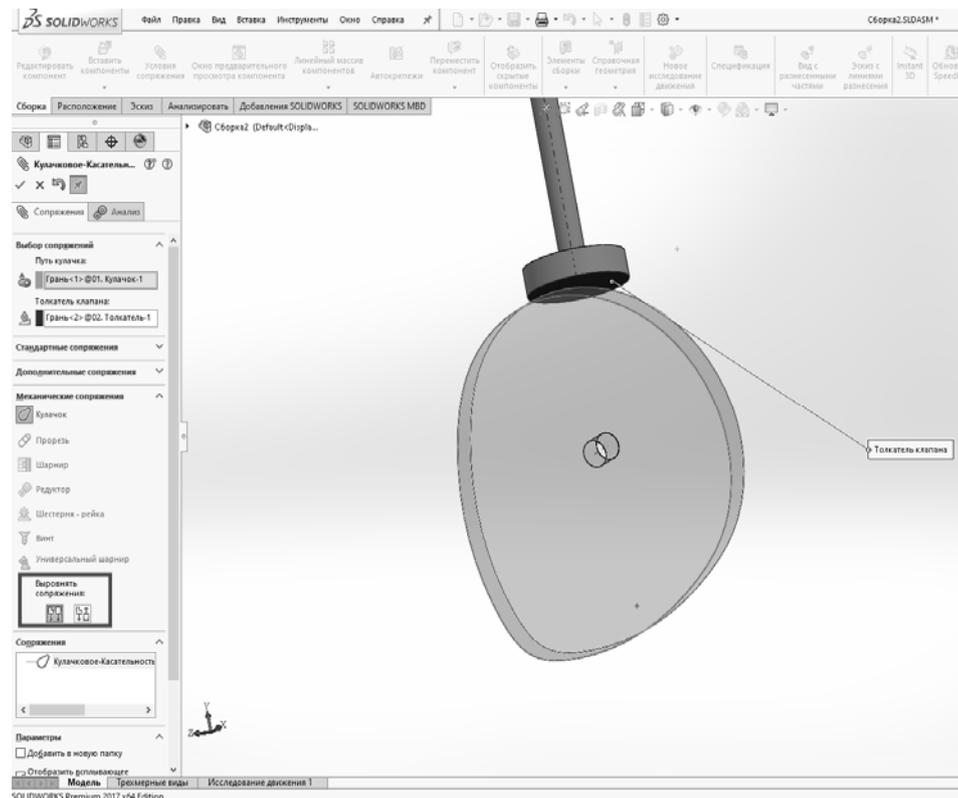


Рисунок 7.1 – Сопряжение «Кулачок»

В открытых свойствах «Сопряжение» раскрывают вкладку «Механические сопряжения» и выбирают «Кулачок».

В окне «Путь кулачка» выбирается грань кулачка, которая будет взаимодействовать с толкателем.

В окне «Толкатель клапана» выбирается грань толкателя, которая будет взаимодействовать с кулачком.

Если толкатель оказался внутри кулачка и взаимодействует с ним как бы изнутри, необходимо в настройках свойства сопряжения переключить «Способ выравнивания сопряжения» – «Выровнен» / «Не выровнен» (на рисунке 7.1 выделено прямоугольником).

В меню SolidWorks раскрывают список «Переместить компонент» и выбирают «Вращать компонент». С помощью функции «Вращать компонент» проверяют работоспособность построенного кулачкового механизма.

В верхнем меню «Добавления SolidWorks» проверяют, подключен ли модуль «SolidWorks Motion».

Внизу страницы переходят в окно «Исследование движения».

Переключают вкладку на «Анализ движения».

В меню «Motion Manager» выбирают «Двигатель» , тип двигателя «Вращающийся двигатель», компонент – цилиндрическая грань отверстия в кулачке, направление – цилиндрическая грань отверстия в кулачке, вокруг которого он будет вращаться. Для изменения направления вращения (по часовой стрелке или против) необходимо нажать .

Указывается частота вращения двигателя (в рассматриваемом случае 60 об/мин).

Для выполнения расчета необходимо нажать «Рассчитать» .

Если механизм работает, то все кинематические пары назначены верно.

Изменим шкалу времени, чтобы выполнялся один оборот кулачка.

Количество секунд, за которое выполняется один оборот, определяется как

$$t = \frac{60}{n_{кр}} = \frac{60}{60} = 1 \text{ с,}$$

где $n_{кр}$ – частота вращения кривошипа, об/мин.

Для изменения времени расчета движения с нажатой клавишей «Alt» мышью перетягивают конечную ключевую точку на шкале времени в начало. Далее, кликнув правой клавишей мыши по этой точке, переходят в ее контекстное меню и выбирают «Редактировать время в ключевой точке». В появившемся окне вводят 1 с.

Нажимают кнопку «Рассчитать».

Для увеличения плавности движения в меню «Motion Manager» выбирают «Свойства исследования движения» . Увеличиваем «Количество кадров в секунду».

Для получения необходимых результатов в меню «Motion Manager» выбирают «Результаты и эпюры» .

Для измерения скорости и ускорения точки выбирают (рисунок 7.2):

- категорию «Перемещение/Скорость/Ускорение»;
- подкатегорию «Поступательная скорость» или «Поступательное ускорение»;
- результирующий компонент «Величина» (абсолютное значение скорости или ускорения точки). Для поступательного перемещения толкателя – указать ось вдоль которой он перемещается;

– плоскую грань толкателя, посредством которой он взаимодействует с кулачком и для которой необходимо измерить скорость или ускорение.

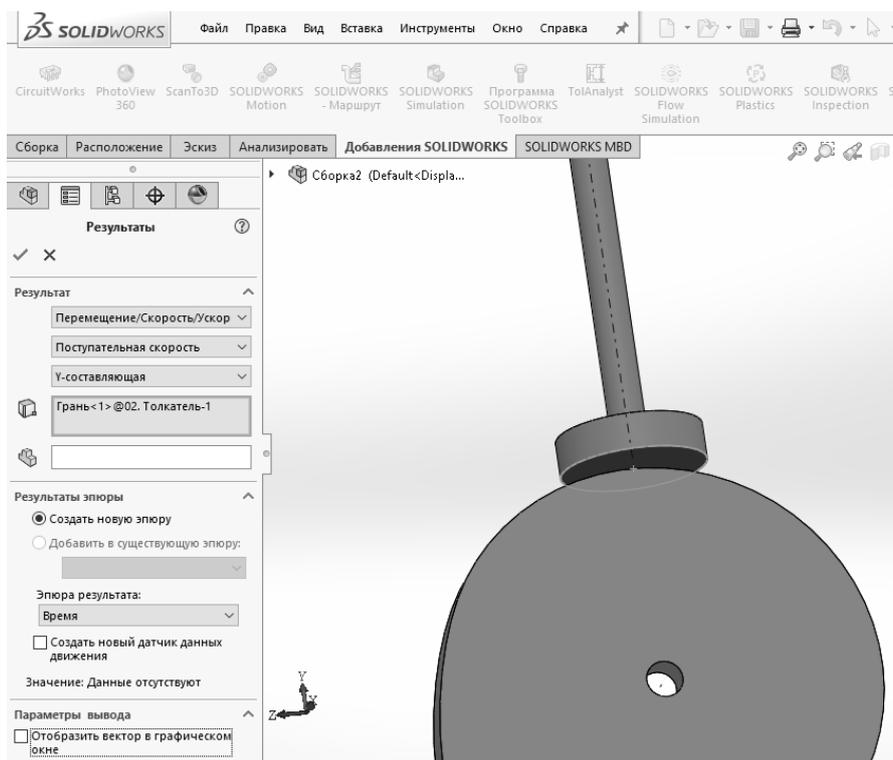


Рисунок 7.2 – Получение результата анализа движения

Получаемые результаты выводятся на экран и хранятся во вкладке «Результаты».

Для редактирования и отображения результата необходимо, нажав по нужному результату правой клавишей мыши, зайти в его контекстное меню и выбрать «Редактировать определение» для изменения исходных данных этого результата или «Отобразить эпюру» для показа результата.

Для измерения перемещения выходного звена выбирают:

- категорию «Перемещение / Скорость / Ускорение»;
- подкатегорию «Линейное перемещение»;
- результирующий компонент – указать ось, вдоль которой выходное звено перемещается;
- плоскую грань толкателя, посредством которой он взаимодействует с кулачком.

При отображенной эпюре, если нажать на ее результат правой клавишей мыши, зайти в контекстное меню и выбрать «Экспорт в электронную таблицу», то полученные значения будут экспортированы в Excel.

Задача для самостоятельного решения

Необходимо выполнить кинематический анализ центрального кулачкового механизма с роликовым толкателем по следующим данным: закон движения

толкателя задан графиком $a = f(t)$ (рисунок 7.3), перемещение толкателя $h = 35$ мм, рабочий угол кулачка $\varphi_p = 180^\circ$, максимально допустимый угол давления $\alpha = 30^\circ$, частота вращения кулачка $n_k = 120$ мин⁻¹.

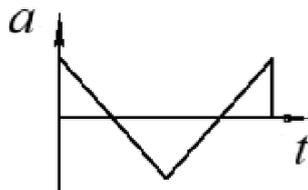


Рисунок 7.3 – Закон движения толкателя

Контрольные вопросы

- 1 Для чего необходимо механическое сопряжение «Кулачок»?
- 2 Как изменить время расчета движения?
- 3 Как измерить скорость движения толкателя?

8 Силовой анализ в SolidWorks для плоских механизмов

Цель занятия: получение практических навыков в силовом анализе в SolidWorks для плоских механизмов.

Рассмотрим механизм, приведенный на рисунке 8.1.

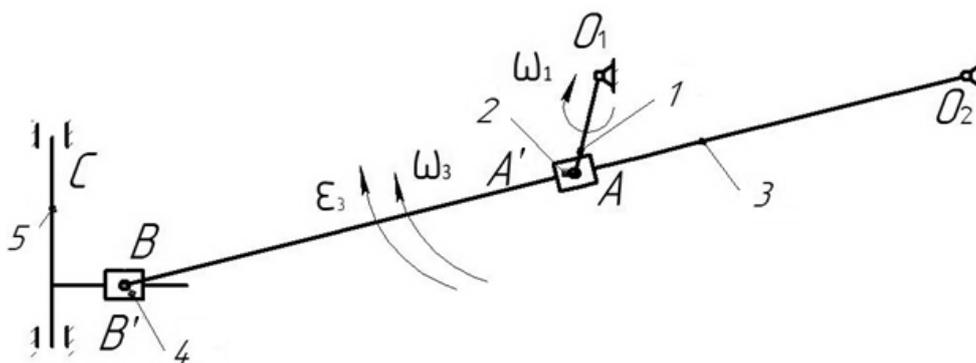


Рисунок 8.1 – План механизма

Исходные данные: $Q = 1500$ Н (сила полезного сопротивления); $m_3 = 21$ кг (масса кулисы 3); $m_5 = 50$ кг (масса ползуна 5) [5].

Вначале для звеньев механизма задается их масса.

В верхнем меню «Добавления SolidWorks» проверяют, подключен ли модуль «SolidWorks Motion».

Далее осуществляют переход в окно «Модель», находящееся внизу экрана.

Затем в меню SolidWorks на вкладку «Расположение» и включают вкладку

«Компоновка».

На схеме механизма выбирается звено, для которого необходимо задать массу. В окне свойств указывается необходимая масса (для кулисы это масса 21 кг, т. е. 21000 г). С помощью кнопки «Переместить центр тяжести» можно разместить центр тяжести в требуемом месте (по умолчанию он располагается на середине звена).

Далее отключают вкладку «Компоновка» и переходят в окно «Исследование движения», выбирается вкладка «Анализ движения».

Сила тяжести к механизму прикладывается в меню «Motion Manager» с помощью кнопки «Сила тяжести» . При этом выбирается ось, вдоль которой будет действовать сила тяжести; с помощью кнопки  можно изменить направление силы тяжести.

Внешняя сила (сила полезного сопротивления $Q = 1500$ Н) прикладывается в меню «Motion Manager» с помощью кнопки «Сила» :

- тип силы: линейная сила;
- направление: только действие;
- выбираем звено, к которому приложена сила (в рассматриваемом примере – ползун), ее направление и величину (рисунок 8.2).



Рисунок 8.2 – Настройка силы полезного сопротивления

Расчет механизма выполняется с помощью кнопки «Расчитать» .

Результаты анализа получают так, как и при кинематическом анализе.

Для получения этого в меню «Motion Manager» выбирается вкладка «Результаты и эпюры» .

Для измерения реакций в кинематических парах во вкладке «Результаты и эпюры» в окне «Результат» выбирают:

- категорию: «Силы»;
- подкатеорию: «Сила противодействия»;

– результирующий компонент «Величина» (абсолютное значение силы).

Во вкладке «Mates» (выделено прямоугольником) выбирается кинематическая пара (взаимосвязь), для которой необходимо измерить реакцию (рисунок 8.3).

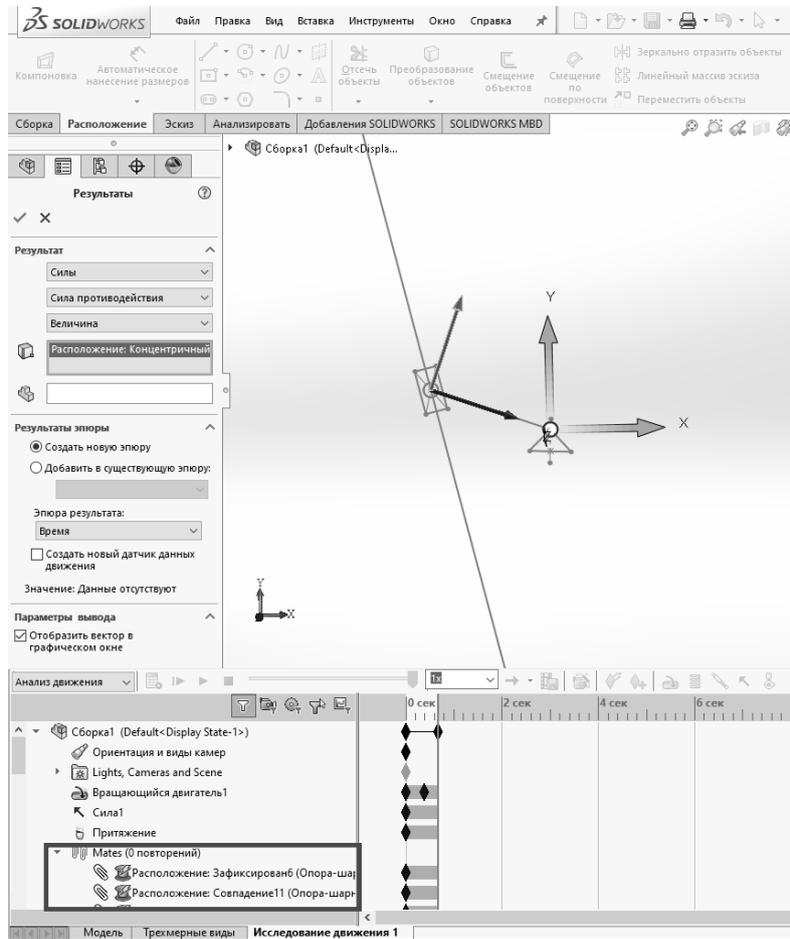


Рисунок 8.3 – Настройка результатов измерения реакций

Для опор следует выбрать взаимосвязь «Зафиксированный», для поступательной кинематической пары камня и кулисы – взаимосвязь «Совпадение».

Во вкладке «Параметры вывода» для точки можно включить отображение вектора реакции на механизме.

Для определения уравновешивающей силы, имитирующей действие силы со стороны двигателя на кривошип, необходимо измерить вращающий момент на двигателе $M_{дв}$, из которого затем определить уравновешивающую силу по формуле

$$P_{ур} = \frac{M_{дв}}{O_1A},$$

где O_1A – длина кривошипа, мм.

Для измерения вращающего момента на двигателе во вкладке «Результаты и эпюры» в окне «Результат» выбирают:

– категорию «Силы»;

тами. Можно также ограничить непрерывный контакт между кривыми в процессе движения.

В исследованиях движения можно принять в расчет силы трения посредством свойств материала компонента при определении контакта компонентов. Также можно конкретно указать динамические или статические силы трения и свойства упругости.

Рассмотрим создание эпюры сил контакта между двумя деталями.

1 Выберите Результаты и эпюры (панель инструментов MotionManager). Отобразится окно PropertyManager Результаты.

2 В окне PropertyManager Результаты выберите:

- силы в качестве Категории;
- сила контакта в поле Подкатегория;
- величина в поле Результирующий компонент.

3 Выберите контактирующие компоненты:

- нажмите в поле Выбор компонентов (PropertyManager Результаты):
- выберите грань на детали, где происходит контакт (графическая область). В графической области отображается эпюра, и папка Результаты добавляется в дерево конструирования MotionManager.

Задача для самостоятельного решения

Для механизма, смоделированного на практическом занятии №5, необходимо выполнить силовой анализ (исходными данными задаться самостоятельно).

Контрольные вопросы

- 1 Как создать эпюру сил контакта между двумя деталями?
- 2 Как изменить значение задаваемой силы?
- 3 Как задавать взаимодействие тел друг с другом?

10 Силовой анализ в SolidWorks для зубчатых механизмов

Цель занятия: получение практических навыков в силовом анализе в SolidWorks для зубчатых механизмов.

Силовой анализ зубчатых механизмов выполняется аналогично силовому анализу объемных механизмов.

Задача для самостоятельного решения

Для зубчатого механизма, смоделированного на практическом занятии № 6, необходимо выполнить силовой анализ (исходными данными задаться самостоятельно).

Контрольные вопросы

- 1 Как создать эпюру реакций в опоре зубчатого колеса?
- 2 Как изменить значение задаваемого момента?
- 3 Как задавать взаимодействие тел друг с другом в случае зубчатого механизма?

11 Силовой анализ в SolidWorks для кулачковых механизмов

Цель занятия: получение практических навыков в силовом анализе в SolidWorks для кулачковых механизмов.

Силовой анализ кулачковых механизмов выполняется аналогично силовому анализу объемных механизмов.

Задача для самостоятельного решения

Для кулачкового механизма, смоделированного на практическом занятии № 7, необходимо выполнить силовой анализ (исходными данными задаться самостоятельно).

Контрольные вопросы

- 1 Как создать эпюру реакций в опоре ползуна?
- 2 Как изменить значение задаваемого давления?
- 3 Как задавать взаимодействие тел друг с другом в случае кулачкового механизма?

12 Моделирование в NX

Цель занятия: получение практических навыков моделирования в NX.

Наряду с примитивами в NX имеется возможность использовать позиционно-зависимые конструктивные элементы, такие как: бобышка, карман, ребро жесткости. Использование конструктивных элементов в процессе создания модели значительно сокращает время проектирования, ускоряет обновление модели в случае проведения изменений. Все функции по созданию конструктивных элементов находятся в меню Вставить – Элементы проектирования, доступ к этим функциям также возможен из панели инструментов «Элемент».

Рассмотрим использование конструктивных элементов на примере [6].

Создайте файл и включите модуль «Моделирование». Выберите функцию создания элемента «Вытягивание» в панели инструментов или в меню Вста-

вить – Элементы проектирования – Вытягивание. Открывается диалог операции «Вытягивание» и становится активен шаг выбора кривой либо построенного эскиза (рисунок 12.1).

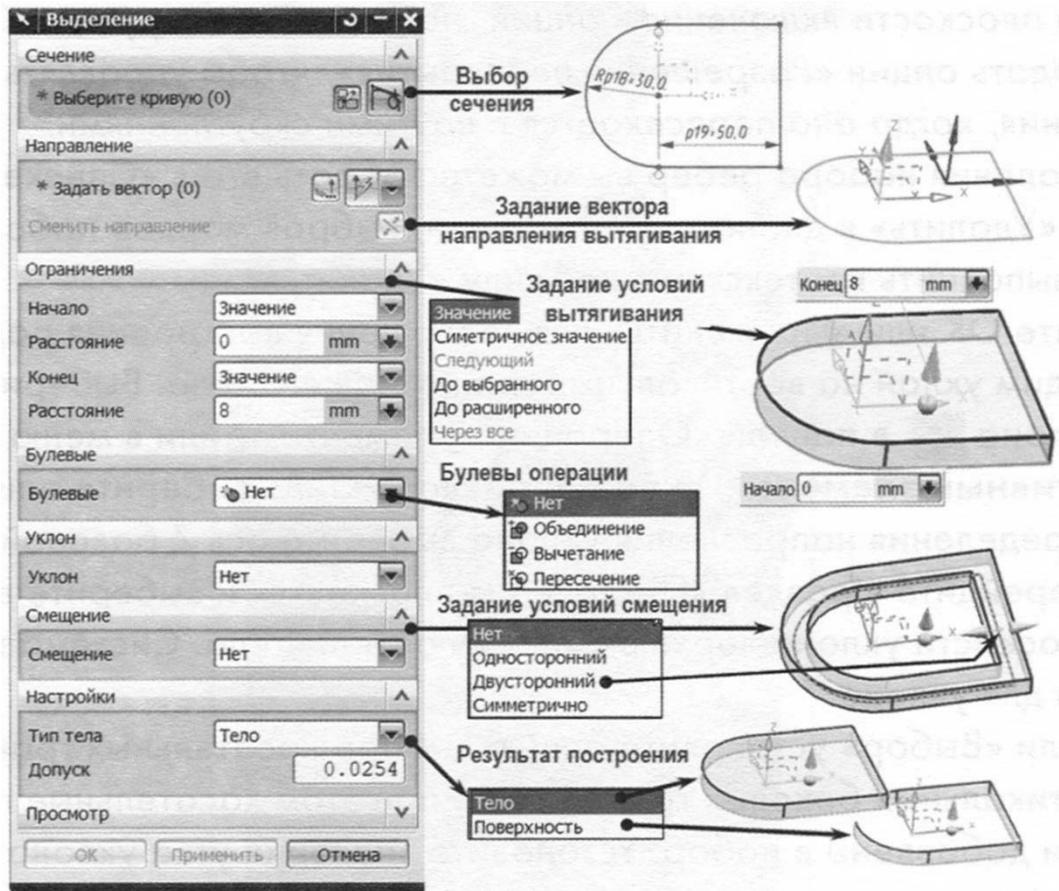


Рисунок 12.1 – Меню создания элемента «Вытягивание»

Выберите цепочку кривых построенного эскиза в качестве сечения (во время задания геометрии сечения возможен разумный выбор по контексту).

Добавим скругление на вертикальных ребрах созданного тела. Выберите операцию скругления ребра на панели инструментов «Операции с элементом» либо из меню Вставить – Конструктивный элемент – Скругление ребра. В открывшемся диалоговом окне «Скругления ребра» активен шаг выбора ребер для скругления. Выберите два вертикальных ребра в правой части модели для первого набора ребер (ребра для скругления не обязательно должны соединяться между собой). Вы можете изменить значение радиуса скругления одним из двух способов: перемещением маркера радиуса или введением значения в динамическом поле ввода.

Создадим уклон на вертикальных гранях нашего тела. Выберите функцию создания уклона в панели «Операции с элементом» или в меню Вставить – Конструктивный элемент – Уклон. В разделе «Тип» выберите опцию «Из плоскости», для определения направления уклона выберите ось Z базовой системы координат. Перейдите в раздел «Постоянная плоскость» и выберите в качестве

начальной плоскости уклона верхнюю плоскую грань тела. Система переходит к выбору граней для уклона.

Теперь нам нужно создать тонкостенное тело. Выберите функцию создания оболочки в панели «Операции с элементом» или в меню Вставить – Сместение / Масштаб – Оболочка. В диалоговом окне «Оболочка» в разделе «Тип» выберите значение опции «Удалить грани, затем Оболочка».

Теперь нам нужно создать тонкостенное тело. Выберите функцию создания оболочки в панели «Операции с элементом» или в меню Вставить – Сместение / Масштаб – используя функцию создания прямоугольного паза.

Выберите функцию «Паз» в инструментальной панели «Элемент» или из меню Вставить – Элементы проектирования – Паз. Снимите отметку «Сквозной паз» в диалоговом меню, выберите тип создаваемого конструктивного элемента «Прямоугольный» и нажмите ОК (рисунок 12.2).

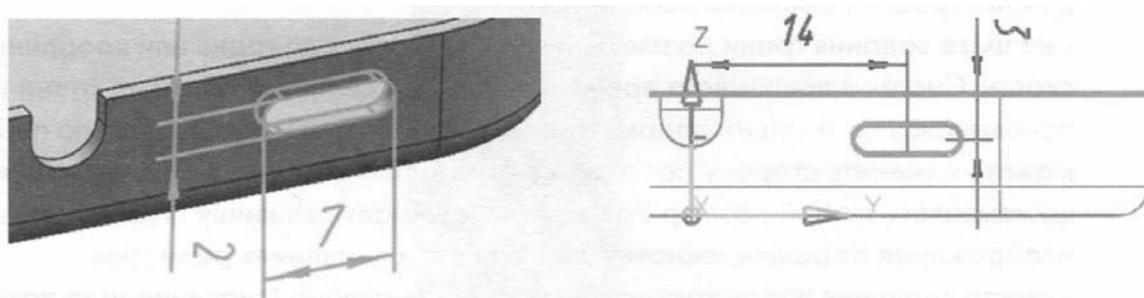


Рисунок 12.2 – Создание элемента «Паз»

Теперь нам нужно создать цилиндрическую бобышку с уступом и с отверстием в центре, расположив ее на плоской внутренней грани корпуса. В панели инструментов «Элемент» выберите функцию «Бобышка» (функцию можно вызвать из меню Вставить – Элементы проектирования – Бобышка).

Создадим отверстие с цековкой в центре бобышки, расположив его на внешней нижней грани корпуса. На инструментальной панели «Элемент» выберите функцию «Отверстие» (вы можете выбрать эту функцию в меню Вставить – Элементы проектирования – Отверстие).

Продолжим построение модели корпуса. Создадим зеркальную копию построенных элементов «Паз» и «Бобышка». В инструментальной панели «Операции с элементом» выберите функцию «Отражение элемента» (вы можете выбрать эту функцию в меню Вставить – Ассоциативная копия – Зеркальный элемент).

Задача для самостоятельного решения

Задание для самостоятельной работы приведено на рисунке 12.3. Необходимо построить 3D-модель детали (толщину задать самостоятельно).

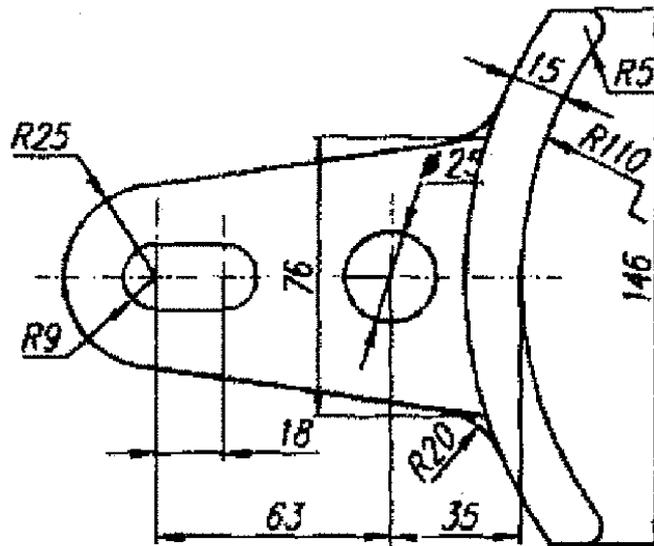


Рисунок 12.3 – Задание для самостоятельного решения

Контрольные вопросы

- 1 Как создать конструктивный элемент в NX?
- 2 Как создать паз?
- 3 Как создать отверстие?
- 4 Как создать зеркальную копию?

13 Кинематический анализ в NX

Цель занятия: получение практических навыков кинематического анализа в NX.

Анализ кинематики (motion simulation) в NX представляет собой интегрированное САЕ-приложение для создания и анализа сложных механических систем (механизмов). Для этих механизмов вы можете получить результаты расчетов движений, сил, моментов, пересечения объектов и сохранить трассировку, т. е. объемную траекторию движения тела в пространстве при работе механизма. Механизм в NX состоит из кинематических объектов, которые представляют собой компоненты с присвоенными им сценариями поведения. Кинематическими объектами могут быть узлы, пружины, демпферы, силы, моменты и эластичные втулки. Механизм создается посредством создания кинематических связей, которые добавляют ограничения к геометрии. После задания механизма, встроенный решатель осуществляет кинематический или статический/динамический анализы. Результатами анализов являются проверка пересечения объектов, графики, анимации движения или электронные таблицы.

При создании симуляции обычно используется следующая последовательность действий:

- 1) создание связей, то есть подвижных частей механизма;
- 2) создание кинематических узлов;
- 3) определение движителей.

Связь (Link) представляет собой неразрываемое тело (rigid body). Обратите внимание, что в качестве связи могут быть выбраны как индивидуальный компонент, так и набор компонентов, кривая и т. п., т. е. трехмерные и двумерные объекты. Использование в качестве связи кривой позволяет промоделировать движение механизма сначала в «плоском варианте», а затем перейти к объемной задаче, имея гарантию того, что основные параметры движения уже вычислены верно. Связь – это фактически основной объект, который обрабатывается решателем. Перемещение связи является наиболее наглядным результатом работы механизма. Создать связь можно командой меню Вставить – Связь или с помощью панели инструментов. В связь вы можете одновременно включать 2D- и 3D-объекты.

Кинематический узел (Joint) описывает возможные движения связей относительно друг друга и создается между двумя связями. Иногда кинематические узлы называют шарнирами. Пока не назначено кинематических узлов, связи могут перемещаться и вращаться относительно осей системы координат, то есть каждая связь обладает шестью степенями свободы, тремя линейными и тремя вращательными. Кинематический узел в зависимости от типа фиксирует определенное количество степеней свободы.

Последний этап создания механизма – это назначение движителей. Движитель добавлен к трем типам узлов: вращательному, ползуну и цилиндрическому. Он всегда ассоциативен кинематическому узлу. Движитель задается на закладке «Водитель» диалогового окна «Узел». Также движители могут быть созданы отдельно посредством меню Вставить – Водитель.

Рассмотрим пример [6].

Сборка состоит из четырех компонентов: mount – подвес для маятника, fiber – нить, на которой подвешен груз, ball – груз и scale – поверхность, над которой висит груз.

Добавим связи в механизм. Выберите пункт меню Вставить – Связь, в открывшемся диалоговом окне выберите компонент mount и отметьте пункт «Фиксированная связь». Нажмите ОК.

Определим следующую связь. Выберите пункт меню Вставить – Связь и в открывшемся диалоговом окне выберите компоненты ball и fiber, затем нажмите ОК.

Определим кинематическую пару вращения. Для этого в меню «Вставить» выберите команду «Узел». Укажите в качестве связи в группе «Действие» – L002 (компоненты ball и fiber), точку привязки – центр верхней грани цилиндра, моделирующего нить, систему координат расположите так, как показано на рисунке. Нажмите ОК.

Ограничим движение L001 (компонент mount) так, чтобы центр шара всегда лежал в плоскости XZ. Для этого в меню «Вставить» выберите команду Ограничения – Точка на поверхности. В качестве точки укажите центр сферы,

в качестве поверхности – плоскость, определенную на уровне сборки. Нажмите ОК.

Для узла J002 зададим движитель. Сделайте двойной щелчок мышью на узле в Навигаторе и в открывшемся диалоговом окне на закладке «Водитель» установите режим вращения «Артикуляция», нажмите ОК.

Теперь проведем анализ созданного механизма. Добавим маркер к центру сферы. Для этого в диалоговом окне «Маркер» (Вставить – Маркер) выберите в качестве связи L002, в качестве точки – центр сферы и в качестве системы координат – абсолютную.

Задача для самостоятельного решения

Дополнить пример, выполненный на практическом занятии создав маятник.

Контрольные вопросы

- 1 Какова последовательность создания симуляции при кинематическом анализе?
- 2 Как задавать кинематические узлы?
- 3 Как задавать движитель?

14 Силовой анализ в NX

Цель занятия: получение практических навыков силового анализа в NX.

В процессе анализа в NX вы можете задать два типа сил – скаляр силы и вектор силы. Силы не влияют на кинематику движения и применяются только для определения реакции в узлах. Задается сила командой меню Вставить – Нагрузка.

Так же, как и для сил, используются скаляр и вектор момента.

Контакт позволяет промоделировать столкновение свободного тела с другими телами в процессе их движения в симуляции. Контакт определяет условия столкновения между телом и неподвижным телом, двумя подвижными телами и задает условие действия одного тела на другое. Вы можете задавать контакт в плоскости (2D-контакт) или в пространстве (3D-контакт). 3D-контакт задается командой Вставить – Соединитель – 3D-контакт.

Дополним пример, приведенный в практической работе № 13, создав соударение маятника с кубом (рисунок 14.1) [6].

Две связи остаются теми же, что были в предыдущем примере. Третьей связью (L003) будет являться куб, расположенный ближе к центру компонента scale. Связью L004 сделаем компонент scale (эта связь должна быть фиксированной). Связью L005 будет второй куб, и его также зафиксируем. Кинематические узлы J001 и J002 остаются прежними, только установим для узла J002 на

закладке «Водитель» следующие параметры: движитель постоянный, начальное смещение -30, начальная скорость 5, ускорение 0. Кинематические узлы J003 и J004 фиксированы. Добавим узел J005, который должен иметь тип «Ползун».

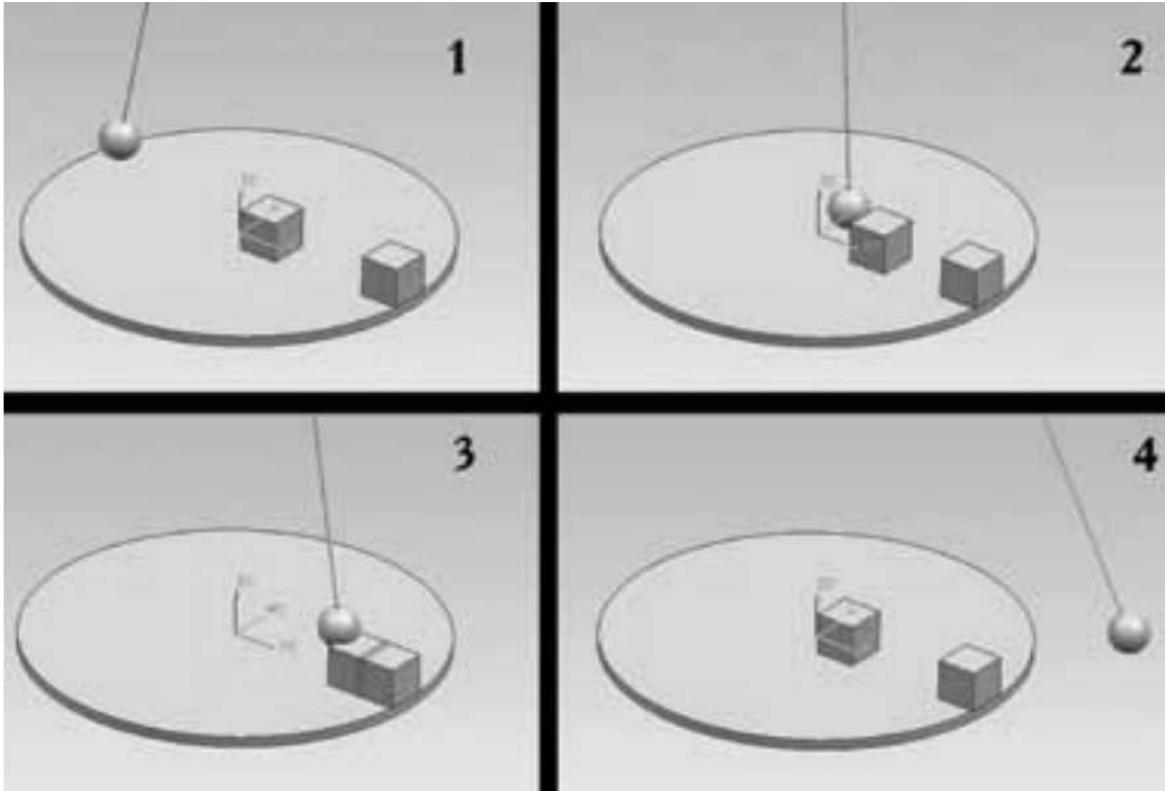


Рисунок 14.1 – Модель соударения маятника с кубом

Теперь зададим соединители. Первый соединитель – это 3D-контакт между связью L002 (шарик) и связью L003 (куб). Выберите команду меню Вставить – Соединитель – 3D-контакт, укажите связи L002 и L003 и нажмите ОК. Второй соединитель – это 3D-контакт между кубами (связи L003 и L005), для задания связи повторите приведенные выше действия. Третий соединитель – пружина, заданная на кинематической паре J004 (ползуне). Выберите команду меню Вставить – Соединитель – Пружина, выберите узел J004, в группе «Жесткость» укажите тип «Постоянный», значение 8, значение свободной длины установите равным 50, значение начальной длины также 50.

В Навигаторе перемещений выберите «Новое решение» и в диалоговом окне укажите следующие параметры: тип решения «Нормальное выполнение», тип анализа «Кинематика / динамика», время 15, шаги 200. Нажмите ОК. Система выполнит расчет кинематики, и это может занять некоторое время.

После того, как система выполнит расчет (об этом сигнализирует исчезновение окна «Система работает» и надпись в строке состояния «Текущее состояние выполнения 100 %»), мы можем изучить результат. Нажмите кнопку «Воспроизвести». Система отобразит анимацию. Вначале шарик займет положение под углом 30° к начальному положению и затем начнет двигаться, как и в предыдущем примере. После контакта с кубом он толкнет его (сработает

3D-контакт G001) и продолжит движение. Куб будет скользить до соударения со вторым кубом (3D-контакт G002), а затем вернется в начальное положение (это обеспечивается пружиной S001).

Задача для самостоятельного решения

Поэкспериментируйте самостоятельно с моделью маятника с различными значениями жесткости пружины, попробуйте также заменить ползун на плоскую связь и изменить точку контакта маятника и куба.

Контрольные вопросы

- 1 Какова последовательность создания симуляции при силовом анализе?
- 2 Как задавать контакт между телами?
- 3 Как задавать нагрузки?

15 Моделирование в MSC.ADAMS

Цель занятия: получение практических навыков моделирования в MSC.ADAMS.

MSC.ADAMS – это программная система, предназначенная для виртуального моделирования сложных машин и механизмов.

С помощью ADAMS быстро создается полностью параметризованная модель изделия: она строится непосредственно в предпроцессоре или импортируется из наиболее популярных CAD-систем (например, SolidWorks, КОМПАС и др.). Задав связи компонентов модели, приложив нагрузки, определив параметры кинематического воздействия и запустив расчет, можно легко и быстро получить данные, полностью идентичные результатам натурных испытаний системы.

Выходными данными расчета являются координаты, скорости, ускорения и усилия для любой точки механизма. Программа способна также учитывать деформируемость конструкций, благодаря импорту моделей из ANSYS, NASTRAN и других пакетов.

Рассмотрим пример решения задачи с помощью ADAMS.

Тело сферической формы (с радиусом $r = 150$ мм) и массой $m = 2$ кг запущено вверх под углом к горизонту $\alpha = 60^\circ$ с начальной скоростью $v_0 = 6$ м/с (рисунки 15.1). Пренебрегая сопротивлением воздуха определить время полета тела до соприкосновения с опорной плоскостью, дальность полета и максимальную высоту, на которую поднимется тело.

Таким образом, с точки зрения теоретической механики рассматривается вторая задача динамики, когда при известных массе и действующих на тело силах необходимо определить траекторию его движения.

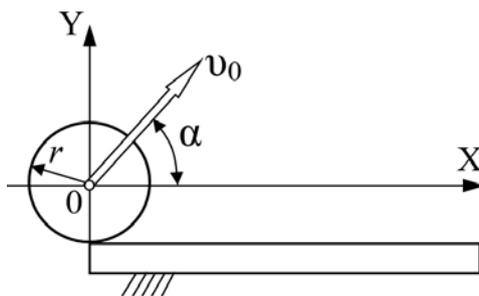


Рисунок 15.1 – Схема для решаемой задачи

Запускаем MSC.ADAMS/View нажатием левой кнопки мыши по иконке программы либо из меню «Пуск» Windows. Выбираем создание новой модели (New Model).

Вводим в первой строчке Model Name имя модели: StoneFall.

Во второй строчке указываем направление сил тяжести тел в модели, по умолчанию мы работаем в трехмерном пространстве и используем декартовую систему координат.

Соглашаемся с тем, что сила тяжести будет направлена вниз, параллельно оси Y и ее направление будет обратно направлению оси Y , о чем свидетельствует знак «-»: -Global Y .

В третьей строке устанавливаем единицы измерения (Units) длины, массы, сил, времени и угловых размеров (система MMKS): mm, kg, N, s, deg.

Для того чтобы наглядно видеть координаты для размещения тел в модели, нужно запустить координатное окно. Для этого нажимаем View и выбираем там Coordinate Window.

Для настройки сетки нажимаем Settings и выбираем Working Grid.

В ленте инструментов выбираем тела (bodies). Там выбираем Rigid Body: Sphere.

В сгенерированном меню выбираем новое тело (New Part), ставим отметку в поле радиуса (Radius), выставляем размер 50 mm.

Создаем сферу этим радиусом в центре системы координат. Для этого мышью перемещаем в центр с координатами $(0; 0; 0)$ и щелчком левой кнопки создаем тело.

Переименуем название тела в модели. По умолчанию ему присваивается имя PART_2, PART_3 и т. д. Под первым телом понимается неподвижное основание, стойка – ground.

Вводим имя Stone (камень) в строке нового имени (New Name). Если предлагается заменить полное имя тела в модели .StoneFall.PART_2 меняем только последнюю часть имени: .StoneFall.Stone.

Из ленты инструментов выбираем инструмент bodies, там находим параллелепипед (RigidBody:Box).

В настройках параллелепипеда устанавливаем неподвижное закрепление с опорной поверхностью (On Ground), ставим отметку напротив длины (Length) и выбираем размер 3500 mm. Так же ставим отметки напротив функций высота (Height) и глубина (Depth) и вводимы размеры 100 mm для обоих.

Следует учесть, что длина измеряется относительно оси OX , высота – вдоль оси OY , глубина – вдоль оси OZ .

Используя мышью выбираем координаты $(0;-150;0)$. Это точка принадлежит левому нижнему углу параллелепипеда, ближайшего к плоскости XOY вдоль оси OZ .

В навигаторе кликнем правой кнопкой мыши на папку Bodies, потом выберем тело Stone и функцию «Изменить» (Modify).

Установим категорию, определяющую движение тела (Category), как заданные начальные условия скорости (Velocity Initial Conditions). Под надписью поступательная скорость вдоль оси (Translational velocity along) включаем оси X и Y . В меню набора текста вводим данные для оси X : $(6*\cos(60d)(m/sec))$, а для оси Y : $(6*\sin(60d)(m/sec))$.

Во вкладке обзора (Browse) навигатора щелкаем правой кнопкой мыши на папку тела (Bodies), потом по файлу Stone и выбираем функцию измерение (Measure).

В строчке наименование измерений (Measure Name) вводим $R_displacement$. Устанавливаем характеристики (Characteristic) на CM position (положение центра масс). Устанавливаем необходимую составляющую (Component), как координату X . Ставим метку напротив Component Strip Chart для создания графика изменения этой составляющей.

Выбираем из верхнего меню вкладку симуляции (Simulation) и нажимаем в ней на символ шестерни для запуска интерактивной симуляции.

MSC.Adams / View запускает симуляцию и строит соответствующие графики в окне измерений ($R_displacement$).

Выбираем вкладку результатов верхнего меню (Result) и нажимаем там на контроль анимации (Animation Control Dialog Box).

С помощью проигрывателя находим кадр, где камень соприкасается с плитой и останавливаем анимацию. Отмечаем время соприкосновения тела и опорной поверхности T_{max} .

В меню контроля анимации изменяем параметр без трассировки (No Trace) на трассировку с маркером (Trace Marker). Правой кнопкой мыши нажимаем на пустое текстовое поле ниже, там выбираем Marker и дальше выбираем Browse.

В окне навигатора баз данных (Database Navigator) выбираем исследуемое тело (Stone), а под ним выбираем его центр масс (cm) и кликаем по нему 2 раза.

Затем вновь проигрываем анимацию движения тела с появлением траектории его движения.

Для нахождения дальности полета тела правой кнопкой мыши кликаем внутри окна графика ($R_displacement$), выбираем график Plot: scht1 и выбираем Transfer to Full Plot.

Блок программы Adams / View заменяется на Adams / PostProcessor. Выбираем инструмент отслеживания (Plot Tracking).

Так как мы хотим знать, где камень соприкасается с землёй, двигаем курсор по линии до тех пор, пока значение X не совпадёт со временем соприкосновения.

Задача для самостоятельного решения

Необходимо в соответствии со схемой на рисунке 15.1 и исходными данными в таблице 15.1 определить время полета тела до соприкосновения с опорной плоскостью, дальность полета и максимальную высоту, на которую поднимется тело.

Таблица 15.1 – Исходные данные для задачи

Номер варианта	m , кг	v_0 , м/с	α , град	r , мм	Номер варианта	m , кг	v_0 , м/с	α , град	r , мм
1	1,7	5,8	62	120	9	2,3	5,9	41	148
2	1,8	6,2	65	125	10	1,7	4,7	26	134
3	1,9	6,1	70	100	11	1,6	5,2	34	126
4	2,1	6,3	73	110	12	2,0	5,6	36	150
5	1,6	4,5	24	124	13	1,5	4,9	29	118
6	1,5	5,1	45	115	14	1,9	4,6	69	140
7	2,2	6,0	63	136	15	1,6	7,0	22	130
8	2,4	6,4	55	128	16	1,8	6,9	79	142

Контрольные вопросы

- 1 Зависит ли дальность полета, максимальная высота и время полета тела от его массы?
- 2 При добавлении нового тела в MSC.ADAMS \ View и закреплении его на опорной поверхности, появится ли это тело в навигаторе?
- 3 За что отвечает функция On Ground при создании объекта?
- 4 Как можно найти максимальную высоту, которую достигнет камень во время полёта?

16 Симуляционное моделирование подъемного механизма в MSC.ADAMS

Цель занятия: получение практических навыков моделирования в MSC.ADAMS.

Рассмотрим возможности системы MSC.ADAMS при решении задач механики с учетом сил трения.

Ящик 1 массой 100 кг располагается на наклонной плоскости 2 (рисунок 16.1). Ширина ящика $a_1 = 8$ м, длина $b_1 = 10$ м, высота $c_1 = 4$ м. Наклонная плоскость имеет следующие размеры: ширина $a_2 = a_1 = 8$ м, длина $b_2 = 46$ м, высота $c_2 = 2$ м. Для определенности установим размер $b_3 = 34$ м. Статический коэффициент трения (коэффициент сцепления, коэффициент трения покоя)

$f_{cu} = 0,3$. Динамический коэффициент трения (коэффициент трения скольжения) $f = 0,25$.

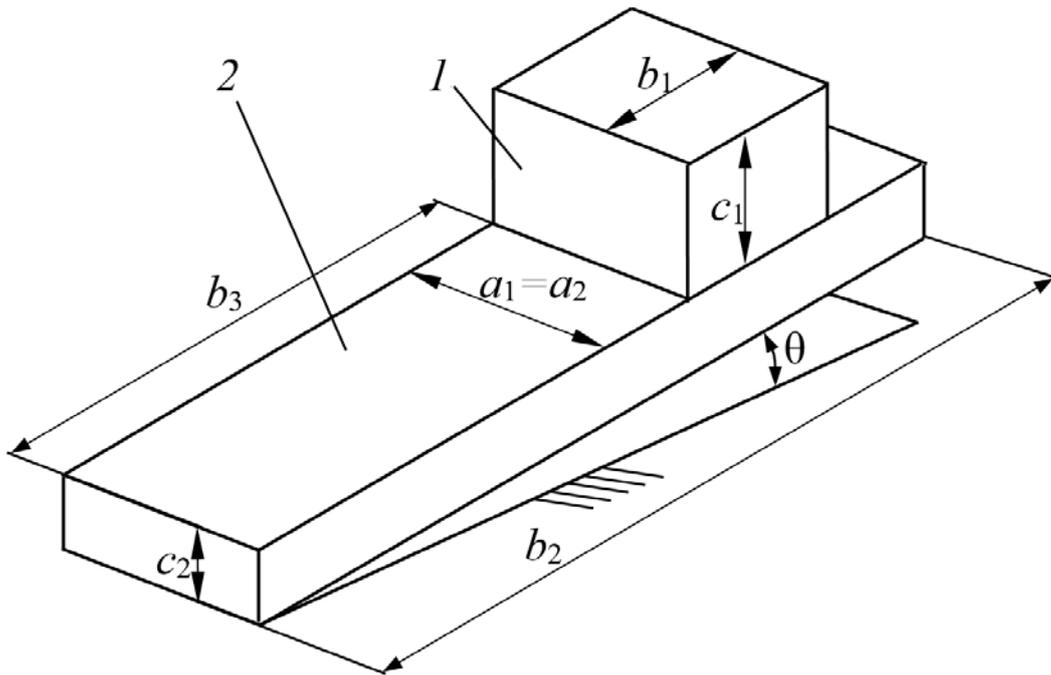


Рисунок 16.1 – Схема для решаемой задачи

Определить: ускорение ящика при заданном угле наклона плоскости $\theta_1 = 15^\circ$, при этом силы трения не учитывать; максимальный угол наклона θ_{\max} , при котором нарушится равновесие ящика и начнется его движение по плоскости при заданных коэффициентах трения; ускорение ящика при угле наклона плоскости $\theta_2 = 20^\circ$.

Запускаем Adams / View. Создаём новую модель под названием «inclined_plane». Выбираем гравитацию Earth Normal (-GlobalY), а единицы измерения ставим (inch, lbm, lbf, s,deg).

Далее отрегулируем интервал и ориентацию рабочей сетки. Для этого из меню настроек выбираем рабочую сетку.

При создании объектов мы будем использовать угол наклона, равный 0° . Мы будем вращать объект для получения нужного угла наклона позже. Убедитесь, что объект, который считается заделкой, будет закреплён в пространстве.

Приступим к созданию заделки. Из ленты тел выбираем коробку (box). Закрепим это тело в пространстве. Для этого выбираем функцию (On Ground). Далее настроим размер тела по длине (Length) – 46 in, по высоте (Height) – 2 in, по глубине (Depth) – 8 in.

Также построим ящик, используя следующие параметры: длина (Length) – 10 in, высота (Height) – 4 in, глубина (Depth) – 8 in. Функцию выбираем New part. Расположим ящик ближе к концу рабочей поверхности.

Для того чтобы установить массу ящика (Crate) на 100 lmb, правой кнопкой мыши нажимаем на Crate и выбираем функцию modify.

Устанавливаем Define mass by на User input. В окне установки массы вводим 100 lbm и нажимаем ОК.

Сейчас мы будем вращать модель на 15° . Так как мы не можем свободно вращать заделку, изменим ориентацию её угла наклона на (15,0,0). Для этого кликаем правой кнопкой мыши на MARKER_1 и выбираем Modify. В текстовом меню ориентации (Orientation) изменяем данные (0,0,0) на (15,0,0).

В стандартной ленте инструментов нажимаем правой кнопкой мыши на инструмент перемещения и выбираем там функцию выровнять и повернуть. В текстовом меню угла (Angle) вводим 15° , это угол, на который мы повернём ящик, и нажимаем Enter.

Для перемещения ящика на плоскость (ramp) воспользуемся функцией position: Move. В меню переноса вводим дистанцию 9 in и нажимаем стрелочку вверх.

Создадим окно для замера ускорения. Для этого правой кнопкой мыши нажимаем на Crate и выбираем Measure. В открывшемся окне выбираем характеристику ускорение (acceleration) компонента X, Represent coordinates in: MARKER_1.

С помощью окна замера определим ускорение ящика.

Чтобы добавить силу трения из меню Browse, выбираем Connectors, далее правой кнопкой мыши нажимаем на JOINT_1 и выбираем функцию Modify.

Ставим коэффициент статического трения, равный $\mu_s = 0,3$, и коэффициент динамического трения, равный $\mu_d = 0,25$, также уберём галочки из функций изгибающего и крутящего моментов (Bending and Torsional Moments).

Проводим симуляцию модели. Обратим внимание, ящик не соскользнул. В окне измерений нажимаем правой кнопкой мыши на кривую, выбираем Curve: current, далее Save Curve.

Для нахождения угла наклона, под которым ящик начнет скользить, запустим симуляцию. Проверим, чтобы ящик начал скатываться. Для времени 0,5 убедитесь, что ускорение ящика напротив полоски времени соответствует прилегающей фигуре. Первоначальный шип связан с ускорением (под действием силы притяжения) во время $t = 0$.

Задача для самостоятельного решения

Необходимо в соответствии со схемой на рисунке 16.1 и исходными данными в таблице 16.1 определить ускорение ящика при заданном угле наклона плоскости θ_1 , при этом силы трения не учитывать; максимальный угол наклона θ_{\max} , при котором нарушится равновесие ящика и начнется его движение по плоскости при заданных коэффициентах трения; ускорение ящика при угле наклона плоскости θ_2 .

При моделировании и расчетах принять $f = f_{cy} - 0,04$; $\theta_2 = \theta_1 + 5^\circ$. При моделировании единицы измерения принимать по англо-американской системе мер.

Таблица 16.1 – Исходные данные для задачи

Номер варианта	$a_1 = a_2$, м	b_1 , м	b_2 , м	c_1 , м	c_2 , м	f_{cw}	θ_1 , град
1	7,4	9,6	49	4,7	1,8	0,28	18
2	6,2	9,4	48	5,2	2,0	0,26	17
3	8,3	9,5	47	5,4	1,9	0,24	15
4	7,1	9,3	46	4,6	1,7	0,22	16
5	6,4	8,8	45	4,8	1,6	0,20	19
6	8,5	8,5	50	5,3	2,1	0,27	20
7	7,2	8,9	49	5,5	2,2	0,25	22
8	6,3	8,6	48	4,5	2,1	0,23	24

Контрольные вопросы

- 1 Зависит ли максимальный угол наклона плоскости θ_{\max} от массы тела (ящика)?
- 2 Можно ли автоматически добавлять трение к связанным объектам?
- 3 Если связанные объекты со включённым трением пересекают их порог скорости прилипания ΔV_s , как максимальное смещение трения ΔX_s повлияет на систему?

17 Симуляционное моделирование кулачково-рычажного механизма в MSC.ADAMS

Цель занятия: получение практических навыков моделирования в MSC.ADAMS.

Необходимо провести кинематико-динамический расчет конструкции, приведенный на рисунке 17.1 [7].

Создайте шатунную шейку 5 с помощью Цилиндра заданной длины L и радиуса R в ЦСК, затем переместите ее с помощью Edit – Move... так, чтобы центр масс совпал с ЦСК.

Создайте щёку 6 с помощью Стержня (Link) с заданными параметрами W , Q , E в ЦСК. Поверните деталь на 90° относительно оси Y (с помощью Move... → Rotate). Для облегчения дальнейших булевых операций переместите щёку к краю шатунной шейки таким образом, чтобы шейка немного (примерно на 1 мм) заходила в щёку, т. е. детали перекрывали друг друга.

Используя функцию копирования Edit – Copy... и перемещения, создайте щеку KB на другом конце шатунной шейки. В ADAMS при копировании копия детали появляется на том же месте, что и базовая деталь, но получает суффикс $_2$ в названии.

Объедините все полученные элементы в один с помощью булевых операций.

(высота) равна $L = 2$ мм. Затем переместите ее с помощью Move... так, чтобы центр масс совпал с ЦСК.

Создайте «заготовку» под противовес 8 с помощью Цилиндра произвольного диаметра (около 5...10 см) и высотой, равной толщине E (Depth) щеки. Затем совместите ось цилиндра с нижней осью коленчатого вала.

В ЦСК создайте коренную шейку с помощью Цилиндра с размерами шатунной шейки (R, L).

Для обеспечения подвижности шатуна вокруг шатунной шейки соедините шатун и шатунную шейку вращательным шарниром JR и поверните его относительно оси Y на 90° . Для имитации движения поршня внутри гильзы цилиндра двигателя соедините поршень с «землей» поступательным шарниром JT.

Для обеспечения подвижности цилиндропоршневой группы относительно верхней головки шатуна соедините шатун и поршневой палец вращательным шарниром JR.

Откройте меню Create Forces и приложите момент сопротивления к коренной шейке вала, являющейся осью вращения коленчатого вала, а затем поверните его по оси Y на 90° . При этом коленчатый вал будет вращаться вокруг оси X.

Задача для самостоятельного решения

С помощью ADAMS / PostProcessor получите графики, отражающие кинематику и динамику построенной модели:

- графики изменения момента сопротивления и крутящего момента на одном поле;
- график вертикального перемещения центра масс поршневого пальца;
- график скорости центра масс поршневого пальца в вертикальном направлении;
- график ускорения центра масс поршневого пальца в вертикальном направлении.

Контрольные вопросы

- 1 Как вывести график крутящего момента?
- 2 Как вывести график скорости центра масс звена?
- 3 Как приложить силы к звену механизма?

Список литературы

1 **Ефремов, Г. В.** Инженерная и компьютерная графика на базе графических систем : учебное пособие / Г. В. Ефремов, С. И. Ньюкалова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол : ТНТ, 2018. – 264 с.

2 **Самсонов, В. В.** Автоматизация конструкторских работ в среде Компас-3D : учебное пособие / В. В. Самсонов, Г. А. Красильникова. – Москва : Академия, 2008. – 224 с.

3 **Савченко, Н. В.** Автоматизация построения чертежей. Лабораторный практикум по инженерной и компьютерной графике в системе КОМПАС-3D: учебное пособие / Н. В. Савченко. – Самара: СГАУ, 2015. – 216 с.

4 **Паньков, М.** Оживляя механизмы. Работа с анимацией в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D / М. Паньков // САПР и графика. – 2014. – С. 106–112.

5 **Комар, В. Л.** Теория механизмов и машин: учебное пособие / В. Л. Комар, А. П. Прудников. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – 334 с.: ил.

6 NX для конструктора-машиностроителя / П. С. Гончаров [и др.]. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 504 с.: ил.

7 **Мелентьев, В. С.** Лабораторный практикум по использованию пакета ADAMS: методические указания / В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев, Д. С. Лежин. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2006. – 44 с.: ил.