



Начинаем работать



Модуль моделирования упругих тел

Это руководство поможет вам изучить особенности создания моделей, содержащих упругие тела, и анализа их динамики в программном комплексе «Универсальный механизм»

Оглавление

НАЧИНАЕМ РАБОТАТЬ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ»: МОДУЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ.....	3
1. КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННЫЙ МЕХАНИЗМ.....	5
1.1. НАСТРОЙКА ОБМЕНА ДАННЫМИ С ПРОГРАММОЙ ANSYS	6
1.2. ПОДГОТОВКА ДАННЫХ УПРУГОГО ШАТУНА.....	7
1.2.1. Работа в среде ANSYS и преобразование данных	7
1.2.2. Мастер подготовки данных упругих подсистем	9
1.3. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ	15
1.3.1. Создание графических объектов	15
1.3.2. Создание тел.....	16
1.3.3. Добавление упругой подсистемы	17
1.3.4. Создание шарниров	18
1.3.5. Подготовка к моделированию	19
1.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МЕХАНИЗМА	20
2. ЭЛЕКТРОМОТОР НА УПРУГОЙ ПЛАТФОРМЕ	27
2.1. ПОДГОТОВКА ДАННЫХ УПРУГОЙ ПЛАТФОРМЫ	29
2.1.1. Работа в среде ANSYS и преобразование данных	30
2.1.2. Работа в среде ANSYS Workbench и преобразование данных.....	31
2.1.3. Подготовка данных упругой платформы в ПК FIDESYS	36
2.1.3.1. Работа в графической среде ПК FIDESYS	37
2.1.3.2. Работа в ПК FIDESYS с помощью команд командной строки.....	47
2.1.3.3. Подготовка модели к импорту в ПК УМ.....	48
2.1.3.4. Обмен данными с ПК FIDESYS	49
2.1.4. Мастер подготовки данных упругих подсистем	51
2.2. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ	52
2.2.1. Добавление упругой платформы	52
2.2.2. Крепление упругой платформы к базе	52
2.2.3. Создание графических объектов	53
2.2.4. Создание силовых элементов.....	59
2.2.5. Создание модели электродвигателя	61
2.2.5.1. Добавление электродвигателя как подсистемы	61
2.2.5.2. Описание режимов вращения ротора.....	63
2.2.6. Крепление электродвигателя на платформе посредством силовых элементов	65
2.2.7. Подготовка к моделированию	66
2.2.8. Моделирование динамики вибростенда	67
2.2.8.1. Расчет положения равновесия и частот	68
2.2.8.2. Интегрирование уравнений движения	69

Начинаем работать в программном комплексе «Универсальный механизм»: модуль моделирования упругих тел

Модуль **UM FEM** позволяет включать в состав модели механической системы упругие тела¹, совершающие произвольные пространственные перемещения. При этом упругие перемещения за счет деформаций предполагаются малыми и в системе координат, связанной с телом, могут быть адекватно описаны методом конечных элементов (МКЭ), использующим геометрически линейную теорию.

Это руководство поможет вам изучить особенности создания моделей, содержащих упругие тела, и анализа их динамики в программном комплексе (ПК) «Универсальный механизм» (**УМ**). Более подробная информация о модуле моделирования упругих тел изложена в файле [11_UM_FEM.pdf](#), который вы можете найти в каталоге [{Данные УМ}\MANUAL](#) или скачать по адресу: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/11_um_fem.pdf.

Предполагается, что вы уже изучили раздел, посвященный введению в моделирование в ПК **УМ**, который находится в файле [gs_UM.pdf](#)², и умеете выполнять в **УМ** простые действия: создавать новую модель, добавлять тела и шарниры, синтезировать уравнения движения (**UM Input**) и работать в программе моделирования движения (**UM Simulation**).

Для моделирования упругих тел применяется модальный подход, в соответствии с которым малые упругие перемещения представляются преобразованным набором собственных и статических форм упругого тела. При таком подходе подготовка данных включает описание тела методом конечных элементов и расчет необходимого числа форм. Эти этапы реализуются с помощью программы МКЭ **ANSYS**, после чего данные импортируются в **УМ** программой **ANSYS_UM.exe**.

Каждое упругое тело рассматривается в **УМ** как отдельная подсистема. Стандартным файлом данных упругой подсистемы является бинарный файл **input.fss** (подобно текстовому файлу **input.dat** для подсистем, состоящих из абсолютно твердых тел). Этот файл по желанию пользователя может быть создан программой **ANSYS_UM.exe** непосредственно либо с помощью **Мастера подготовки данных упругих подсистем** в среде программы **UM Input**. В последнем случае программой **ANSYS_UM.exe** создается промежуточный файл **input.fum**, который является файлом исходных данных для **Мастера**.

После создания файла **input.fss** или **input.fum** подготовка модели механической системы, включающей данное упругое тело, выполняется независимо от программы **ANSYS**, то есть указанные файлы могут свободно переноситься с компьютера на компьютер. Дальнейшая работа проводится в среде **УМ**. Полный цикл подготовки данных составного объекта, включающего упругие тела, с описанием каждого этапа приводится в главе 11 руководства пользователя **УМ**.

¹ В рамках подхода динамики систем тел механические системы и их модели, включающие как абсолютно твердые, так и упругие тела, обычно называют гибридными.

² http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/gs_um.pdf

Таким образом, необходимым условием использования модуля **UM FEM** является доступность программы **ANSYS** для пользователя, либо его коллег.

Кроме того, отметим, что комплект поставки УМ обязательно должен содержать модуль подсистем (**UM Subsystems**).

Замечание. Перед тем, как продолжить, пожалуйста, убедитесь в том, что модули **UM FEM** и **UM Subsystems** действительно установлены в вашей поставке ПК УМ. Запустите программу **UM Input** или **UM Simulation**, выберите пункт меню **Помощь | О программе...** В разделе **Конфигурация** вы найдете список установленных модулей.

1. Кривошипно-ползунный механизм

Рассмотрим в качестве тестового примера моделирование динамики кривошипно-ползунного механизма, схема которого представлена на рис. 1.1.

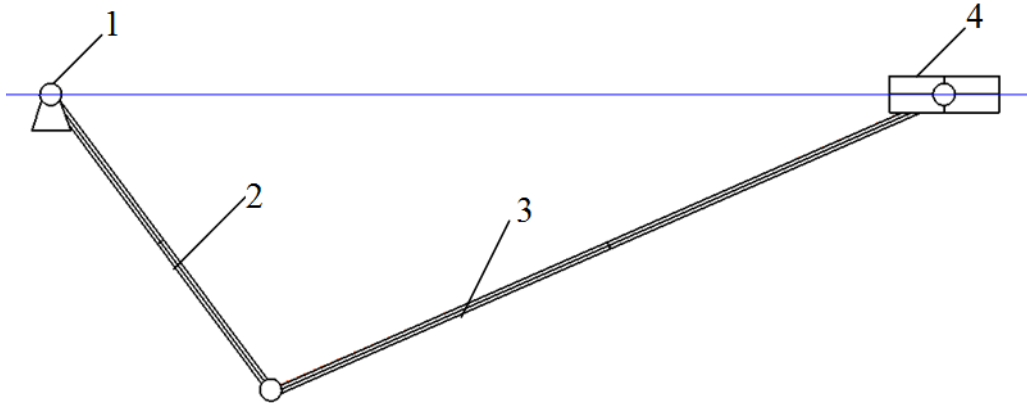


Рис. 1.1. Схема кривошипно-ползунного механизма: 1 – база, 2 - кривошип, 3 – шатун, 4 – ползун.

В каталоге [{Данные УМ}\SAMPLES\Flex](#) содержится задача **Slider_crank_all**, включающая три модели кривошипно-ползунного механизма, различающиеся способом представления шатуна. В этих моделях шатун представлен следующим образом:

- абсолютно твердым телом;
- системой одиннадцати абсолютно твердых тел, связанных вращательными шарнирами с внутренними линейными упругостью и диссипацией;
- упругой балкой, описанной в соответствии с модальным подходом (п. 11.1. руководства пользователя **УМ**).

В настоящем пункте опишем процесс создания третьей модели, содержащей упругий шатун.

Подготовка модели включает следующие этапы:

1. описание шатуна методом конечных элементов в программе **ANSYS**;
2. расчет упругих форм шатуна, запись данных в формате **УМ**;
3. описание графических объектов;
4. описание тел: кривошипа и ползуна;
5. добавление упругого шатуна;
6. описание шарниров.

Этапы 3-6 выполняются в программе **UM Input**.

Замечание. Для моделирования упругих тел в программе УМ применяется метод подсистем. При этом каждое упругое тело полагается отдельной подсистемой вида «Линейная подсистема МКЭ». Добавление, удаление упругих тел и

описание взаимодействий с ними посредством шарниров и силовых элементов выполняются по правилам работы с подсистемами.

Выберите каталог для хранения создаваемого объекта, например {Данные УМ}\My Models или D:\models. В пределах настоящего пункта будем обозначать его «.\». В данном каталоге создайте два подкаталога:

- **flexbeam**, в котором будут храниться данные упругой балки;
- **slider_crank_fem**, в котором будут храниться данные составной модели.

Далее последовательно опишем каждый из упомянутых выше этапов. Заметим, что полноту изучения процесса подготовки данных упругого шатуна пользователь может выбрать самостоятельно, в соответствии со следующими инструкциями.

- Если на компьютере пользователя установлена программа **ANSYS** и он желает подробно изучить весь цикл подготовки данных, настоящее руководство следует читать последовательно.
- Если при изучении руководства программа **ANSYS** недоступна, либо при первом прочтении пользователь решил пропустить этап работы в **ANSYS**, но желает ознакомиться с **Мастером подготовки данных упругих подсистем**, нужно скопировать файл {Данные УМ}\SAMPLES\Flex\flexbeam- Если пользователь желает пропустить изучение всех этапов подготовки данных упругого шатуна, нужно скопировать файл {Данные УМ}\SAMPLES\Flex\flexbeam

1.1. Настройка обмена данными с программой ANSYS

Подготовка данных, необходимых для моделирования динамики упругого тела, выполняется с помощью программы **ANSYS**. После описания упругого тела методом конечных элементов выполняется расчет необходимого числа собственных и статических форм. Для автоматизации этого этапа используется макрос **um.mac**. Затем выполняется программа **ANSYS_UM.exe**, которая преобразует набор форм и сохраняет данные в формате **UM FEM**. Для организации обмена данными следует руководствоваться следующими положениями.

1. После инсталляции программы УМ макрос **um.mac** и программа **ANSYS_UM.exe** располагаются в подкаталоге {УМ}\bin. Поместите файл **um.mac** в каталог, выбранный в среде **ANSYS** по умолчанию для хранения макросов (подробнее см. п. 11.2 руководства пользователя). В среде **ANSYS 9.0**, например, это подкаталог **.lapdl** каталога программы. В противном случае перед запуском макроса необходимо задать путь к нему посредством команды **ANSYS:**

/PSEARCH,Путь_к_макросу

2. По окончании работы макроса **um.mac** должна выполняться программа **ANSYS_UM.exe**. Она может запускаться автоматически из макроса, либо вручную после его выполнения. Для автоматического запуска необходимо отредактировать параметр

команды /sys в последней строке макроса **um.mac**, используя любой текстовый редактор. Например,

```
/sys,c:\um90\bin\ansys_um.exe
```

В качестве параметра укажите полный путь к программе **ANSYS_UM.exe**.

Замечание 1. Если путь к программе **ANSYS_UM.exe** содержит пробелы, тогда заключите путь в кавычки. Например, /sys,"c:\um90\bin\ansys_um.exe"

Замечание 2. Не допускается использование букв русского алфавита в наименовании пути к программе **ANSYS_UM.exe**

1.2. Подготовка данных упругого шатуна

1.2.1. Работа в среде ANSYS и преобразование данных

Выше упоминалось, что подготовка данных упругого тела содержит этап расчета собственных форм, то есть этап решения обобщенной проблемы собственных значений. Возможны два варианта математической формулировки этой задачи:

- с диагональной матрицей масс;
- с полной матрицей масс – матрицей, построенной по функциям форм конечных элементов.

Каталог [{Данные UM}\SAMPLES\Flex\flexbeam\input](#) содержит подкаталоги **consistent** и **lumped**. В первом каталоге содержится файл для расчета с полной матрицей масс, во втором – для расчета с диагональной матрицей.

В настоящем руководстве мы рассмотрим пример с диагональной матрицей масс.

1. Скопируйте файл **flexbeam&mass21.ans** из каталога [{Данные UM}\SAMPLES\Flex\flexbeam\input\lumped](#) в каталог **.\flexbeam**. Данный файл является макросом на языке APDL, автоматизирующим создание модели упругой балки. Он содержит комментарии, поясняющие каждый шаг процесса.
2. Запустите программу **ANSYS Interactive** и выберите каталог **.\flexbeam** в качестве рабочего каталога.
3. Запустите **ANSYS**. Выберите пункт основного меню **File | Read Input from** и укажите файл **flexbeam&mass21.ans**. В результате будет создана стальная балка длиной 2 метра с квадратным сечением, длина стороны которого 2 см. Конечно-элементная модель включает 100 элементов типа BEAM4 и 200 элементов типа MASS21. В качестве интерфейсных узлов автоматически выбираются 2 узла на концах балки³. Если правильно выполнены настройки среды **ANSYS** (см. п. 1.1), то автоматически будет запущен макрос **um.mac**. После завершения его работы будут рассчитаны 12 статических и 10 собственных форм, соответствующих 10-ти низшим собственным частотам.
4. Если правильно задан путь к программе **ANSYS_UM.exe** внутри макроса (см. п. 1.1), она стартует автоматически, в противном случае запустите ее из каталога **{UM}\bin**.
5. На вкладке **Основные** укажите файл результатов **.\flexbeam\flexbeam.rst** и каталог для сохранения данных **.\flexbeam** (рис. 1.2).

³ Определение понятия и описание назначения интерфейсных узлов приводятся в главе 11 руководства пользователя ПК «Универсальный механизм» (part11.pdf).

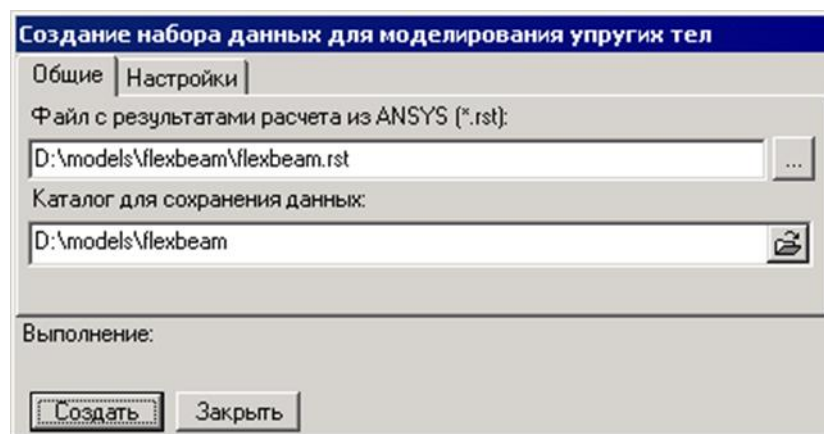


Рис. 1.2.

6. На вкладке **Настройки** сбросьте флажок **ортогонализация форм** (рис. 1.3).

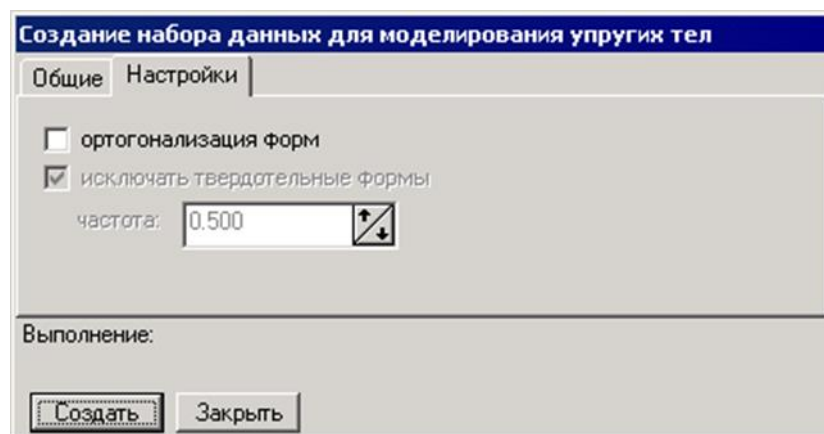


Рис. 1.3.


Данный вариант настройки соответствует созданию промежуточного файла **input.fum**. На следующем этапе воспользуемся **Мастером подготовки данных упругих подсистем**.

Замечание. Использование мастера — необязательный этап создания модели, однако, его изучение представляется весьма полезным для эффективной работы в дальнейшем. Подготовка данных может быть завершена с помощью программы **ANSYS_UM**. Для этого нужно установить флажки **ортогонализация форм**, **исключать твердотельные формы** и задать модуль собственного значения для идентификации твердотельных форм. В этом случае будет создан файл **input.fss**. Подробнее см. [Главу 11](#) «Руководства пользователя УМ».

7. Нажмите кнопку **Создать**. При успешном завершении работы программы будет создан промежуточный файл **.\flexbeam\input.fum**.
8. Закройте программу **ANSYS_UM** кнопкой **Закреть**.

1.2.2. Мастер подготовки данных упругих подсистем

Промежуточный файл **input.fum** содержит набор собственных и статических форм упругого тела. Для завершения подготовки данных необходимо выполнить ортогонализацию форм. Мастер подготовки данных предоставляет удобные средства отображения упругих форм, исключения некоторых из них, а также выполнения необходимых преобразований.

1. Запустите программу **UM Input**.
2. Воспользуйтесь пунктом **Инструменты | Мастер упругих подсистем...** основного меню для вызова мастера. Мастер содержит анимационное окно для отображения упругой подсистемы и управляющую панель.
3. Укажите имя файла данных, включая полный путь к нему, в поле **Файл данных** (рис. 1.4.) на панели, расположенной в правой части формы мастера или выберите файл в диалоге (рис. 1.5), который вызывается нажатием кнопки .

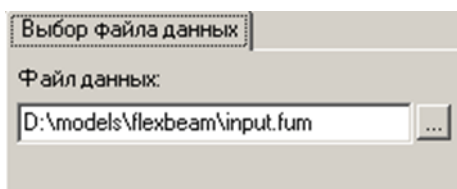


Рис. 1.4.

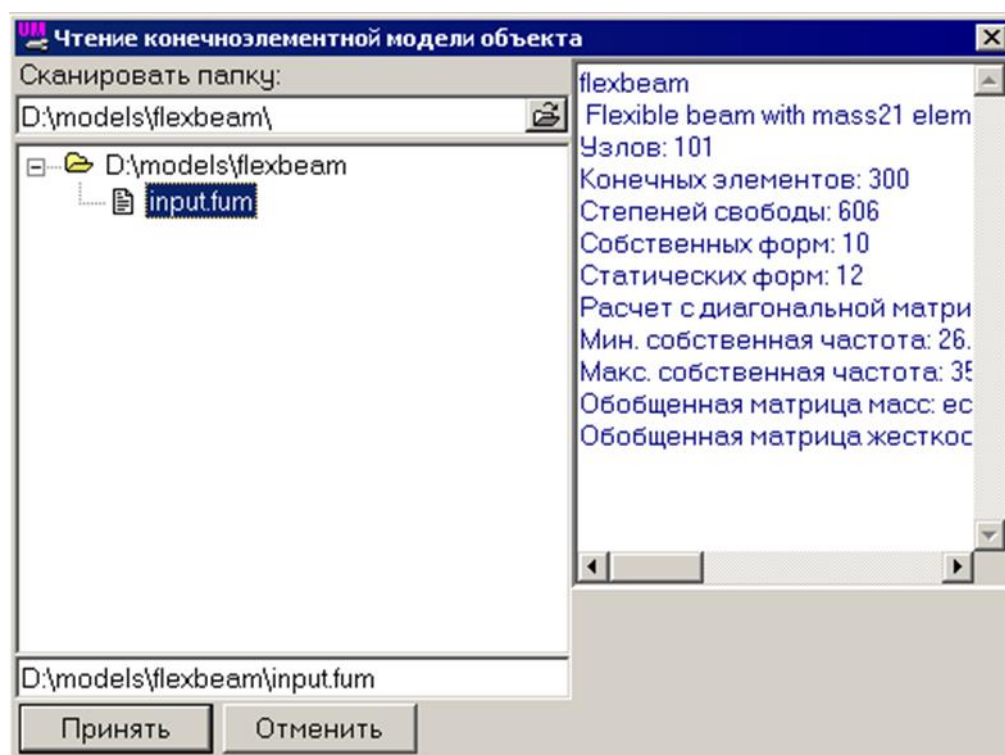


Рис. 1.5.

Экранная форма мастера после чтения данных содержит четыре вкладки: **Общие**, **Представление**, **Положение** и **Решение**.

Вкладка **Общие** содержит сводные сведения об упругой подсистеме (рис. 1.6).

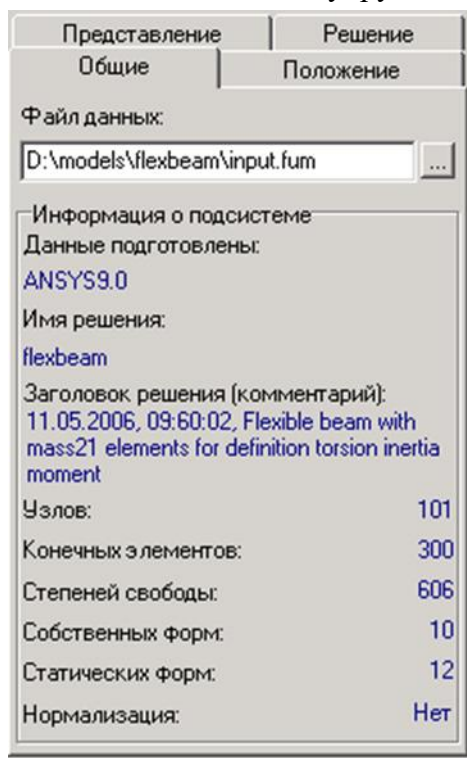


Рис. 1.6.

Вкладка **Положение** (рис. 1.7) используется для задания сдвига и ориентации подсистемы относительно СК0. Указанные преобразования влияют только на отображение модели упругого тела в анимационном окне. Наш пример демонстрирует полезность этой вкладки. В исходном состоянии линия, изображающая балку, совпадает с осью **X** системы координат, что не очень наглядно.

4. В поле **Сдвиг | z** установите значение **0.3**, чтобы сместить балку из положения, в котором она совпадает с осью **X**.

Представление		Решение	
Общие		Положение	
Сдвиг			
x	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
y	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
z	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Поворот			
<input type="text"/>	<input type="text" value="0.00000000"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text" value="0.00000000"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text" value="0.00000000"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Сдвиг после поворота			
x	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
y	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
z	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Рис. 1.7.

Вкладка **Представление** предназначена для настройки графического вида конечно-элементной схемы упругой подсистемы. Возможны два режима отображения: полный и упрощенный. В режиме полного отображения в статус-строке анимационного окна выводится информация об узлах и конечных элементах упругой подсистемы при наведении на них курсора мыши. Однако полное изображение формируется дольше упрощенного, что может иметь значение для конечно-элементных схем с большим числом конечных элементов, особенно при анимации форм упруго тела.

5. Задайте настройки вкладки **Представление** как это показано на рис. 1.8.

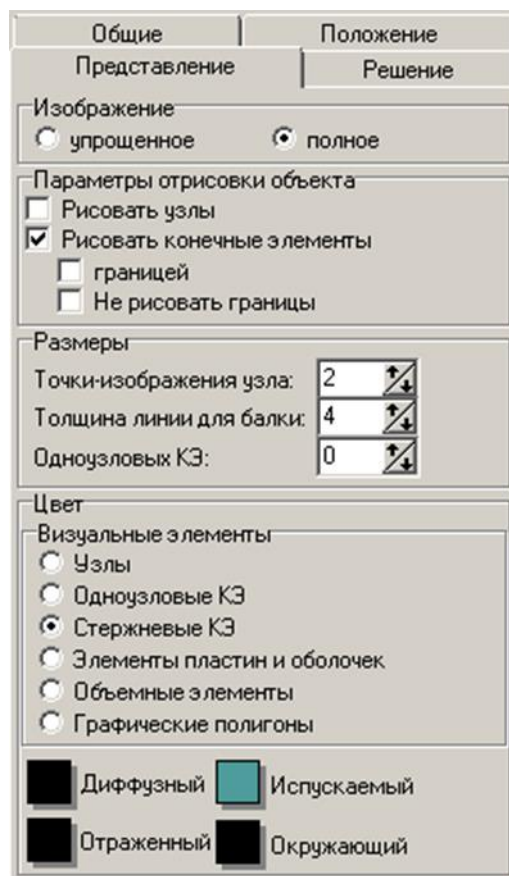


Рис. 1.8.

Замечание. Одноузловые конечные элементы типа MASS21 выполняют вспомогательную роль – они используются для задания момента инерции шатуна относительно продольной оси (см. комментарии в файле **flexbeam&mass21.ans**). Скроем их отображение, установив размер **одноузловых КЭ** равным **0**, чтобы не усложнять графический вид подсистемы.

Вкладка **Решение** позволяет просмотреть формы упругой подсистемы в режиме анимации, которая стартует при нажатии кнопки **Показать** (рис. 1.9). Посредством управляющих элементов **Амплитуда** и **Скорость** можно задать соответствующие параметры анимации. Флажок в левой части каждого элемента списка упругих форм позволяет включить/исключить соответствующую форму из набора данных. Таким образом, с помощью мастера подготовки данных пользователь может строить модели с различным числом упругих форм. При этом требуется однократный расчет в программе **ANSYS**, где задается максимальное число собственных форм, представляющих упругие перемещения подсистемы (в нашем случае 10). Понятно, что с помощью мастера можно только уменьшить это число в итоговом наборе данных. В настоящем примере оставьте исходный набор упругих форм без изменений.

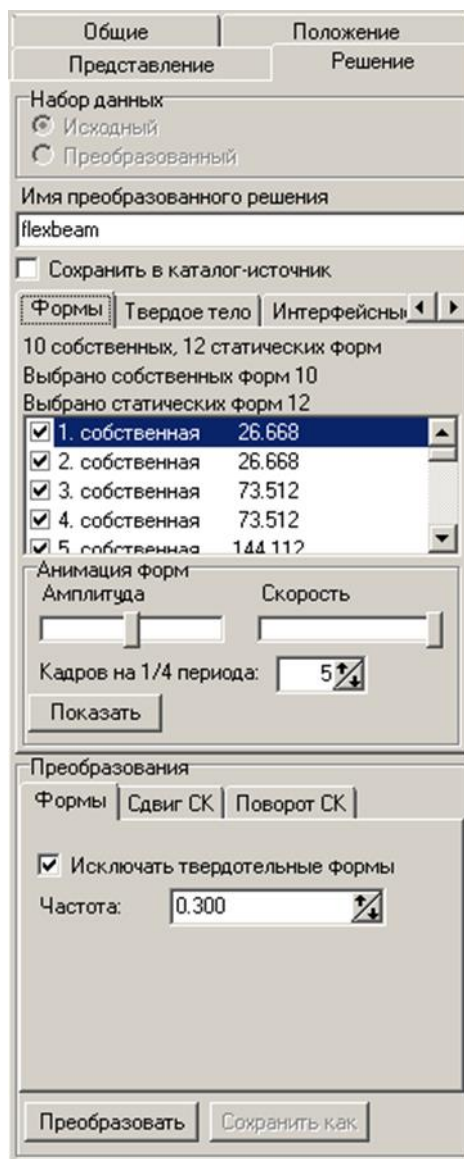


Рис. 1.9.

- Установите флажок **Исключать твердотельные формы**, в поле **Частота** задайте значение **0.3**, нажмите кнопку **Преобразовать** и подтвердите действие в появившемся диалоге (рис. 1.10).

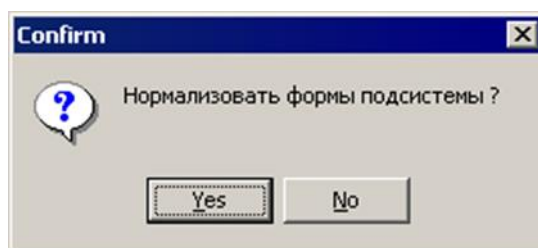


Рис. 1.10

В результате будет создан преобразованный набор упругих форм, необходимый для включения упругого тела в состав гибридной модели. При успешном завершении программы должно появиться следующее сообщение (рис. 1.11).

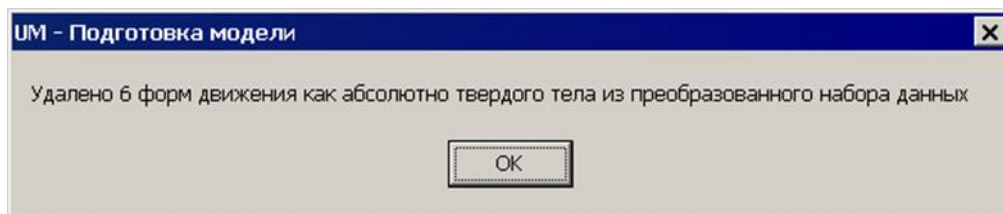


Рис. 1.11.

Пояснение. При использовании исходного набора собственных и статических форм, упругое тело может перемещаться в локальной системе координат как абсолютно твердое, что недопустимо применяемой методикой моделирования. Для устранения этого несоответствия решается обобщенная проблема собственных значений с обобщенными матрицами масс и жесткости упругого тела, и удаляются формы соответствующие нулевым собственным значениям. Ошибки округлений приводят к тому, что в спектре задачи присутствуют малые частоты. Собственные формы, соответствующие более низким частотам, чем указано в поле **Частота**, удаляются из набора данных.

Сохраним преобразованный набор данных.

7. В группе **Набор данных** выберите значение **Преобразованный** (рис. 1.12).

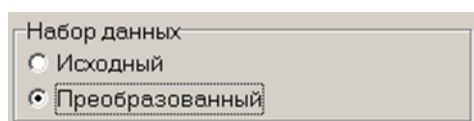


Рис. 1.12.

Преобразованные формы упругой подсистемы можно просмотреть аналогично исходным формам.

8. Нажмите кнопку **Сохранить как** и задайте путь к подсистеме. При этом имейте в виду, что имя последнего каталога в пути (имеющего самый высокий уровень вложенности) будет использоваться в качестве имени подсистемы (рис. 1.13).
9. В появившемся диалоге нажмите кнопку **Сохранить**.

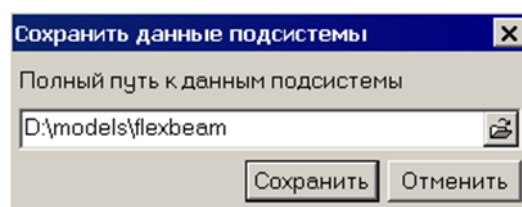


Рис. 1.13.

Подготовка данных упругого тела закончена.

1.3. Создание модели

Модель содержит 3 тела и четыре шарнира (пятый шарнир для упругого шатуна создается автоматически).


Тела:

- кривошип, длиной 1 метр;
- шатун длиной 2 метра;
- ползун.


Кривошип и ползун являются абсолютно твердыми телами, шатун – упругой подсистемой.

Шарниры:

- вращательный шарнир база-кривошип;
- вращательный шарнир кривошип-шатун;
- вращательный шарнир шатун-ползун;
- поступательный шарнир ползун-база.

1. Создадим новую модель. Выберите пункт **Файл | Новый объект** главного меню или воспользуйтесь кнопкой  на панели инструментов для вызова конструктора объекта.

1.3.1. Создание графических объектов

1. Прочитайте графический объект из файла `{Данные УМ}\Graph\Base1.umi`, нажав кнопку  на панели инструментов, либо с помощью пункта главного меню **Правка | Прочитать из файла...** При этом в списке графических объектов появится элемент с именем «NoName».
2. Выберите этот элемент, и задайте ему имя **Сцена** в поле инспектора данных (рис. 1.14).

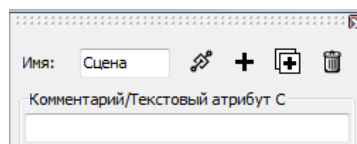


Рис. 1.14.

3. Повторите еще дважды эти действия для файлов **Crank1.umi** и **Slider1.umi**, расположенных в каталоге `{Данные УМ}\Graph`. Присвойте созданным графическим объектам имена **Кривошип** и **Ползун** соответственно. Таким образом, всего создано три графических объекта.

4. Выберите **Объект** в списке элементов и назначьте графический объект **Сцена** в качестве образа сцены (рис. 1.15).

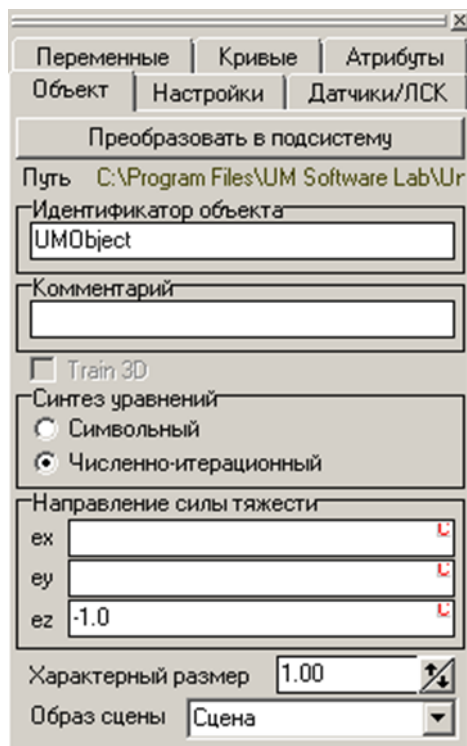


Рис. 1.15.

1.3.2. Создание тел

Для добавления кривошипа и ползуна используется вкладка Тела конструктора объекта.

1. Выберите **Тела** в дереве элементов объекта.
2. Добавьте два новых тела.
3. Присвойте телам имена **Ползун** и **Кривошип** и назначьте одноименные графические образы.
4. Перейдите на вкладку **Параметры** и установите флажок **Вычислять автоматически**, после чего рассчитаются инерционные параметры (рис. 1.16).

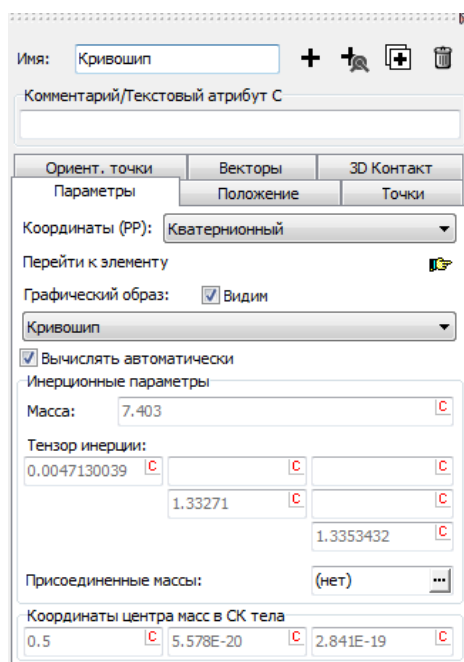


Рис. 1.16.

1.3.3. Добавление упругой подсистемы

1. Выберите вкладку **Подсистемы** конструктора объекта. Добавьте новую подсистему кнопкой **+**.
2. Задайте тип «**Линейная подсистема МКЭ**» и с помощью появившегося диалога выберите подсистему (каталог) **.flexbeam**.

После чтения подсистемы форма инспектора приобретает вид похожий на форму мастера подготовки данных, описанную в п. 1.2. Их основные отличия заключаются в следующем.

- Форма инспектора не содержит управляющих элементов для преобразования упругих форм, поскольку на этом этапе формы уже преобразованы.
- Управляющие элементы вкладки **Положение** используются для задания фактического положения и ориентации подсистемы, в отличие от мастера подготовки данных, где изменения касались только графического отображения.

Упругие формы шатуна можно просмотреть, используя управляющие элементы вкладки **Решение | Формы**.

3. В поле **Имя** введите **Шатун** (рис. 1.17).

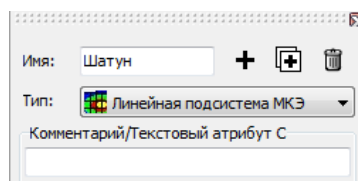



Рис. 1.17.

1.3.4. Создание шарниров

Создадим первый шарнир – вращательный шарнир между базой и кривошипом.

1. Выберите элемент **Шарниры** списка элементов модели.
2. Добавьте новый шарнир кнопкой .

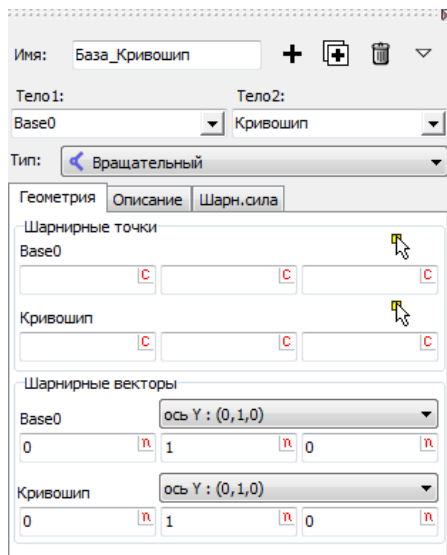


Рис. 1.18.

3. Задайте имя шарнира **База_Кривошип**. Выберите тип шарнира **Вращательный**, назначьте тела и укажите ось Y в качестве шарнирного вектора (рис. 1.18).
4. Перейдите на вкладку **Шарн. сила** (шарнирная сила), выберите **Выражение** в выпадающем списке и задайте символьное выражение момента в шарнире: $F = \text{torque} - \text{cdiss_crank} * v$, (см. рис.1.19). Задайте значения идентификаторов $\text{torque} = 100$, $\text{cdiss_crank} = 10$.

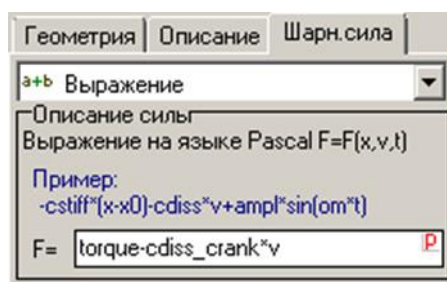


Рис. 1.19.

5. Добавьте остальные шарниры механизма, как показано на рис. 1.20 (не вводя уже формулу шарнирной силы)

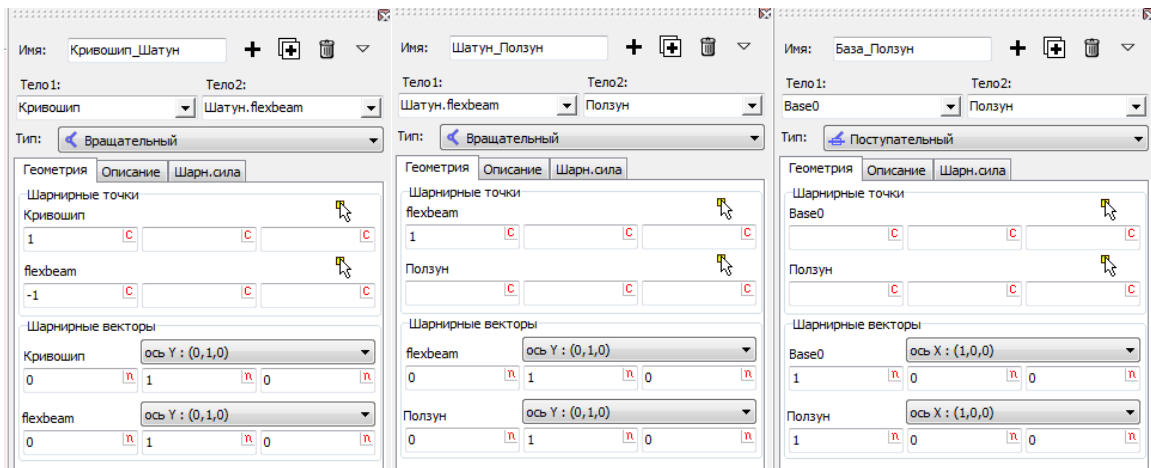


Рис. 1.20.

1.3.5. Подготовка к моделированию

1. С помощью основного меню или панели инструментов сохраните модель под именем **Slider_crank_fem** (рис. 1.21), пункт меню **Файл | Сохранить как...**

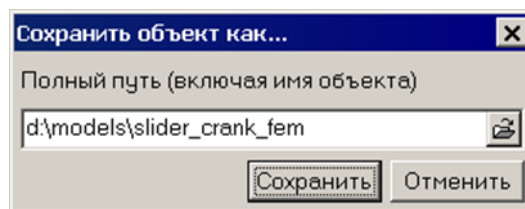


Рис. 1.21.


2. В дереве объектов выберите **Протокол**. При отсутствии ошибок объект готов к моделированию.

1.4. Моделирование динамики механизма

Исследуем силы реакций в шарнирах кривошип-шатун и шатун-ползун при движении кривошипно-ползунного механизма под действием момента, приложенного к кривошипу:

$$M = M_c - \mu\omega ,$$

где $M_c=100$ Н/м – постоянная составляющая момента, ω – угловая скорость кривошипа, $\mu=10$ Нс/м – коэффициент в диссипативной составляющей момента.

1. Запустите программу моделирования динамики **UM Simulation** клавишей **F9** или кнопкой  на панели инструментов. Если появится окно с предупреждением «Не найден предок...» (рис. 1.22), укажите путь к предку подсистемы **Шатун** (`{Данные УМ}\Му Models` или `D:\models`).

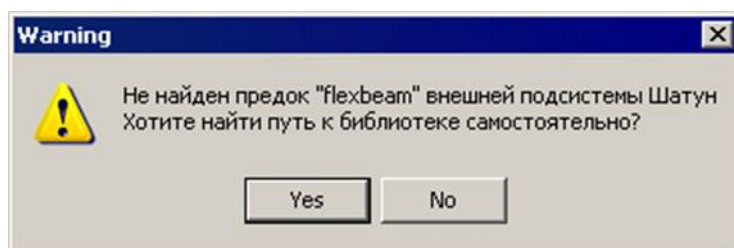


Рис. 1.22.

3. Откройте новое анимационное окно.
4. Для настройки изображения упругого шатуна откройте **Инспектор моделирования объекта** (пункт меню **Анализ | Моделирование...**) и воспользуйтесь вкладкой **Подсистемы МКЭ | Представление**.

Рассчитаем начальные условия.

5. В Инспекторе моделирования объекта перейдите на вкладку **Подсистемы МКЭ | Моделирование | Настройки** включите флажок **Фиксировать модальные координаты** (рис. 1.23).
6. Перейдите на вкладку **Начальные условия**. В выпадающем списке тел выберите **Шатун**. Форма инспектора приобретет вид, показанный на рис. 1.24. Значок якоря во второй колонке таблицы означает запрет на изменение соответствующей координаты, то есть при расчете начальных условий запрещаются упругие перемещения шатуна за счет деформаций.

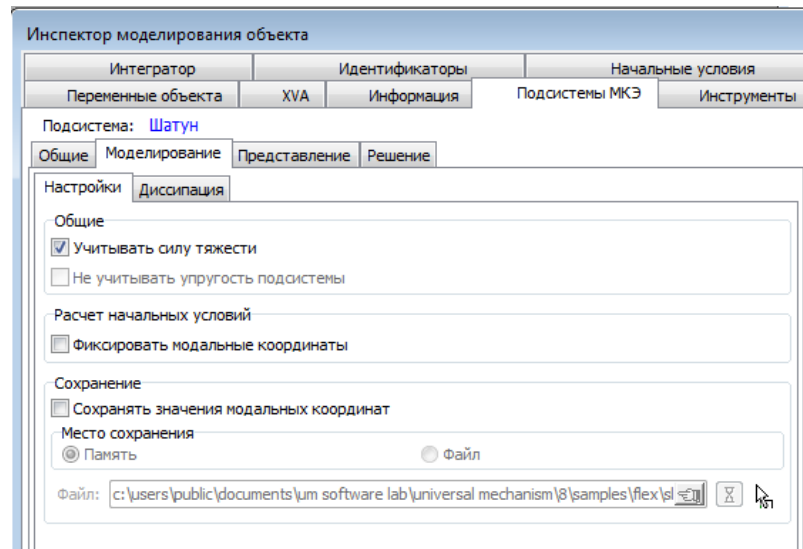


Рис. 1.23.

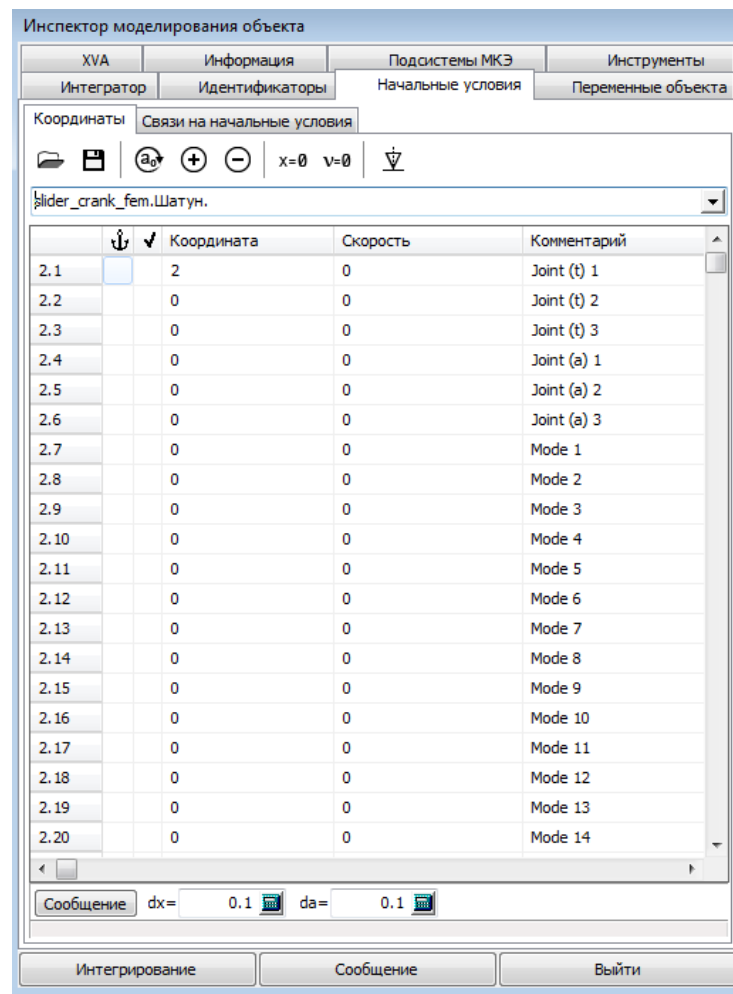
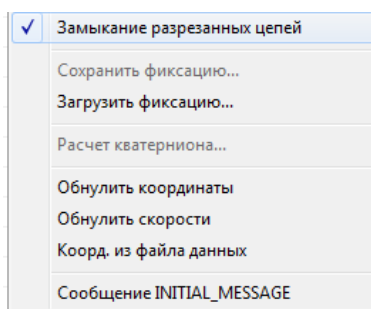



Рис. 1.24.

Замечание. Если вид формы инспектора после выбора шатуна в списке тел не соответствует рис. 1.24 выполните установки вручную.

- Убедитесь в том, что включен режим замыкания разрезанных цепей –(вызов контекстного меню правой кнопкой мыши).



В противном случае включите указанный режим. Выполните расчет начальных условий с помощью кнопки .

- В **Инспекторе моделирования объекта** на вкладке **Подсистемы МКЭ | Представление** включите флажок **Рисовать узлы** и установите параметр **Размер точки-изображения узла = 7** (рис. 1.25).
- В **Анимационном окне** нажмите **Полутоновое с каркасом**. Изображение механизма после расчета показано на рис. 1.26.

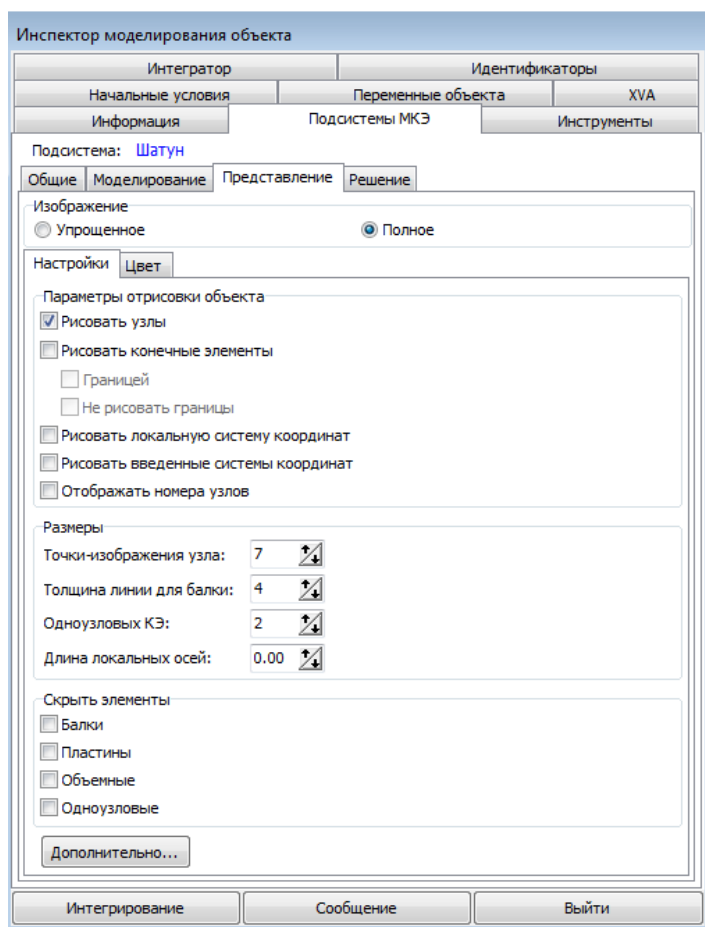


Рис. 1.25.

- Откройте новое графическое окно (меню **Инструменты | Графическое окно...**).

- Откройте новый **Мастер переменных** (меню **Инструменты** | **Мастер переменных...**) и создайте переменные для определения модуля сил реакций в шарнирах **Кривошип_Шатун** и **Шатун_Ползун**, см. рис. 1.27. Созданные переменные перенесите мышкой в графическое окно.

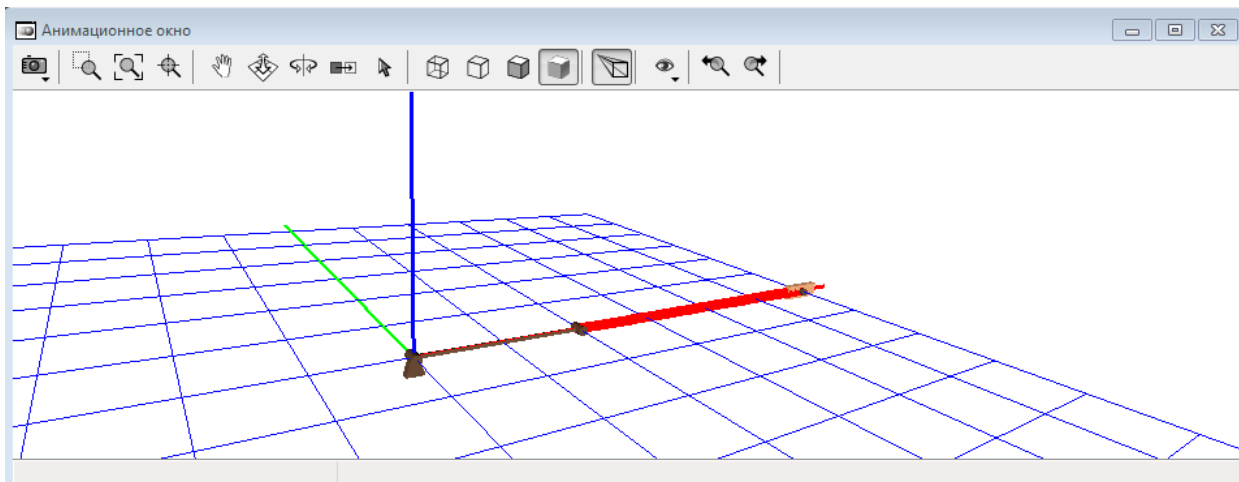


Рис. 1.26.

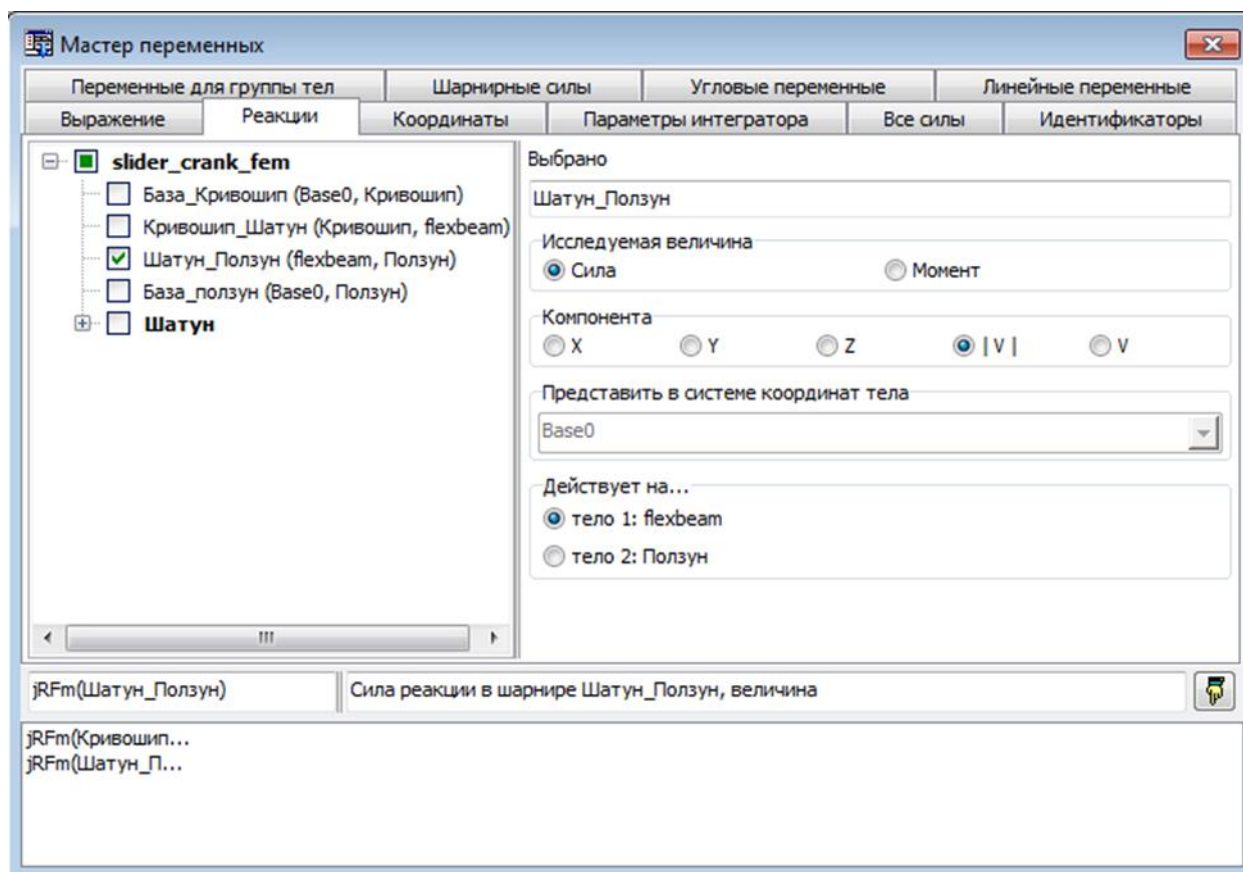


Рис. 1.27.

- В **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на вкладку **Интегратор** и установите следующие параметры, см. рис. 1.28:
 - Численный метод = **Метод Парка**.

- Тип решения = **Прямой метод (RSM)**.
- Время моделирования = **2.0**.
- Шаг представления результатов = **0.005**.
- Погрешность = **1E-7**.
- Флажок **Расчет матриц Якоби** включен.
- Флажок **Блочно-диагональные матрицы** выключен.

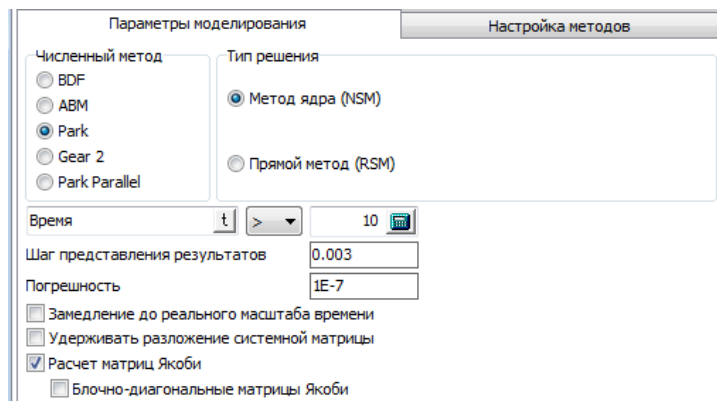


Рис. 1.28.

13. Перейдите на вкладку **Подсистемы МКЭ | Моделирование | Настройки**. Флажок **учитывать силу тяжести** должен быть включен. Перейдите на вкладку **Диссипация**, включите флажок **учитывать внутреннюю диссипацию** (моделирование с учетом внутренней диссипации). Выберите способ задания параметров внутренней диссипации **линейная матрица диссипации**, задайте коэффициент **a=0.003**, **b=0** (рис. 1.29).

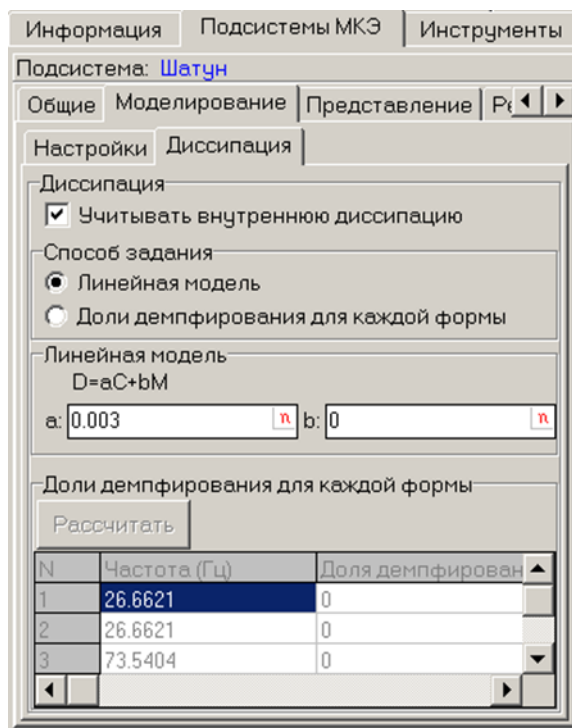


Рис. 1.29.

14. Запустите процесс интегрирования уравнений движения (кнопка **Интегрирование**). На рис. 1.30. представлено изображение кривошипно-ползунного механизма в анимационном окне в некоторый момент времени.

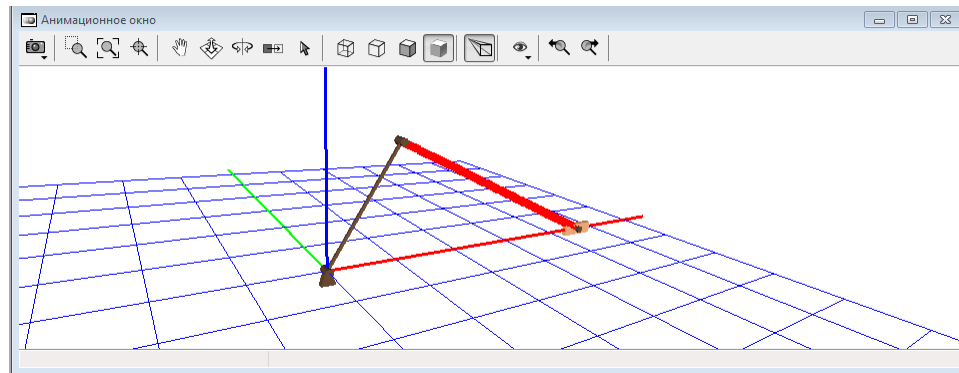


Рис. 1.30. Изображение кривошипно-ползунного механизма в процессе интегрирования уравнений движения

Графики модулей сил реакций изображены на рис. 1.31.

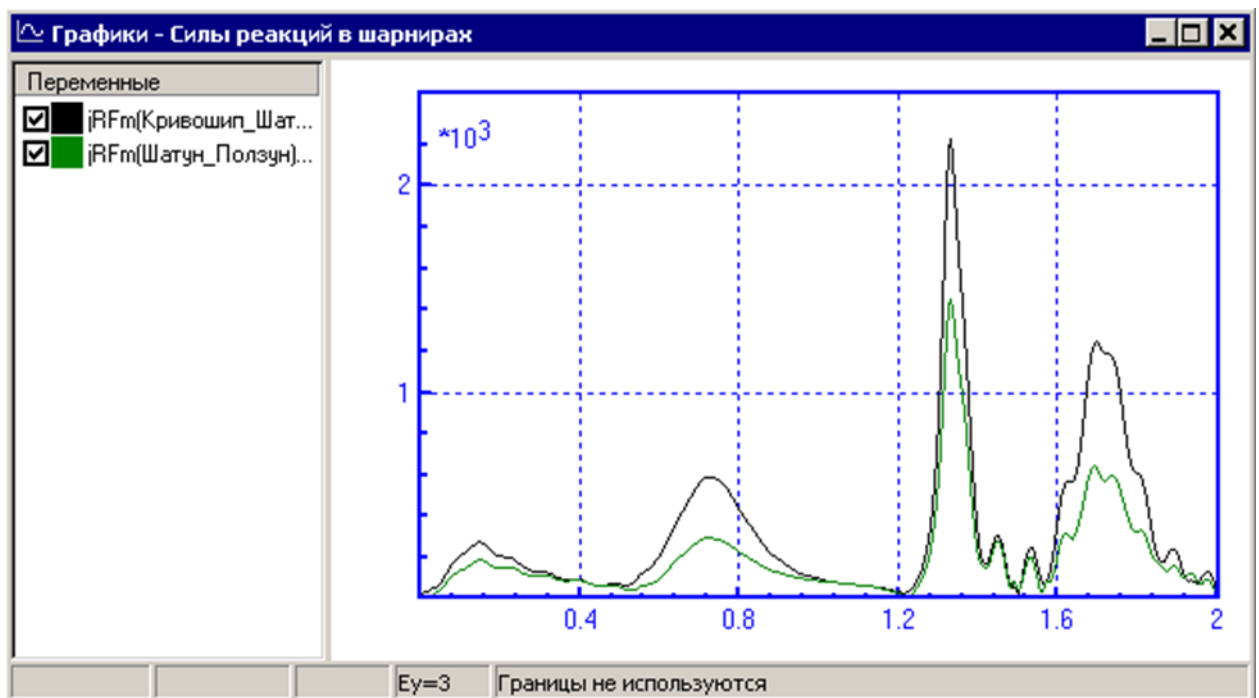


Рис. 1.31.

Для оценки влияния упругости шатуна на расчет сил реакций рассмотрите модель [{Данные UM}\SAMPLES\Flex\Slider crank all](#). Пример графиков, построенных с использованием этой модели, представлен на рис. 1.32.

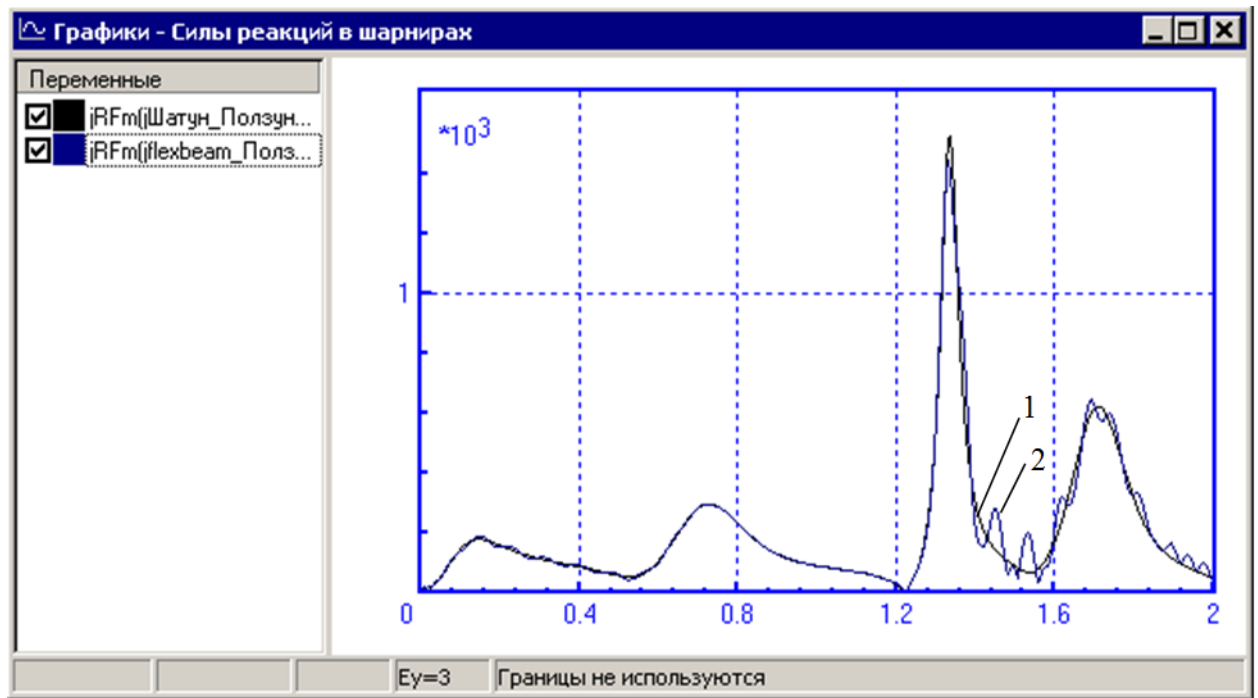


Рис. 1.32. Модуль сил реакция в шарнире шатун-ползун: 1 – шатун – абсолютно твердое тело, 2 – упругий шатун.

Файл конфигурации **example.icf**, расположенный в каталоге задачи **Slider_crank_all**, содержит переменные для расчета сил реакций в других шарнирах модели, а также переменные для расчета угловых скоростей кривошипов.

2. Электродвигатель на упругой платформе

Рассмотрим анализ динамики вибростенда, состоящего из электродвигателя, установленного на упругой платформе. Модель объекта представлена на рис. 2.1.

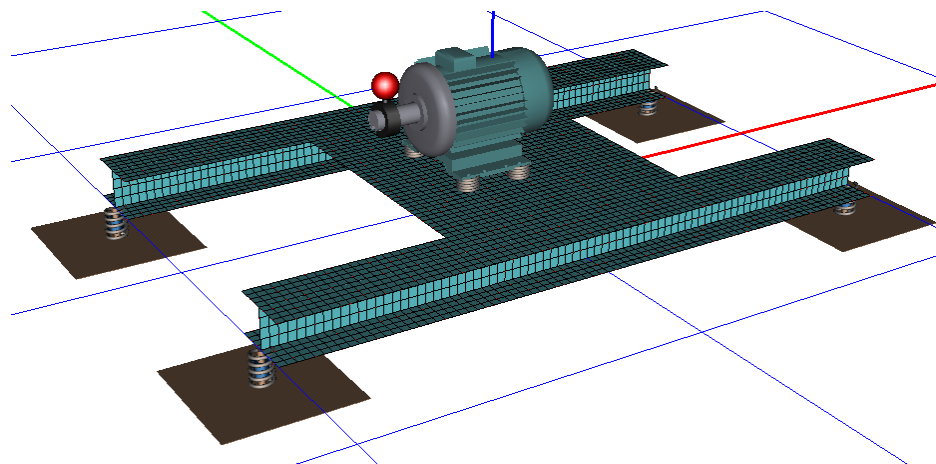


Рис. 2.1.

Она включает упругую платформу, которая крепится к базе посредством четырех упруго-диссипативных линейных силовых элементов. На платформе установлен электродвигатель. В составе модели объекта он представлен включенной подсистемой, состоящей из абсолютно твердых тел. Электродвигатель крепится на платформе аналогично креплению платформы к базе. На валу электродвигателя установлен дебаланс. Рассмотрим особенности создания модели и расчет следующих динамических характеристик во время работы электродвигателя.

- Вертикальные компоненты сил, возникающих в силовых элементах.
- Вертикальные перемещения и ускорения в точке платформы под электродвигателем.
- Напряжения...

Будем моделировать следующие режимы вращения ротора электродвигателя:

- разбег из состояния покоя до рабочей частоты вращения ротора;
- рабочий режим;
- выбег – снижение частоты вращения ротора до полной остановки после выключения электродвигателя.

Подготовка данных модели включает следующие основные этапы.

- Подготовка данных упругой платформы.
- Добавление в модель упругой платформы как линейной подсистемы МКЭ.
- Крепление упругой платформы к базе, посредством линейных силовых элементов.
- Создание модели электродвигателя.
- Добавление в модель электродвигателя как внешней подсистемы.
- Крепление электродвигателя на платформе посредством силовых элементов.

Рассмотрим последовательно каждый из перечисленных этапов. При этом основное внимание будет уделено особенностям создания модели, отличающим процесс от описанного выше создания кривошипно-ползунного механизма.

Выберите каталог для хранения создаваемого объекта. В пределах настоящего пункта будем обозначать его «.\». В данном каталоге создайте два подкаталога:

- **.\Vibrostand**, в котором будут храниться данные составной модели;
- **.\Vibrostand\Platform**, в котором будут храниться данные упругой платформы.

2.1. Подготовка данных упругой платформы

В программе **УМ** каждому упругому телу соответствует **Линейная подсистема МКЭ**. Стандартным файлом данных упругой подсистемы является бинарный файл **input.fss**.

Подготовка данных упругой платформы включает следующие этапы:

1. Описание платформы методом конечных элементов в программе **ANSYS**;
2. Расчет упругих форм платформы, запись данных в формате **УМ**.
Возможны два способа реализации второго этапа:
3. Непосредственное создание файла **input.fss** программой **ANSYS_UM.exe**, которая выполняется после проведения расчетов в программе **ANSYS**.
4. Создание промежуточного файла **input.fum** программой **ANSYS_UM.exe** и последующее преобразование данных **Мастером подготовки данных упругих подсистем**, который является составной частью программы **UM Input**. Он предоставляет возможности просмотра рассчитанных упругих форм подсистемы, а также исключения части форм из результирующего набора данных, сохраняемых в файле **input.fss**.

В каталоге [{Данные УМ}\SAMPLES\Flex\vibrostand\platform](#) расположены файлы **input.fss**, **input.fum** и **PlatformShell63Demo.ans**, которые нужно использовать в зависимости от полноты изучения данного руководства. Если на компьютере пользователя отсутствует программа **ANSYS**, либо процесс подготовки данных был освоен ранее на предыдущем примере, изучение некоторых или всех этапов создания файла **input.fss** для упругой платформы можно пропустить.

- Если пользователь желает пропустить все этапы подготовки данных упругой платформы, нужно скопировать файл [{Данные УМ}\SAMPLES\Flex\vibrostand\platform\input.fss](#) в каталог **.\platform** и перейти к изучению п. 2.2 настоящего руководства.
- Если пользователь решил пропустить этап работы в **ANSYS**, но желает ознакомиться с **Мастером подготовки данных упругих подсистем**, нужно скопировать файл **input.fum** из каталога [{Данные УМ}\SAMPLES\Flex\vibrostand\platform](#) в каталог **.\platform** и перейти к изучению п. 2.1.4 настоящего руководства.

2.1.1. Работа в среде ANSYS и преобразование данных

Для организации обмена данными с программой **ANSYS** выполните инструкции п. 1.1. Подготовим данные упругой платформы.

1. Скопируйте файл **PlatformShell63Demo.ans** из каталога [{Данные УМ}\SAMPLES\Flex\vibrostand\platform](#) в каталог **.\platform**. Данный файл является макросом на языке APDL, автоматизирующим создание модели упругой платформы.
2. Запустите программу **ANSYS Interactive** и выберите каталог **.\platform** в качестве рабочего каталога.
3. Запустите **ANSYS**. Выберите пункт основного меню **File | Read Input from** и укажите файл **PlatformShell63Demo.ans**.

В результате будет создана модель стальной платформы, состоящей из двух балок длиной 1 метр, имеющих двутавровое сечение, и полки, которая эти балки соединяет. Ширина верхней и нижней полок сечений балок 10 см, высота сечений 6 см. Длина и ширина соединяющей полки 40 см. Конечно-элементная модель включает 4224 элемента типа SHELL63, толщина всех элементов – 5 мм. Некоторые параметры модели можно изменять, задавая значения соответствующих переменных, введенных в макросе (см. комментарии в тексте макроса). При создании конечно-элементной схемы предусмотрены узлы в точках крепления силовых элементов, посредством которых устанавливается электромотор. В качестве интерфейсных узлов выбираются 4 узла в точках крепления платформы к базе⁴. Если правильно выполнены настройки среды **ANSYS** (см. п. 1.1), то автоматически будет запущен макрос **um.mac**. После завершения его работы будут рассчитаны 24 статических и 10 собственных форм, соответствующих 10-ти низшим собственным частотам.

4. Если правильно задан путь к программе **ANSYS_UM.exe** внутри макроса (см. п. 1.1), она стартует автоматически, в противном случае запустите ее из каталога **{УМ}\bin**.
5. Выполните преобразование данных с помощью программы **ANSYS_UM.exe** аналогично этапам 5-8, описанным в п. 1.2.1 для упругого шатуна.

⁴ определение понятия и описание назначения интерфейсных узлов приводятся в [Главе 11](#) руководства пользователя UM (11_UM_FEM.pdf).

2.1.2. Работа в среде ANSYS Workbench и преобразование данных

Создание КЭ модели платформы для вибростенда в классической программе ANSYS (Mechanical APDL) происходит путем запуска макроса **PlatformShell63Demo.ans**, написанного на языке APDL. В среде Workbench выполнение такого макроса напрямую невозможно, поэтому для создания модели платформы в ANSYS Workbench предлагается такой порядок действий.

Создать модель в ANSYS Mechanical APDL (см. п. Работа в среде ANSYS и преобразование данных). Перед запуском макроса PlatformShell63Demo.ans следует удалить из него команды, предназначенные для подготовки к импорту в ПК УМ:

```
NSEL,s,,,ALL
ESLN,s,0,ALL
CM,ESTRS,ELEM
ESEL,ALL
NSEL,ALL
KSEL,S,,,5
KSEL,A,,,11
KSEL,A,,,105
KSEL,A,,,111
NSLK,S
UM,10,1,1,1
```

Сохранить изменения. Запустить измененный макрос с помощью команд File->Read Input From. Создать файл с архивом Preprocessor->Archive Model->Write. В появившемся окне Write Geometry/Loads for Archiving выбрать вид архивируемой информации и имя файла с архивом (рис. 2.2).

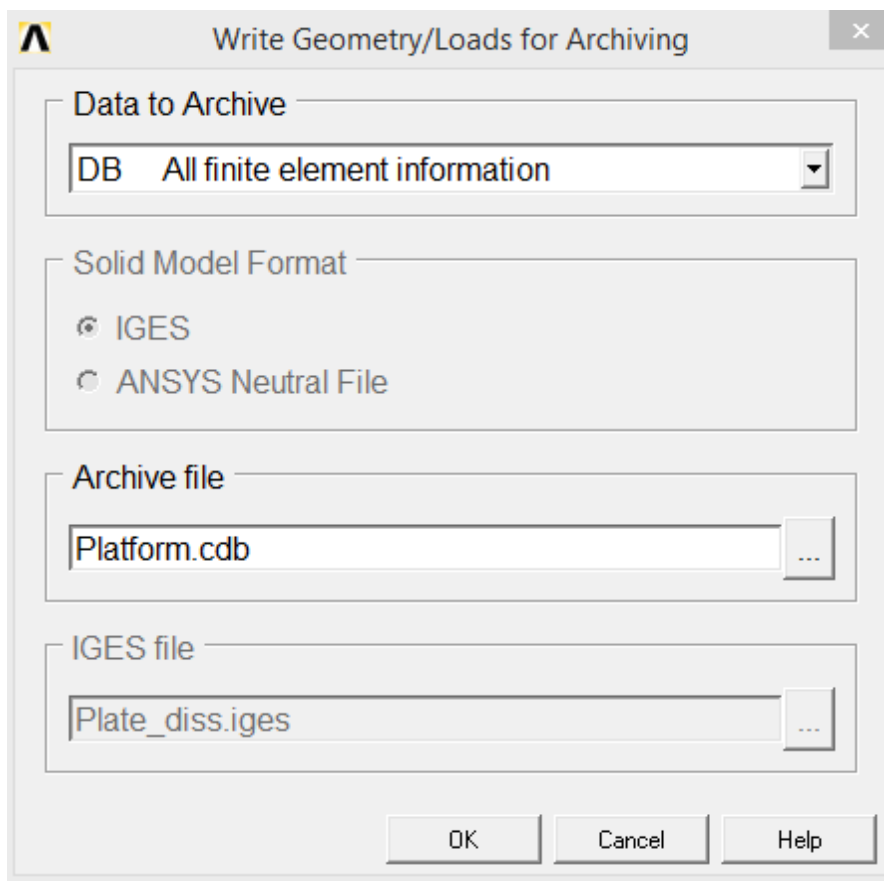


Рис. 2.2. Создание архива модели платформы

В среде ANSYS Workbench на панели задач в разделе Component Systems выбрать Finite Element Modeler, дважды щелкнув на него мышью.

В окне схемы проекта появится пустой объект в Finite Element Modeler. Правой кнопкой щелкнуть поле Model->Add Input Mesh->Browse. Выбрать созданный в предыдущем пункте файл с расширением .cdb (рис. 2.3).

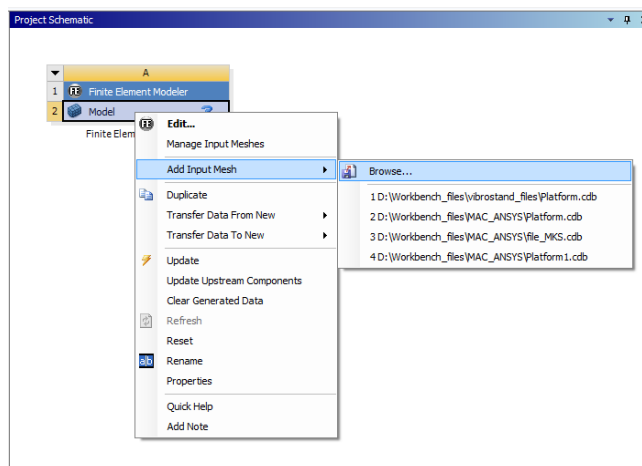


Рис. 2.3.

Обновить модель, для этого снова правой кнопкой щелкнуть поле Model, в выпадающем списке выбрать Update.

Выбрать мышью поле **Model** схемы проекта, в активированном при этом плане проекта в правой части окна выбрать мышью имя импортируемого файла (**Platform.cdb**) затем в поле свойств **Unit System** выбрать систему **SI** (рис. 2.4).

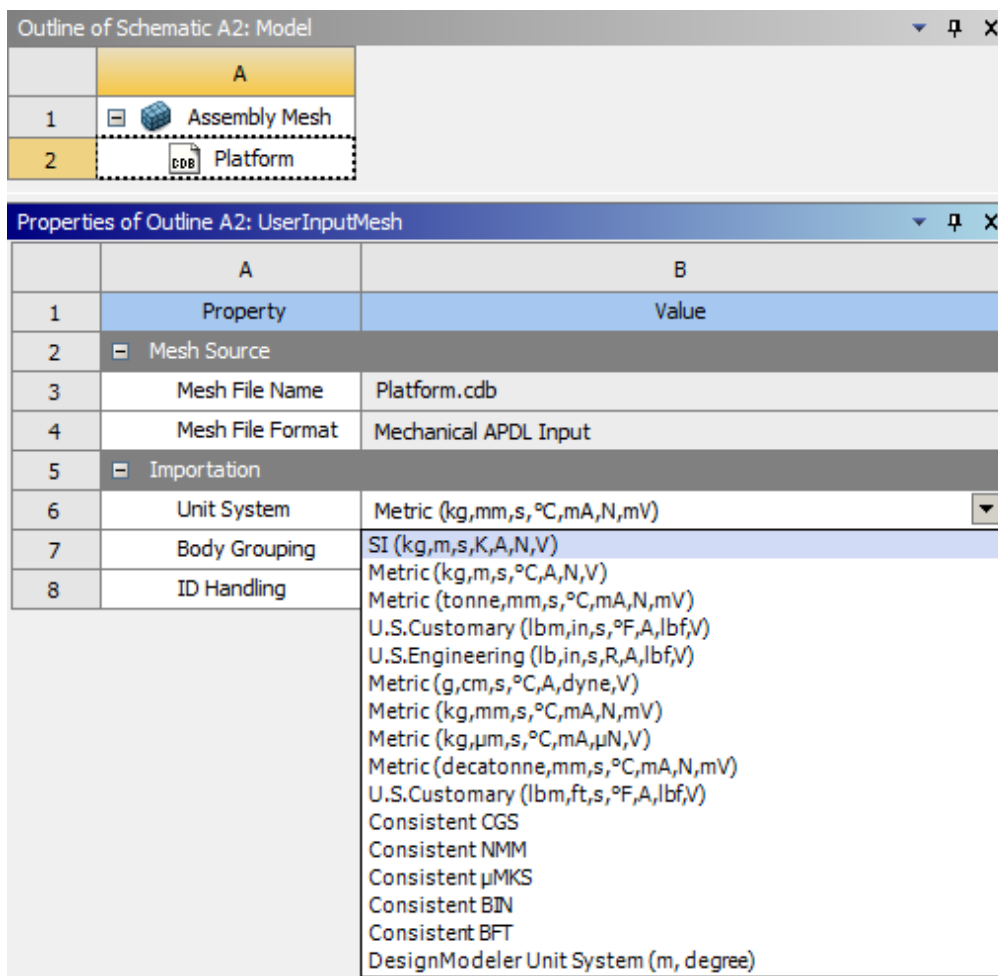


Рис. 2.4. Выбор системы СИ

Создать проект модального анализа двойным щелчком мыши на компоненте **Modal** в панели задач (рис. 2.5).

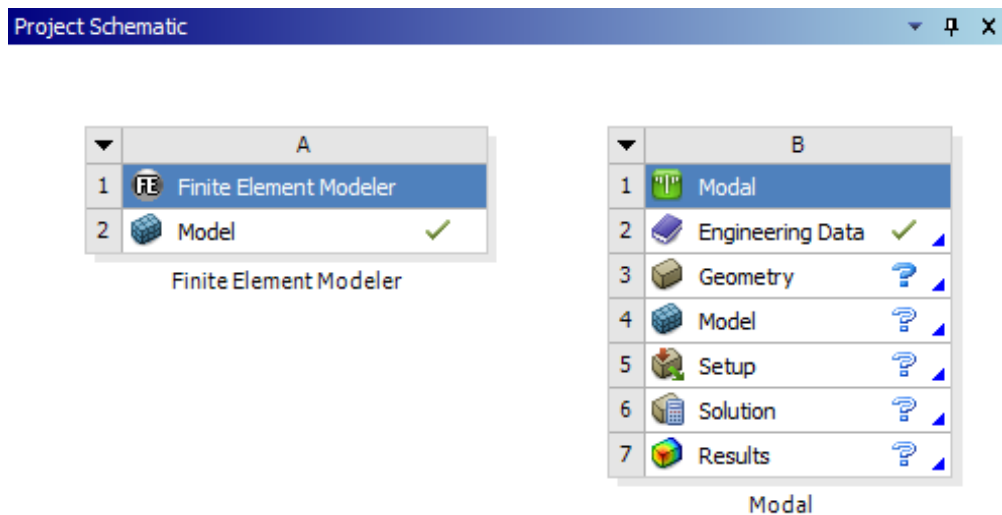


Рис. 2.5.

Перетащить мышью поле **Model** проекта в **Finite Element Modeler** на поле **Model** проекта модального анализа, созданного в предыдущем пункте (рис. 2.6).

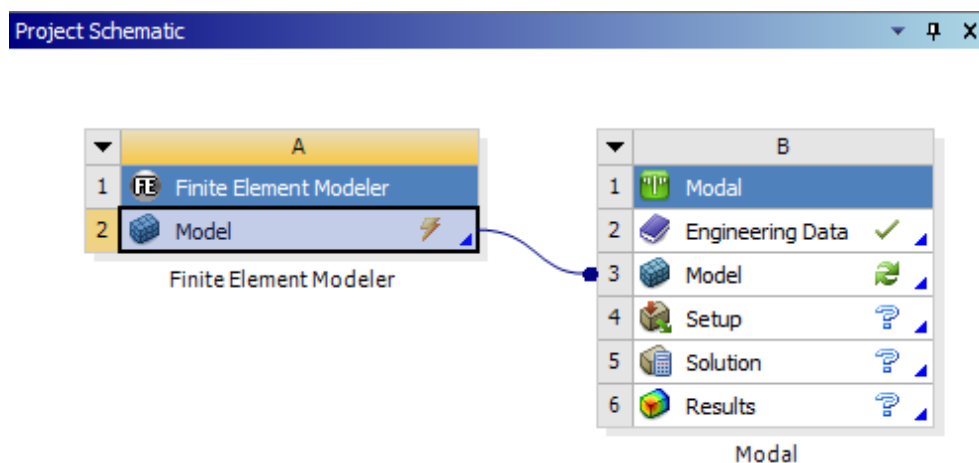
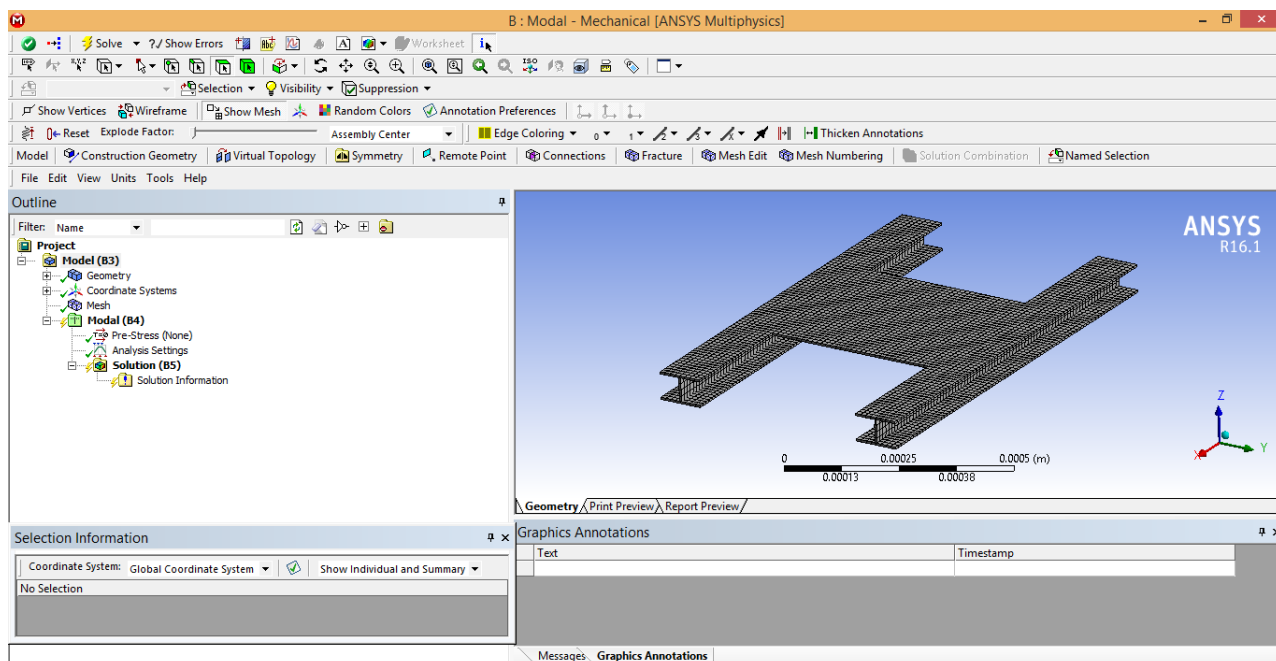


Рис. 2.6.

Обновить модель в проекте модального анализа. Для этого правой кнопкой мыши поле нажать на поле **Model** и в выпадающем списке выбрать **Update**.

Сохранить проект **File->Save**.

Открыть модель проекта **Modal** двойным щелчком мыши по полю **Model**. При этом запустится модуль **Mechanical** (рис. 2.7).

Рис. 2.7. Окно модуля **Mechanical** с моделью платформы

Добавить поле **Commands** в дерево проекта **Modal->Insert->Commands**. Задать команды на языке **APDL**. Для загруженной модели рекомендуется использовать следующие команды:

```

NSEL,s,,,ALL
ESLN,s,0,ALL
CM,ESTRS,ELEM
ESEL,ALL
NSEL,ALL
NSEL,s,,,2435
NSEL,A,,,730
NSEL,A,,,2659
NSEL,A,,,958
UM,10,1,1,1

```

В этих командах 2435, 730, 2659, 958 – номера интерфейсных узлов, расположенных в точках с номерами 5,11,105 и 111, положение которых задается в файле PlatformShell63Demo.ans. В случае изменения параметров КЭ разбивки платформы номера интерфейсных узлов могут быть другими.

Подробнее о командах языка APDL, используемых при подготовке моделей, изложена в файле **11_UM_FEM.pdf**, который вы можете найти в каталоге **{Данные УМ}\MANUAL** или скачать по адресу: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/11_um_fem.pdf.

Запустить процесс решения **Solution->Solve**. В результате в папке рабочего проекта **PROJECT_NAME\dp0\SYS\MECH** будут располагаться файлы решения **.rst**, **.free**.

Запустить **ANSYS_UM.exe**, выбрать файл с расширением **.rst**, создать файл **input.fum**.

2.1.3. Подготовка данных упругой платформы в ПК FIDESYS

В программе УМ каждому упругому телу соответствует **Линейная подсистема МКЭ**. Файлом данных упругой подсистемы является бинарный файл **input.fss**. Подготовка данных упругой платформы включает несколько описанных ниже этапов: описание платформы методом конечных элементов в программе **FIDESYS** и создание файлов для импорта в ПК УМ; создание промежуточного файла **input.fum** программой **FIDESYS_UM.exe** и последующее преобразование данных **Мастером подготовки данных упругих подсистем**, который является составной частью программы **UM Input**. Он предоставляет возможности просмотра рассчитанных упругих форм подсистемы, а также исключения части форм из результирующего набора данных, сохраняемых в файле **input.fss**.

КЭ модель, подготовленная в **ПК FIDESYS**, хранится в файле с расширением **.fds**. Данные о КЭ модели, подготовленные программой **FIDESYS** для импорта в ПК УМ, содержатся в файлах **geometry.vtk** (содержит данные о геометрии объекта, КЭ сетке), **res.cbm** (собственные и статические формы), **M_CCS.hb** (матрица масс), **K_CCS.hb** (матрица жесткости).

В каталоге [{Данные УМ}\SAMPLES\Flex\vibrostand\platform](#) расположены файлы **geometry.vtk**, **res.cbm**, **M_CCS.hb**, **K_CCS.hb**, предназначенные для импорта данных в **ПК УМ**, и файл **platform.fds**, содержащий всю информацию о КЭ модели платформы в **ПК FIDESYS**, которые нужно использовать в зависимости от полноты изучения данного руководства.

Если пользователь хочет пропустить этапы разработки и подготовки КЭ модели в **ПК FIDESYS**, можно воспользоваться готовыми файлами **geometry.vtk**, **res.cbm**, **M_CCS.hb**, **K_CCS.hb** и перейти к пункту 2.1.3.4.

Этапы создания КЭ модели в графической среде **ПК FIDESYS** представлены в 2.1.3.1, способ создания этой КЭ модели на основе команд **ПК FIDESYS** показан в 2.1.3.2.

Если пользователь хочет пропустить этапы создания КЭ модели в **ПК FIDESYS**, можно воспользоваться готовым файлом **platform.fds**, который содержит информацию о КЭ модели и интерфейсных узлах. В этом случае можно сразу перейти к 2.1.3.3.

2.1.3.1. Работа в графической среде ПК FIDESYS

В программе **FIDESYS** создадим модель стальной платформы, состоящей из двух балок длиной 1 м, имеющих двутавровое сечение, и полки, которая эти балки соединяет. Ширина верхней и нижней полок сечений балок 10 см, высота сечений 6 см. Длина и ширина соединяющей полки 40 см.

Геометрию модели создадим на основе пластин. Существует несколько вариантов создания плоскостей в программе **FIDESYS**, подробнее можно ознакомиться в руководстве пользователя на сайте программы⁵. В данном руководстве рассмотрен один из способов - создание плоскости на основе вершин. Выберем на панели команд **Режим - Геометрия**, **Объект - Вершина**, в выпадающем списке устанавливаем **Координаты**, вводим координаты x, y, z четырех вершин будущей поверхности ([-0.5;-0.3;0.06], [-0.5;-0.25;0.06], [0.5;-0.25;0.06], [0.5;-0.3;0.06]), нажимаем **Применить** (Рис. 2.8).

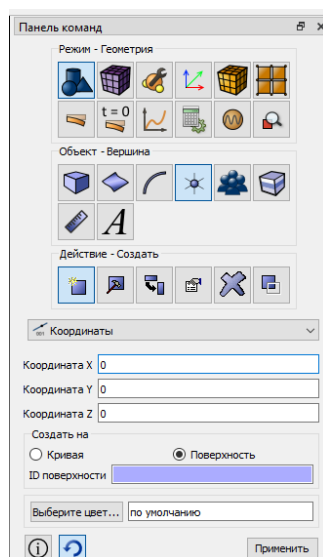


Рис. 2.8

В результате в анимационном окне появятся 4 точки. Затем выбираем **Объект - Поверхность**, **Действие - Создать**, в выпадающем списке - **Список вершин**, вводим 4 вершины, нажимаем **Применить** (Рис. 2.9). В итоге создана первая поверхность.

⁵ <https://cae-fidesys.com/documentation/>

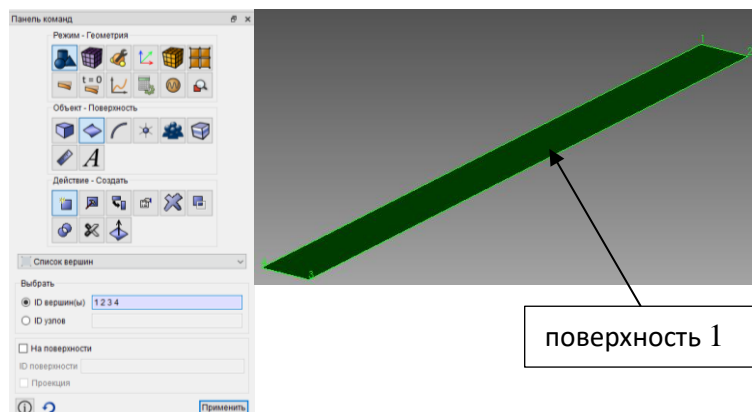


Рис. 2.9

Введя координаты еще двух вершин $[-0.5;-0.25;0]$ и $[0.5;-0.25;0]$, создадим поверхность 2 (Рис. 2.10).

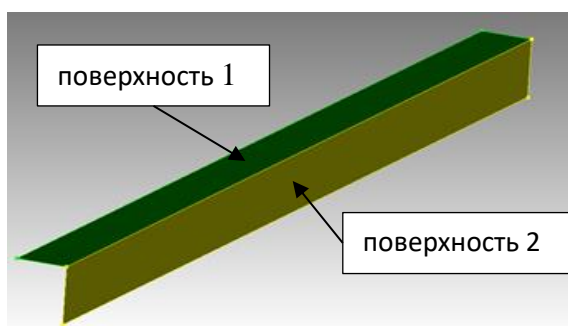


Рис. 2.10

Описанным выше способом можно создать все поверхности модели, также для упрощения работы можно использовать копирование, поворот и перемещение уже созданной поверхности (Рис. 2.11). Создадим поверхность 3 путем копирования с перемещением вдоль оси Z на -0.06 м поверхности 1 (**Режим - Геометрия, Объект - Поверхность, Действие - Создать, Копировать и изменить, Переместить**, в поле координаты z указываем $z = -0.06$), и поверхность 4 путем копирования с поворотом вокруг кривой 2 на 180 градусов поверхности 1, поверхность 5 путем копирования с перемещением поверхности 4 (Рис. 2.12).

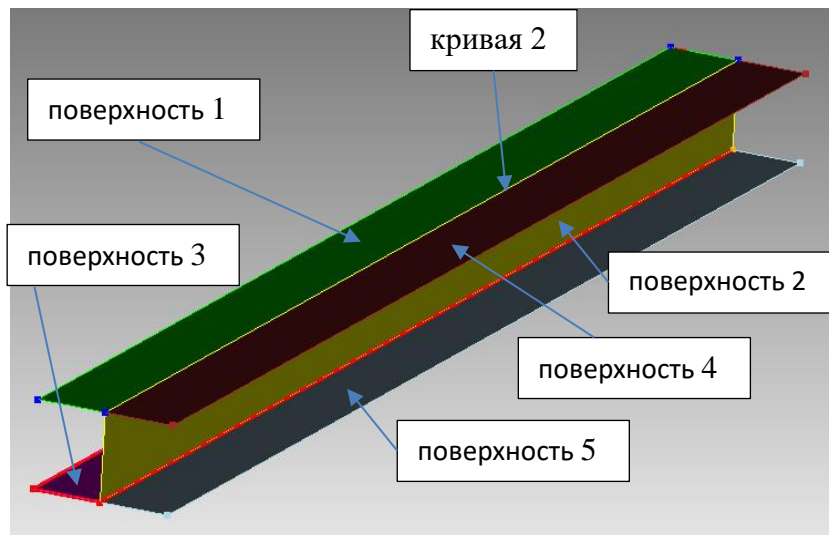


Рис. 2.11

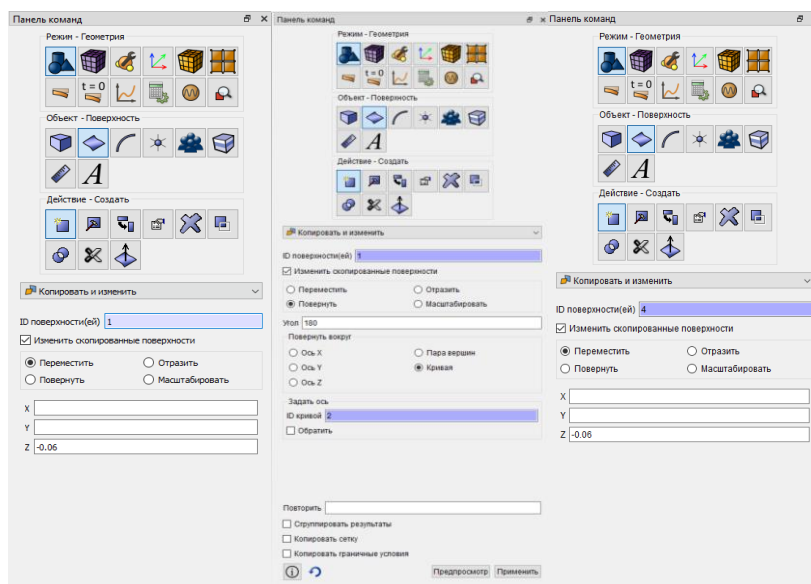


Рис. 2.12. Создание поверхности путем копирования и перемещения

На данном этапе получена одна из двух балок двутаврового сечения. Создадим вторую балку (Рис. 2.13) путем копирования с перемещением вдоль оси Y на 0.5 м поверхностей 1, 2, 3, 4, 5 первой балки (**Режим - Геометрия, Объект - Поверхность, Действие - Создать, Копировать и изменить, Переместить**, в поле координаты указываем $y = 0.5$).

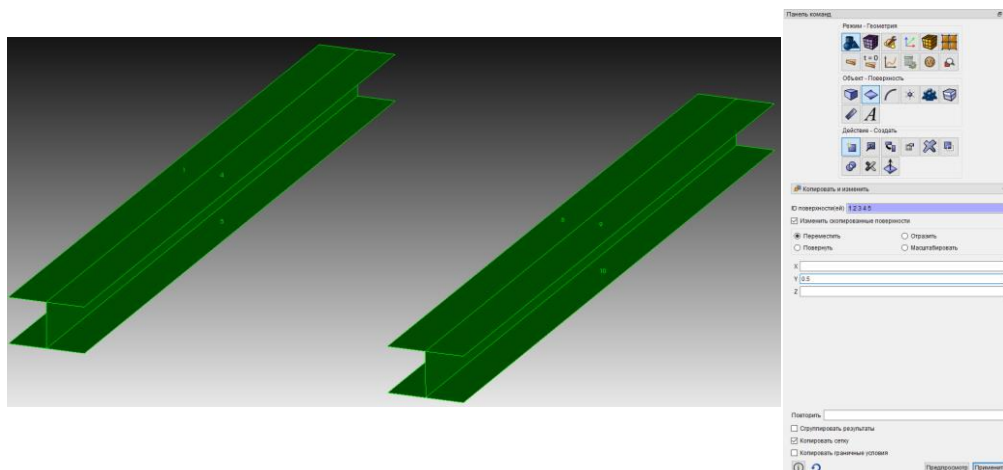


Рис. 2.13

Создадим среднюю поверхность платформы по ее 4 вершинам (аналогично Рис. 2.8). Выбираем **Режим - Геометрия, Объект - Вершина**, в выпадающем списке устанавливаем **Координаты**, вводим координаты x, y, z каждой вершины будущей поверхности $([-0.2;-0.2;0.06], [0.2;-0.2;0.06], [0.2;0.2;0.06], [-0.2;0.2;0.06])$, нажимаем **Применить**. Затем выбираем **Объект - Поверхность, Действие - Создать**, в выпадающем списке - **Список вершин**, вводим 4 созданные вершины (Рис. 2.14).

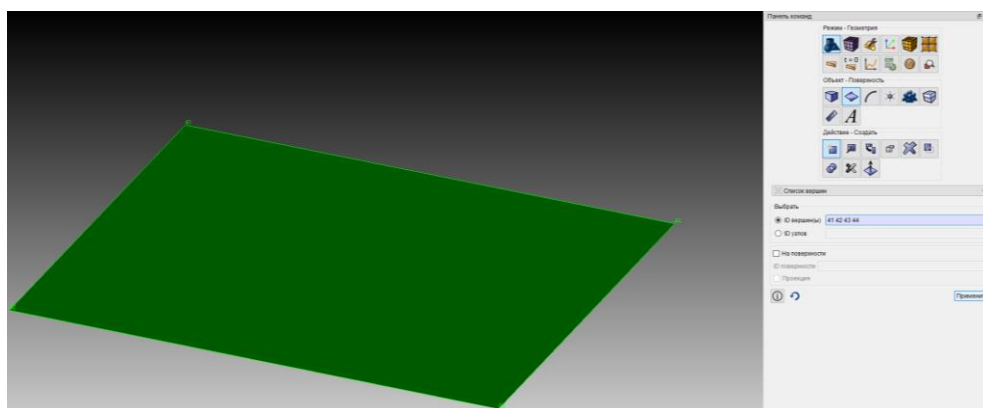


Рис. 2.14

Для получения нужной разбивки объединим несколько поверхностей в одну. Для этого на панели команд выбираем **Режим - Геометрия, Объект - Поверхность, Действие - Логические операции**, выбираем **Объединить** указываем номера средней поверхности платформы (11) и двух прилегающих к ней поверхностей (6 и 4), нажимаем **Применить** (Рис. 2.15).

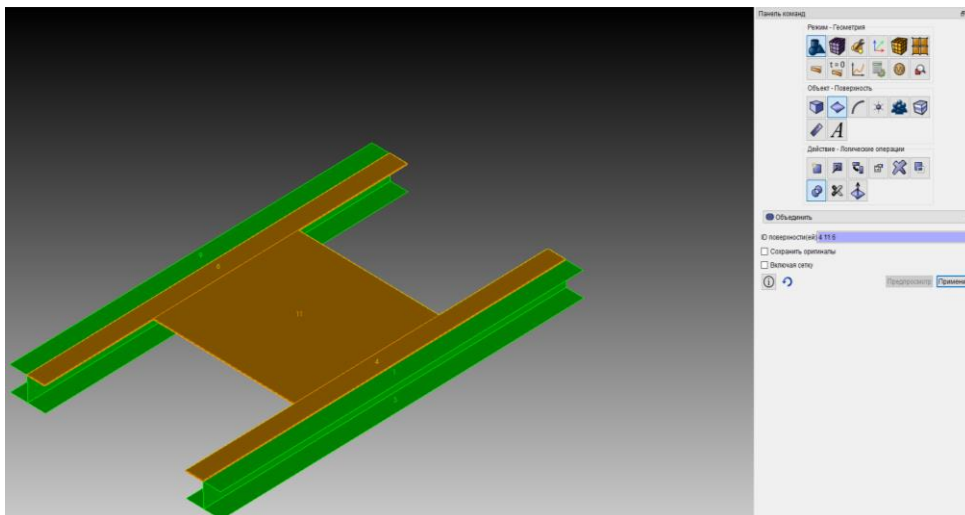


Рис. 2.15

В результате объединения получится поверхность 4 (Рис. 2.16).

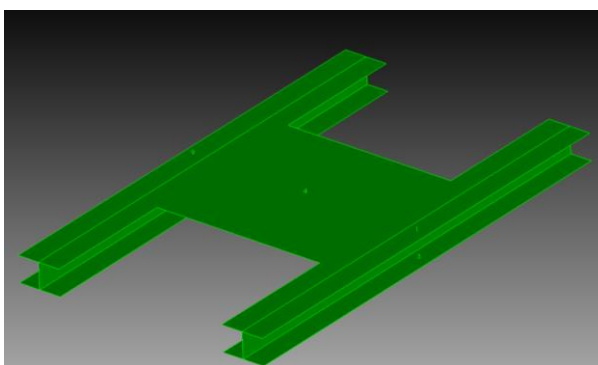


Рис. 2.16

Для исключения из геометрической модели дублируемых кривых, наличие которых вызвано копированием плоскостей, объединим повторяющиеся кривые **Режим - Геометрия, Объект - Кривая, Действие - Срастить**, в поле **ID кривой(ых)** набираем **all**, нажимаем **Применить** (Рис. 2.17). Геометрическая модель готова.

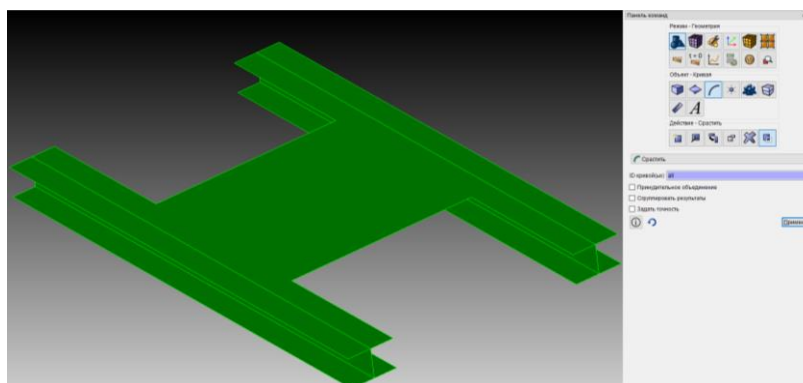


Рис. 2.17

Создадим материал с именем **Steel**. На панели команд выбираем **Режим - Материал**, объект - **Управление материалами**. Зададим ему свойства **Модуль Юнга 2e11 Па**, коэффициент Пуассона 0.3, плотность 7850 кг/м3. Нажимаем **Применить**, в списке материалов должен появиться созданный материал с именем **Steel** (Рис. 2.18).

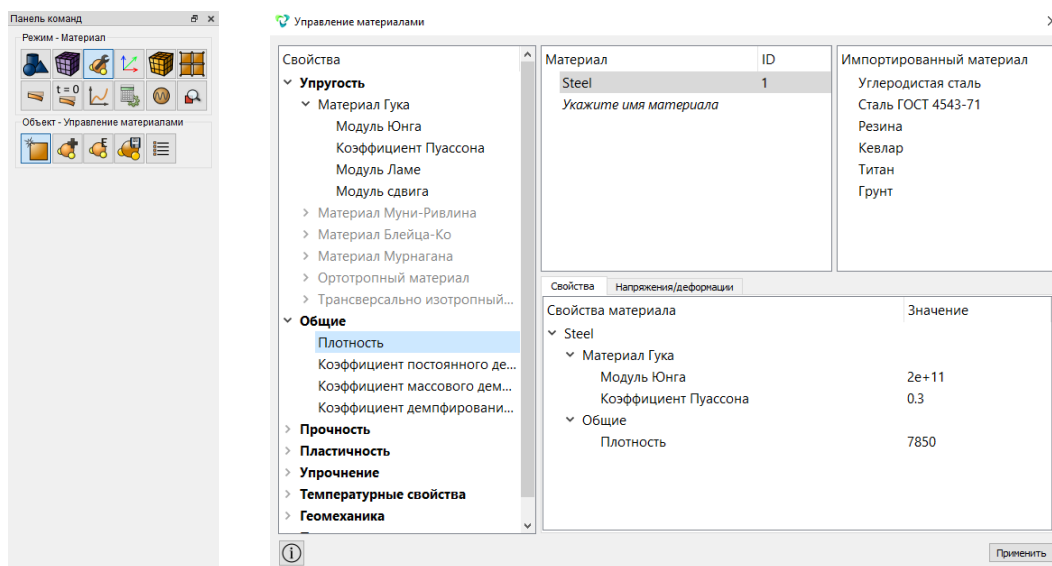


Рис. 2.18

Создание блока с включением в него всех созданных поверхностей. Выбираем **Режим - Блоки**, **Действие - Добавить сущность в блок**, из списка сущностей выбираем **Поверхность**, в поле **ID объекта(ов)** набираем **all** (Рис. 2.19).

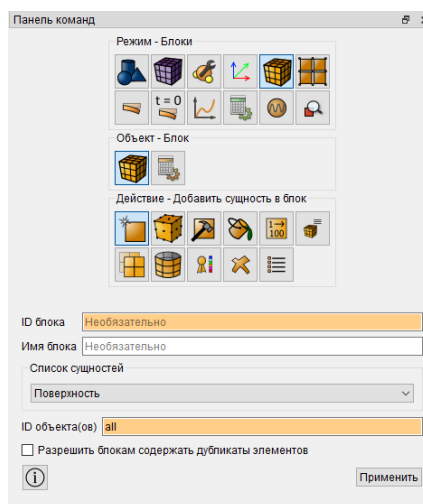


Рис. 2.19

Теперь созданному блоку нужно назначить свойства оболочки (Рис. 2.20). Выбираем **Режим - Блоки**, **Объект - Блок**, **Действия - Свойства/параметры блока**, выбираем созданный блок, **Категорию - Оболочка**, **Порядок 1** нажимаем **Задать свойства оболочки** (Рис. 2.20 слева). В появившемся окне **Задание свойств оболочки** (Рис. 2.20 справа) вводим **Толщину 0.005 м** и выбираем материал **Steel**, нажимаем **Применить**. Затем нажимаем **Применить** в окне задания свойств блока (Рис. 2.20 слева).

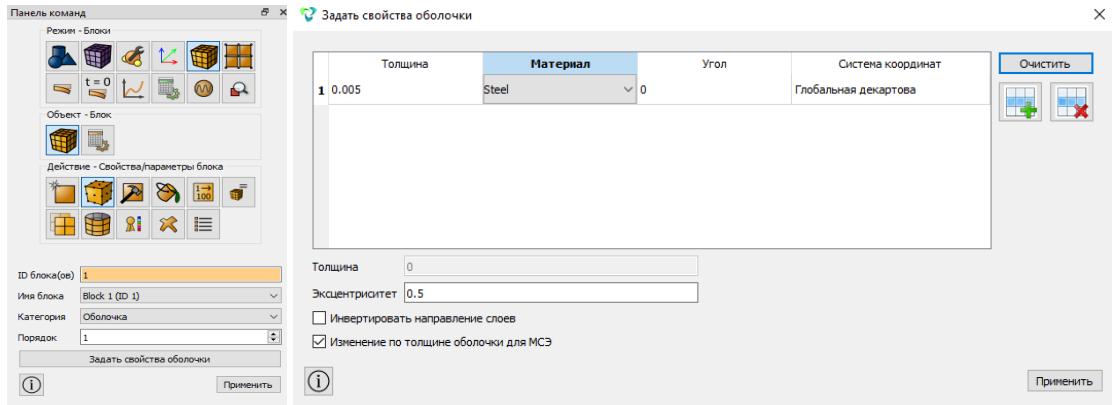


Рис. 2.20

Зададим схему построения сетки. При создании конечно-элементной схемы платформы предусмотрены узлы в точках крепления силовых элементов, посредством которых устанавливается электродвигатель. Для того чтобы получить нужную КЭ сетку, определим размер конечного элемента, указав число элементов для каждой кривой (Рис. 2.21).

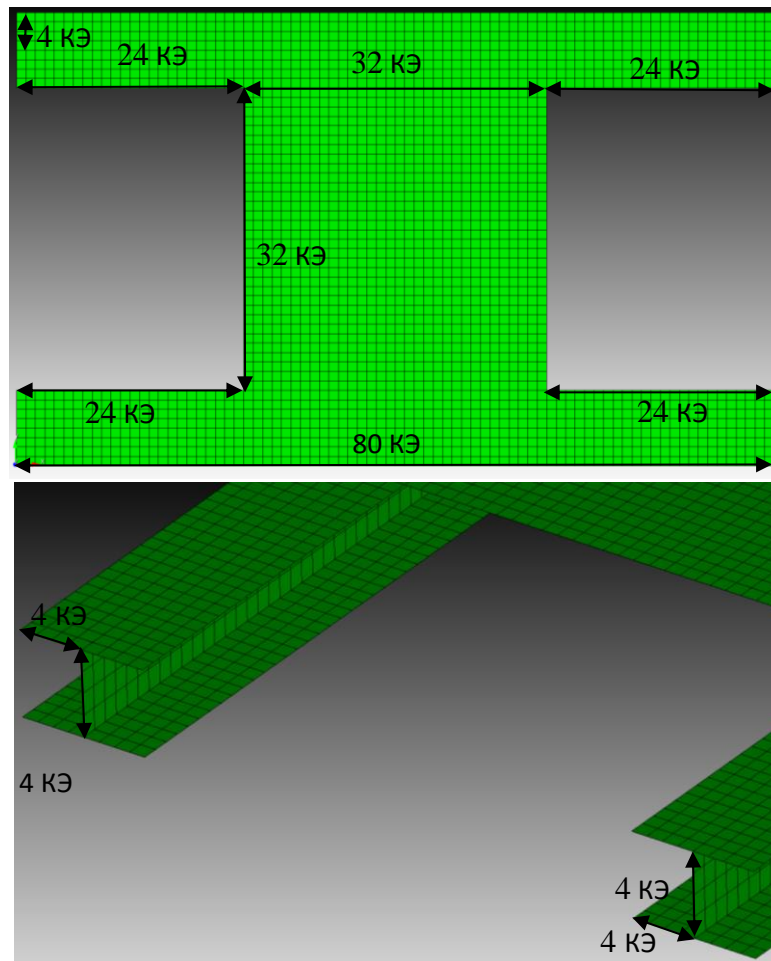


Рис. 2.21

Выбираем **Режим - Сетка**, **Объект - На кривых**, **Действие - Построение сетки**, ставим курсор в поле **Выбор кривых**, далее выбираем нужные кривые в графическом окне, в выпадающем списке выбираем **Равномерно**, устанавливаем **Интервал**, в поле **Интервал** вводим нужное число разбиений (Рис. 2.22 - Рис. 2.25).

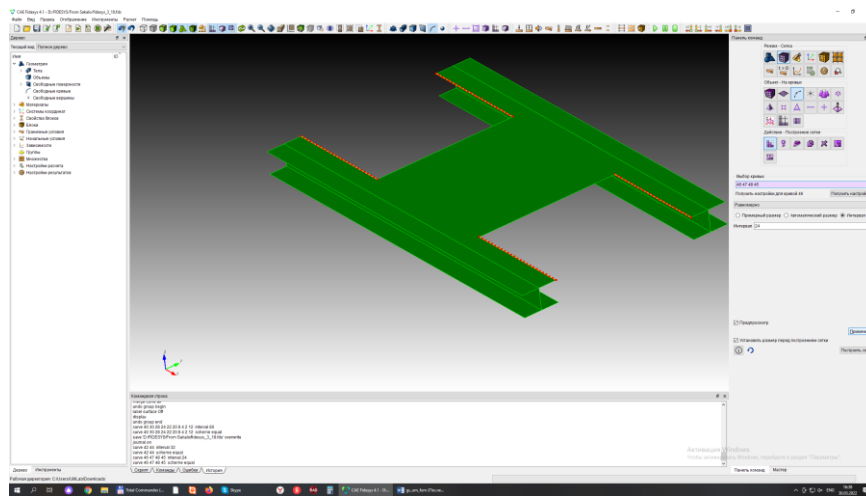


Рис. 2.22

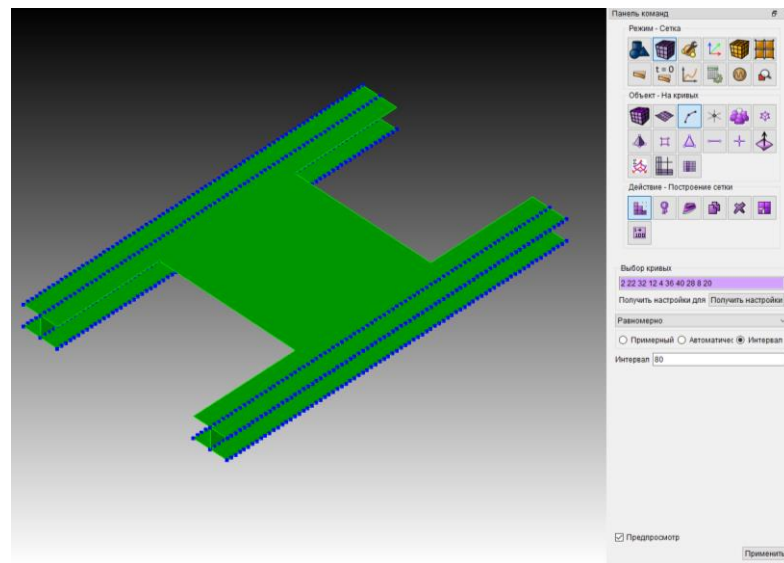


Рис. 2.23

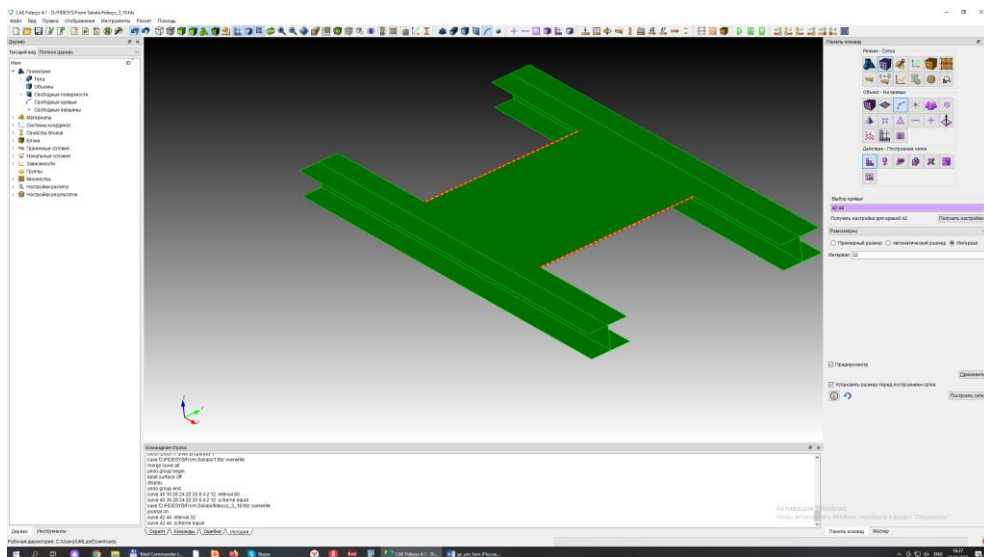


Рис. 2.24

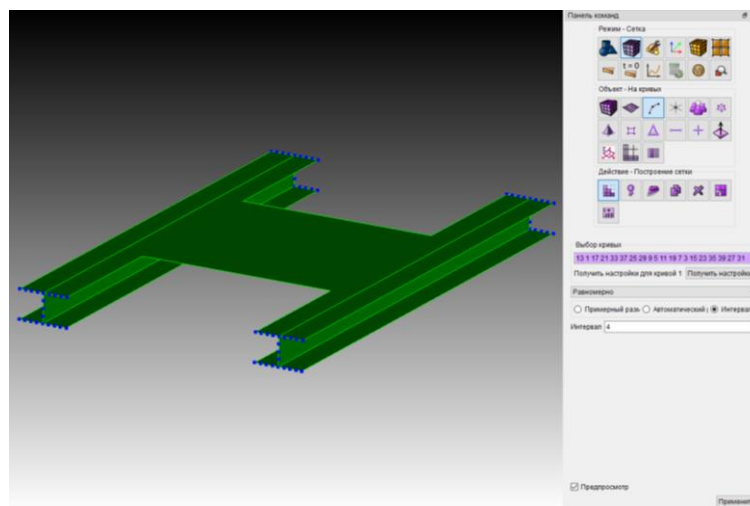


Рис. 2.25

Для создания поверхностной КЭ сетки с заданными размерами, выбираем **Режим - Сетка, Объект - Поверхностная, Действие - Построение сетки**, выбираем для объединенной поверхности **4** метод разбивки **Кусочная карта**, нажимаем **Применить схему, Построить сетку**, для остальных поверхностей (**1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10**) выбираем метод разбивки **Карта**, затем нажимаем **Применить схему, Построить сетку**. (Рис. 2.26).

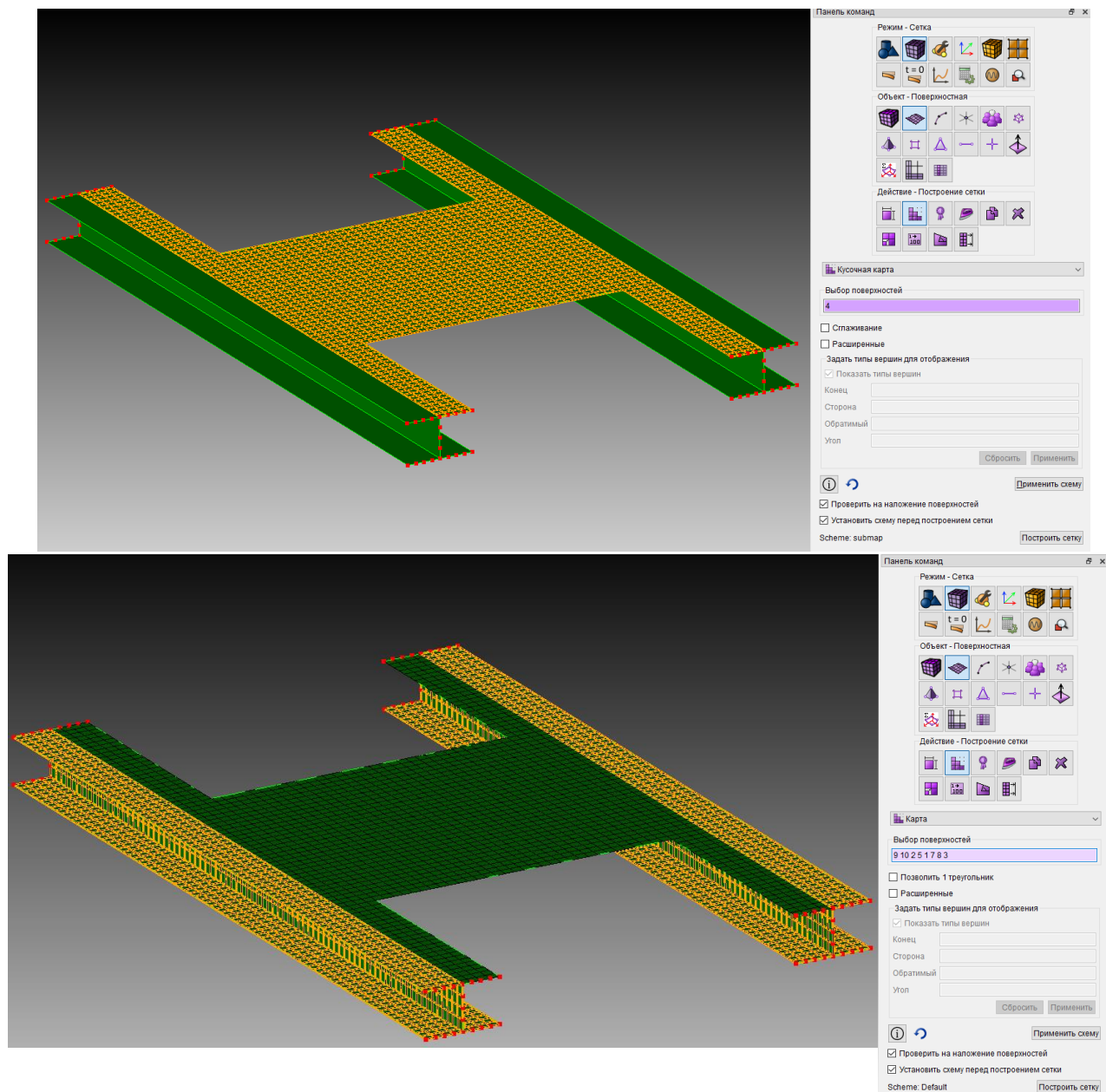


Рис. 2.26

В результате получаем конечно-элементную модель, включающую 4224 элемента типа SHELL, толщина всех элементов – 5 мм.

В качестве интерфейсных узлов выбираются 4 узла в точках крепления платформы к базе. Определение понятия и описание назначения интерфейсных узлов приводятся в [Главе 11](#) руководства пользователя UM (11_UM_FEM.pdf). Создаем набор интерфейсных узлов **Режим - Множества, Объект - Набор узлов, Действие - Управление**, вводим **Имя набора узлов**, выбираем интерфейсные узлы (Рис. 2.27).

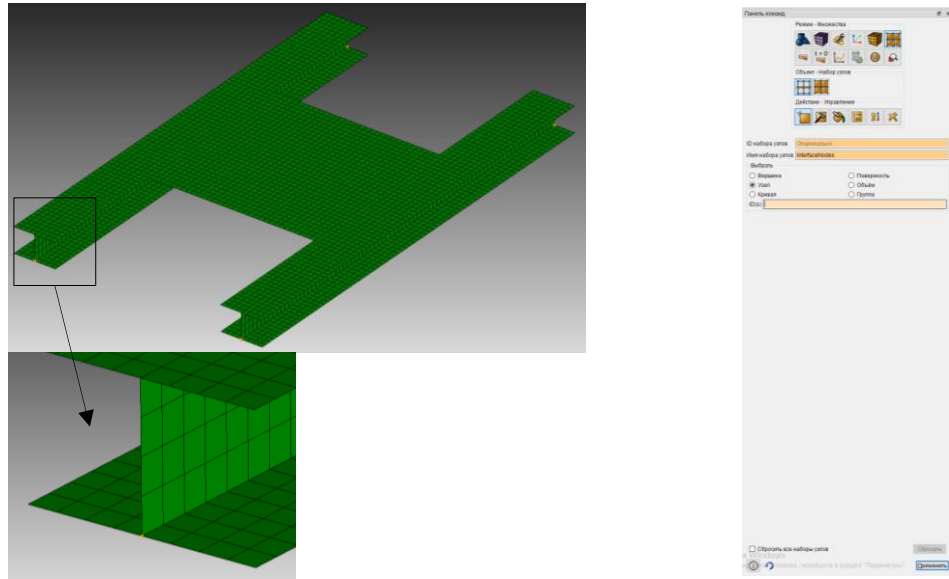


Рис. 2.27

Конечно-элементная модель платформы готова.

2.1.3.2. Работа в ПК FIDESYS с помощью команд командной строки

Управление работой программы FIDESYS осуществляется также с помощью ввода команд в командной строке (Рис. 2.28).

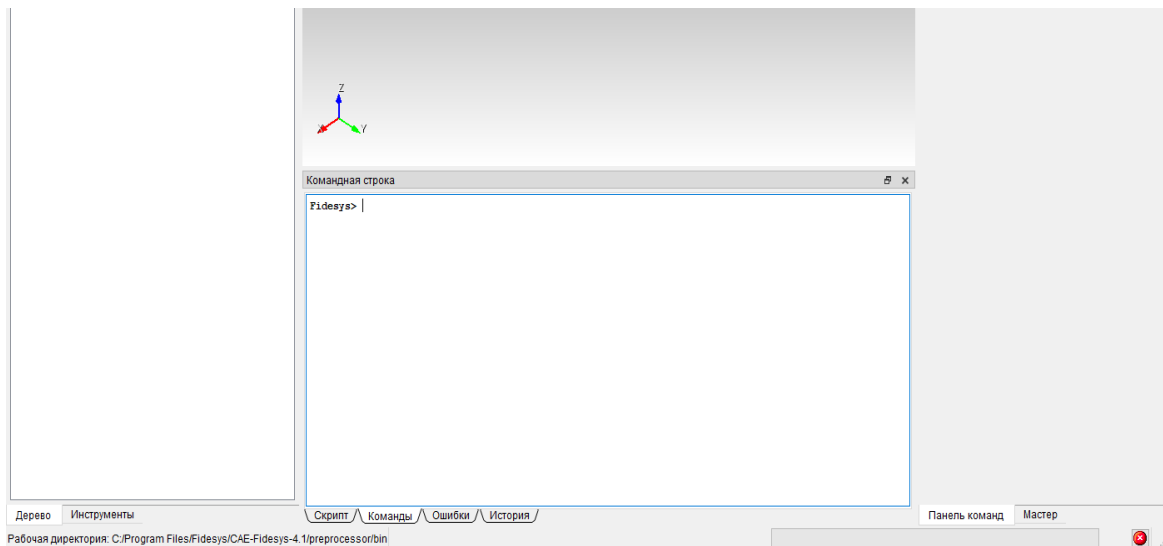


Рис. 2.28

Таким образом, все описанные в 2.1.3.1 действия можно совершить набором команд. Ниже представлен перечень команд, задающих создание конечно-элементной модели платформы с интерфейсными узлами. Если Вы хотите быстро создать модель платформы, скопируйте и вставьте следующие команды в окно командной строки (можно скопировать и вставить сразу все строки).

```
create vertex -0.5 -0.3 0.06
```

```

create vertex -0.5 -0.25 0.06
create vertex 0.5 -0.25 0.06
create vertex 0.5 -0.3 0.06
create surface vertex 1 2 3 4
create vertex -0.5 -0.25 0
create vertex 0.5 -0.25 0
create surface vertex 5 2 3 6
Surface 1 copy move z -0.06
Surface 1 copy rotate 180 about vertex 2 3 nomesh
Surface 4 copy move z -0.06 nomesh
Surface 1 2 3 4 5 copy move y 0.5 nomesh
create vertex -0.2 -0.2 0.06
create vertex 0.2 -0.2 0.06
create vertex 0.2 0.2 0.06
create vertex -0.2 0.2 0.06
create surface vertex 41 42 43 44
unite surface 4 11 6
merge curve all
create material 1
modify material 1 name 'Steel'
modify material 1 set property 'MODULUS' value 2e+11
modify material 1 set property 'POISSON' value 0.3
modify material 1 set property 'DENSITY' value 7850
set duplicate block elements off
block 1 add surface all
create shell properties 1
modify shell properties 1 layer count 1
modify shell properties 1 layer 1 thickness 0.005
modify shell properties 1 layer 1 material 1
modify shell properties 1 layer 1 angle 0
modify shell properties 1 layer 1 cs 1
modify shell properties 1 eccentricity 0.5
modify shell properties 1 layer direction normal
modify shell properties 1 thickness_change on
block 'Block 1' element shell order 1
block 'Block 1' shell properties 1
curve 46 47 48 45 interval 24
curve 46 47 48 45 scheme equal
curve 2 22 32 12 4 36 40 28 8 20 interval 80
curve 2 22 32 12 4 36 40 28 8 20 scheme equal
curve 42 44 interval 32
curve 42 44 scheme equal
curve 13 1 17 21 33 37 25 29 9 5 11 19 7 3 15 23 35 39 27 31 interval 4
curve 13 1 17 21 33 37 25 29 9 5 11 19 7 3 15 23 35 39 27 31 scheme equal
surface 4 submap smooth off
surface 4 scheme submap
mesh surface 4
surface 9 10 2 5 1 7 8 3 scheme map
surface 9 10 2 5 1 7 8 3 scheme map
mesh surface 9 10 2 5 1 7 8 3
nodeset 1 add vertex 28 6 25 5
nodeset 1 name "InterfaceNodes"

```

В результате выполнения команд будет создана конечно-элементная модель платформы с интерфейсными узлами, которую можно готовить к импорту, согласно 2.1.3.3.

2.1.3.3. Подготовка модели к импорту в ПК УМ

Для подготовки модели к импорту в ПК УМ выбираем **Режим - Настройки расчета, Настройки расчета - Внешняя интеграция MBD**, выбираем **Число собственных частот - 10**, указываем **Двоичный формат выходных файлов**, нажимаем **Применить**, затем **Начать расчет** (Рис. 2.29).

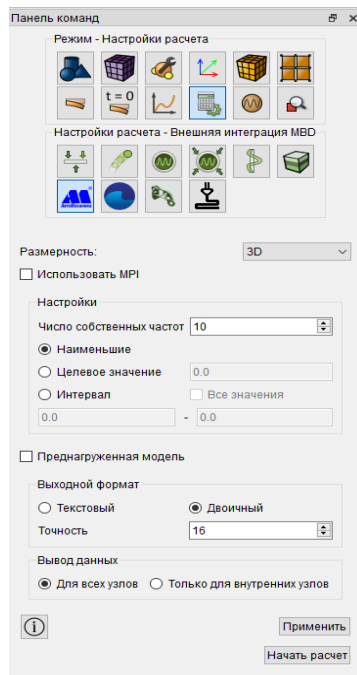


Рис. 2.29

Указываем путь для сохранения задачи (Рис. 2.30).

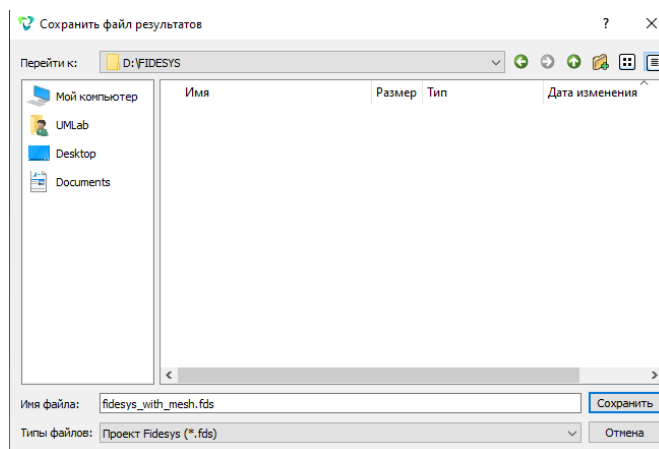


Рис. 2.30

После завершения расчета по указанному пути будут получены файлы с результатами: **geometry.vtk**, **res.cbm**, **M_CCS.hb**, **K_CCS.hb**, содержащие 24 статические формы и 10 собственных форм, соответствующих 10-ти низшим собственным частотам, матрицы масс и жесткости.

Далее требуется запустить программу **FIDESYS_UM.exe**.

2.1.3.4. Обмен данными с ПК FIDESYS

Запустите программу конвертер **FIDESYS_UM.EXE** для создания файла **input.fum**. Выберите файл **geometry.vtk** в каталоге задачи и укажите каталог сохранения файла **input.fum**.

Важно: файлы **res.cbm**, **M_CCS.hb**, **K_CCS.hb** должны находиться в том же каталоге, что и файл **geometry.vtk**. Назначение всех полей окна программы **FIDESYS_UM.EXE** понятно по их названиям (Рис. 2.31).

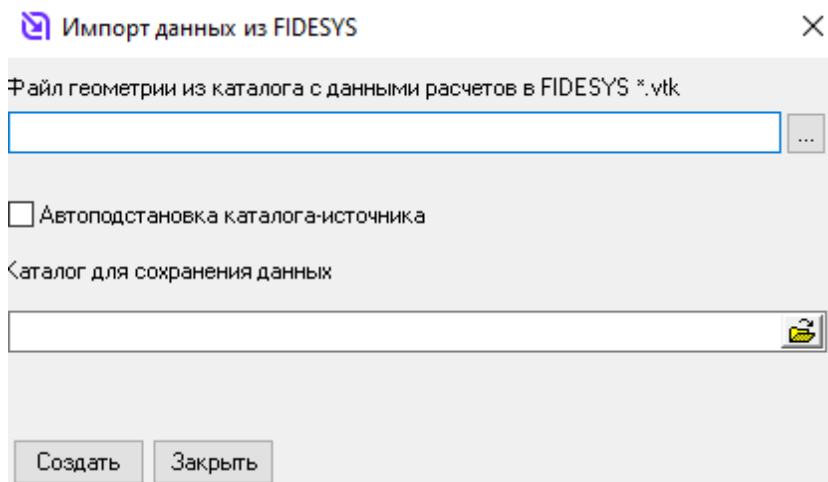



Рис. 2.31

Выполните преобразование данных кнопкой **Создать**. При успешном выполнении файл **input.fum** будет создан в каталоге, указанном в поле **Каталог для сохранения данных**.


2.1.4. Мастер подготовки данных упругих подсистем

Работа с мастером при подготовке упругого шатуна описана в п. 1.2.2. Ознакомьтесь с ним, если это не сделано ранее. Последовательность действий для модели платформы аналогична. В качестве исходного файла для мастера укажите **.\vibrostand\platform\input.fum**. Напомним, что по окончании работы мастера в каталог **.\vibrostand\platform** должен быть записан файл **input.fss**.

2.2. Создание модели

Создадим новую модель. Выберите пункт **Файл | Новый объект** главного меню или воспользуйтесь кнопкой  на панели инструментов для вызова конструктора объекта.

2.2.1. Добавление упругой платформы

1. Выберите вкладку **Подсистемы** конструктора объекта. Добавьте новую подсистему кнопкой .
2. Задайте тип **Линейная подсистема МКЭ** и с помощью появившегося диалога выберите подсистему (каталог) **.\vibrostand\platform**.

Упругие формы платформы можно просмотреть, используя управляющие элементы вкладки **Решение | Формы**.

3. В поле **Имя** введите **Платформа** (рис. 2.32).

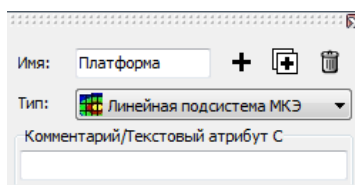


Рис. 2.32

2.2.2. Крепление упругой платформы к базе

Платформа взаимодействует с базой посредством четырех упруго-диссипативных линейных силовых элементов, расположенных по краям балок. Вначале подготовим графические объекты для каждого типа силовых элементов, затем введем элементы и зададим их параметры.

Для дальнейшего задания координат точек прикрепления силовых элементов введем следующие идентификаторы (Рис. 2.33 слева):

- **BeamLength** – длина балок платформы;
- **WidthShelf** – ширина полки платформы;
- **WidthBeamShelfLow** – ширина нижних полок сечений балок.

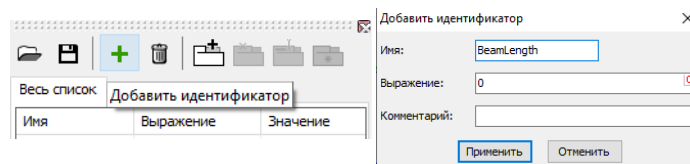


Рис. 2.33.


При первом вводе символьных идентификаторов будут появляться диалоги, в которых следует задать значения переменных (Рис. 2.33 справа).

Задайте значения:

- **BeamLength=1.0, WidthShelf=0.4, WidthBeamShelfLow=0.1.**

2.2.3. Создание графических объектов

Введем графический объект для упругого силового элемента.

1. Выберите **Графические объекты** в дереве элементов объекта.
2. Для добавления нового графического объекта нажмите кнопку  инспектора.
3. Присвойте графическому объекту имя **Амортизатор** (рис. 2.34).

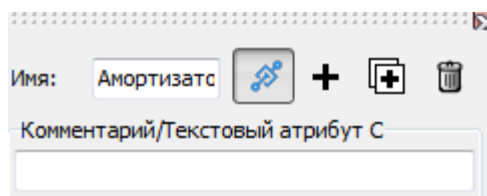



Рис. 2.34

Нажмите кнопку **Графический образ для биполярного элемента**  и на появившейся вкладке **Биполярный ГО** укажите размеры в соответствии с рис. 2.35.

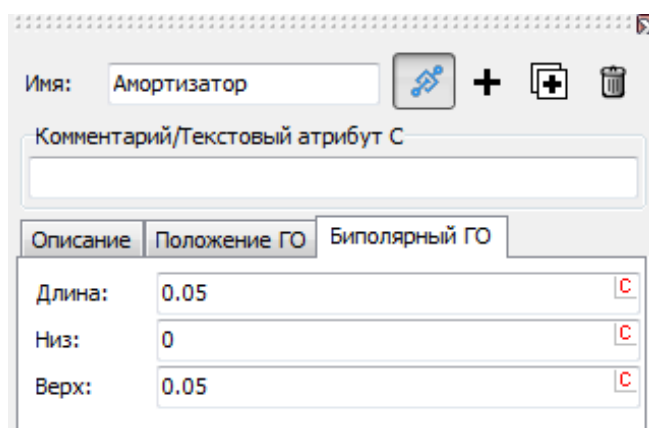



Рис. 2.35.

4. Добавьте новый графический элемент кнопкой  на нижней панели и назначьте ему тип **Конус** (рис. 2.36)

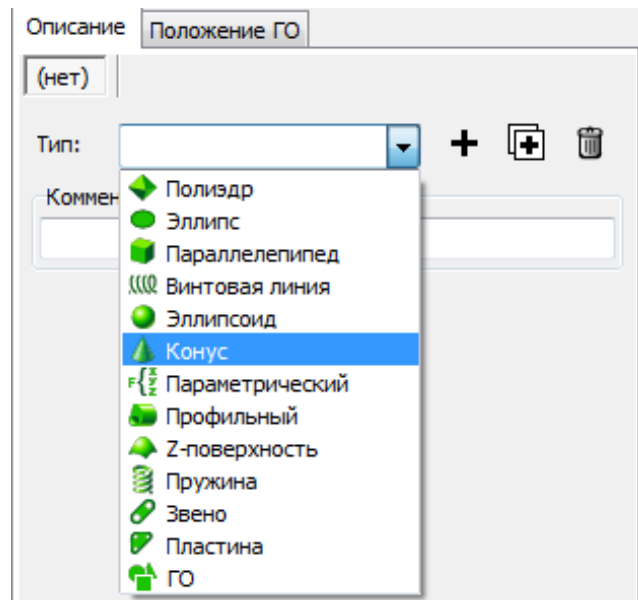
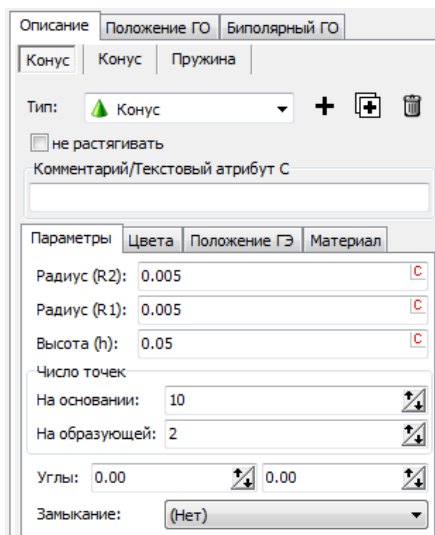
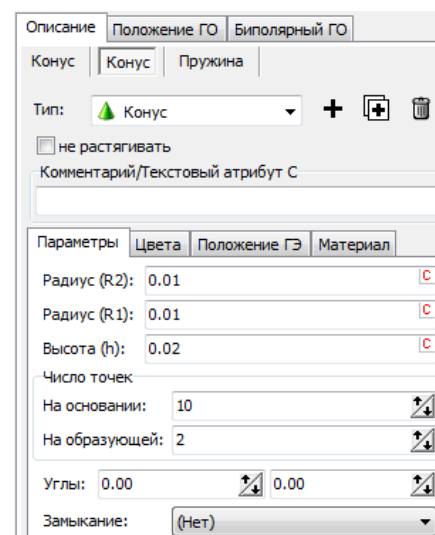


Рис. 2.36

5. Задайте параметры конуса в соответствии с рис. 2.37а.



а)



б)

Рис. 2.37

6. Добавьте второй графический элемент Конус и задайте значения параметров в соответствии с рис. 2.37б.
7. Перейдите на вкладку **Положение ГЭ** второго конуса и в поле **Сдвиг | z** задайте значение **0.015**.
8. Перейдите на вкладку **Цвета** и задайте диффузный компонент цвета графического элемента кнопкой **Диффузный** (рис. 2.38)

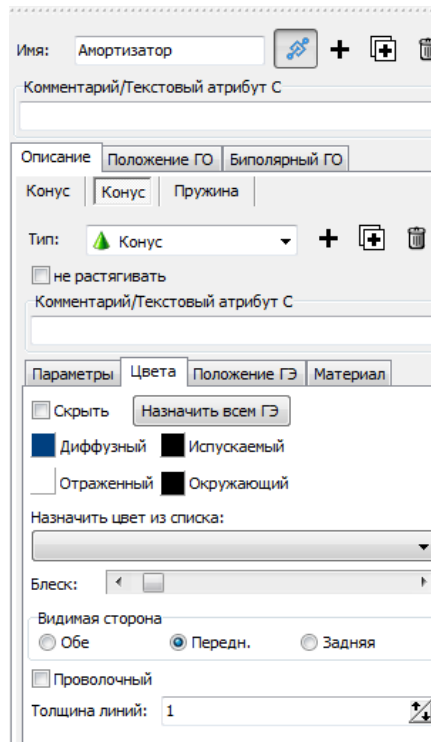


Рис. 2.38

9. Добавьте новый графический элемент.
10. Выберите Пружина в появившемся списке типов графических элементов (рис. 2.39).

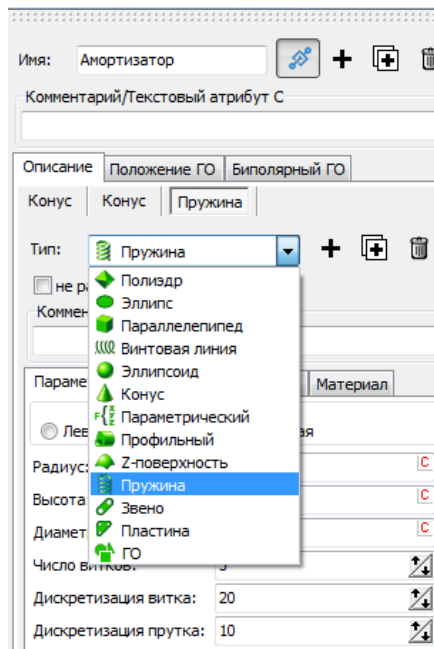


Рис. 2.39

11. Задайте значения параметров в соответствии с рис. 2.40.

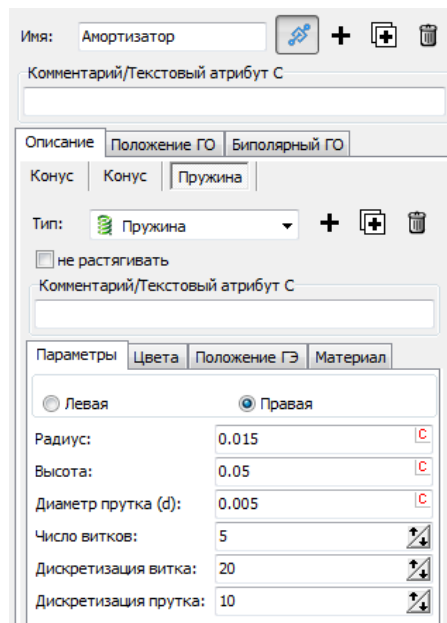


Рис. 2.40

- Создайте новый графический объект с названием **Сцена**. Создайте графический элемента типа Параллелепипед и укажите параметры ГЭ в соответствии с рис. 2.41.

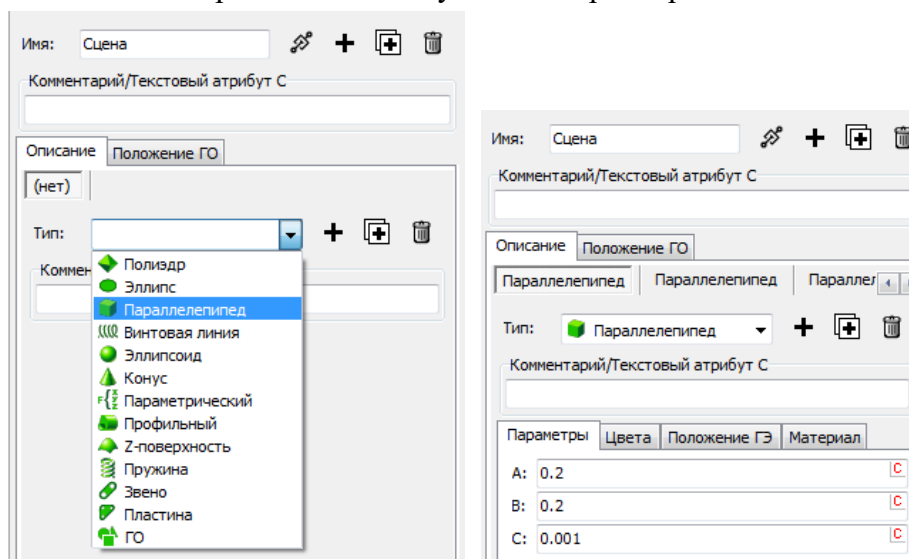


Рис. 2.41

- На вкладках **Цвета** и **Положение ГЭ** укажите параметры в соответствии с рис. 2.42.

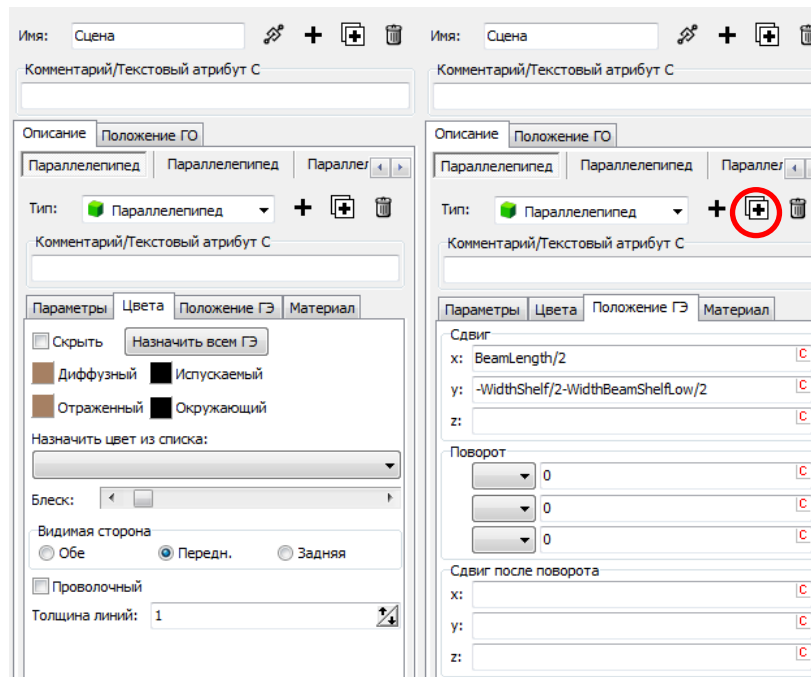



Рис. 2.42

14. Скопируйте созданный объект параллелепипед из ГО **Сцена** 3 раза (копировать можно по кнопке ) , получится 4 ГЭ. Положение у этих ГЭ должно быть в соответствии с рисунком (Рис. 2.43).

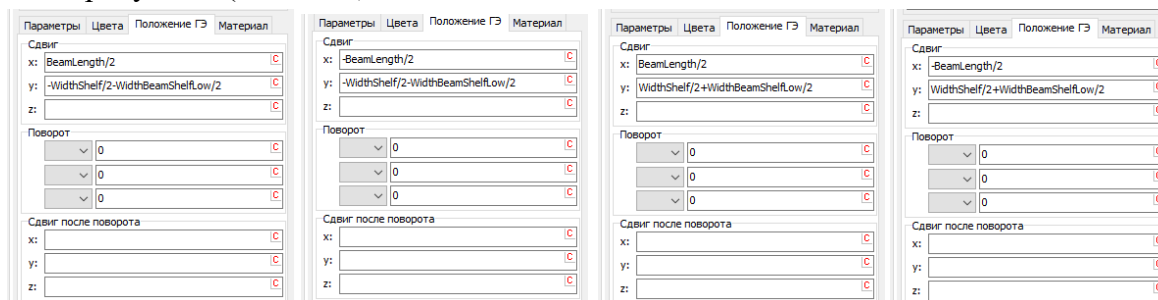


Рис. 2.43

15. В списке элементов объекта выберите **Объект** и выберите в поле **Образ сцены** созданный в предыдущих пунктах ГО **Сцена** (рис. 2.44)

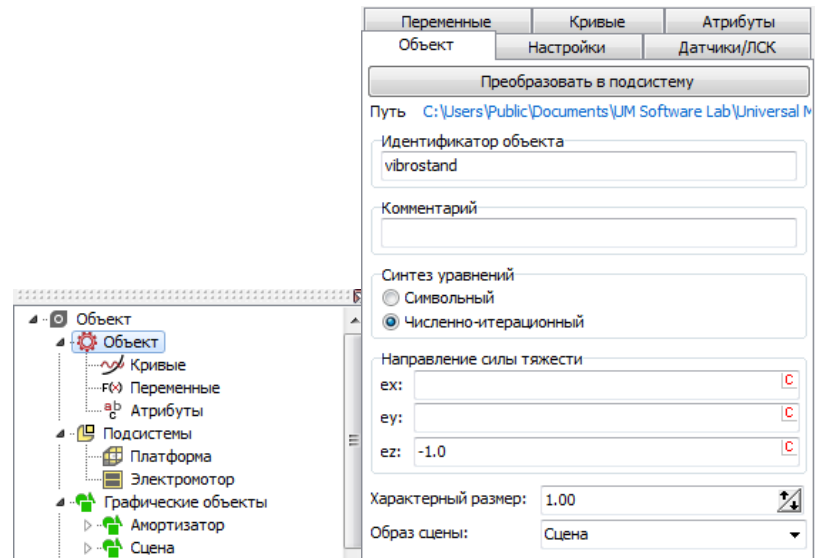


Рис. 2.44

Графические объекты созданы, перейдем к заданию силовых элементов.

2.2.4. Создание силовых элементов

Опишем упругий элемент, расположенный на переднем краю левой балки платформы.

1. Выберите **Линейные силы** в дереве элементов объекта.
2. Добавьте новый силовой элемент кнопкой **+** инспектора.
3. Назначьте имя **Амортизатор_ПЛ** (передняя, левая), тип силового элемента **Упруго-вязкий**, взаимодействующие тела **Base0 Платформа.Platform**, графический объект **Амортизатор**, рис. 2.45
4. Задайте координаты точки прикрепления силового элемента к первому телу Base0: **BeamLength/2, WidthShelf/2 + WidthBeamShelfLow/2, -0.05**;
5. Задайте координаты точки прикрепления силового элемента ко второму телу **Platform.Platform**: **BeamLength/2, WidthShelf/2 + WidthBeamShelfLow/2, 0.0**;
6. Координаты концевой точки в стационарном состоянии в СК первого тела (рис. 2.45, Точка B1 – конец элемента): **BeamLength/2, WidthShelf/2 + WidthBeamShelfLow/2, 0.0**.

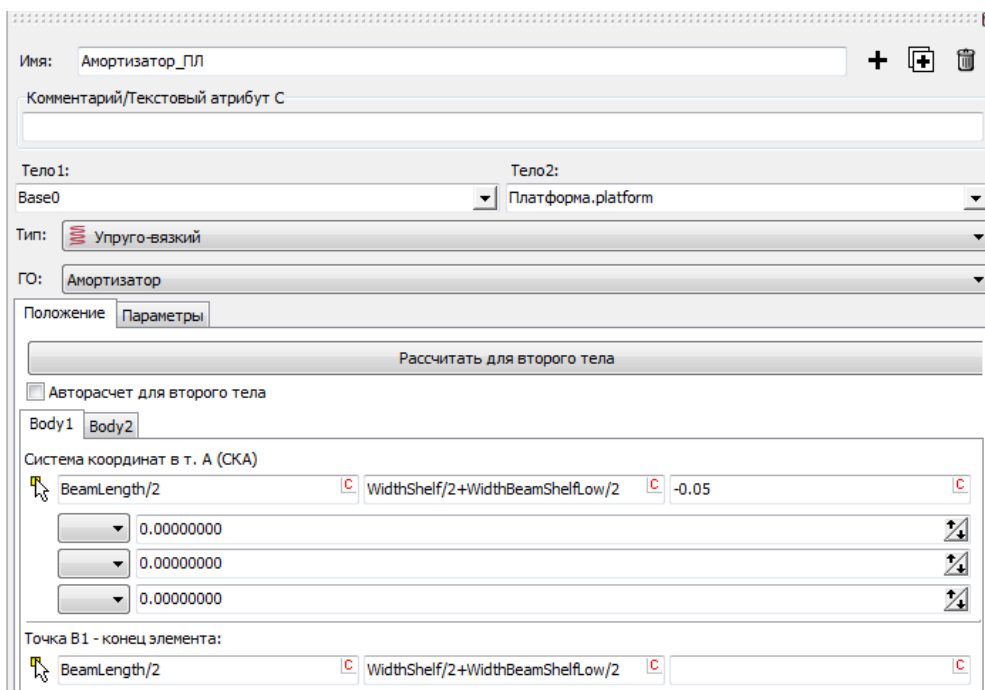


Рис. 2.45

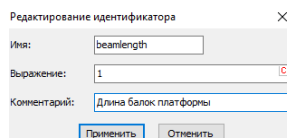


Рис. 2.46

7. Определим матрицу жесткости силового элемента. Перейдите на вкладку **Параметры**. Нажмите кнопку **...** в поле **Матрица жесткостей** (рис. 2.47), в появившемся диа-

логически задайте диагональные элементы, соответствующие поступательным степеням свободы (рис. 2.48), и нажмите кнопку **Применить**. При вводе идентификаторов в появляющихся диалогах задайте следующие значения: **схх=1е6**, **суу=1е6**, **сzz=1е6** (Н/м).

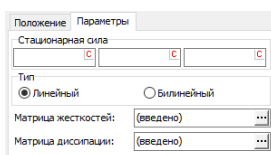


Рис. 2.47

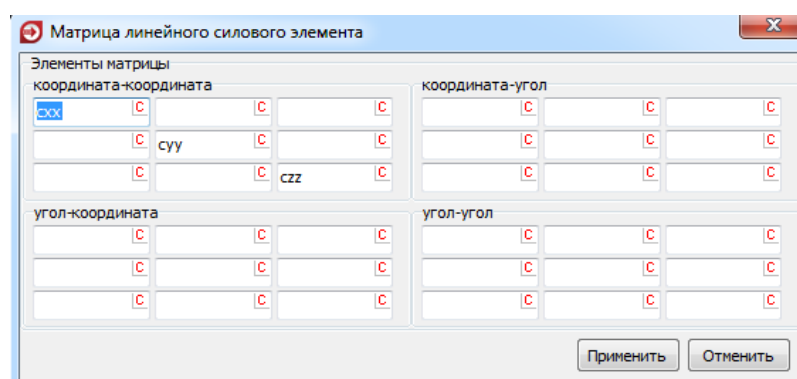



Рис. 2.48

Определим матрицу диссипации силового элемента. На вкладке **Параметры** нажмите кнопку  в поле **Матрица диссипации** и в появившемся диалоге задайте диагональные элементы, соответствующие поступательным степеням свободы: **dxх**, **dyу**, **dzz**. Нажмите кнопку **Применить** (Рис. 2.49). При первом вводе идентификаторов в появляющихся диалогах задайте значения: **dxх=1е3**, **dyу=1е3**, **dzz=1е3** (Нс/м).

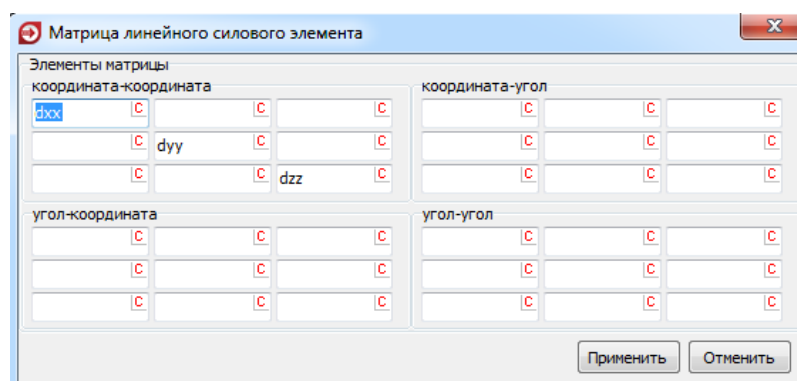




Рис. 2.49

Создайте остальные три пары силовых элементов по аналогии с описанными выше действиями. При этом удобно пользоваться кнопкой  (**Скопировать текущий элемент**) для копирования текущего силового элемента и последующего редактирования

имени и точек крепления. То есть последовательность действий строится следующим образом.

8. Выбор введенного ранее силового элемента, имеющего одинаковый тип, с элементом, который планируется создать. Например, для упругого силового элемента – **Амортизатор_ПП**.
9. Копирование элемента кнопкой .
10. Редактирование имени элемента. Например, **Амортизатор_ПП** (передний, правый).
11. Задание координат точек прикрепления. Для элемента **Амортизатор_ПП Base0**:

BeamLength/2, -WidthShelf/2 - WidthBeamShelfLow/2, -0.05;

Платформ.Platform:

BeamLength/2, -WidthShelf/2 - WidthBeamShelfLow/2, 0.0;

координаты концевой точки в стационарном состоянии в СК первого тела (рис. 2.10, Точка В1 – конец элемента):


BeamLength/2, -WidthShelf/2 - WidthBeamShelfLow/2, 0.0.

Таким образом, полный список силовых элементов, соединяющих упругую платформу с базой должен включать следующие элементы: **Амортизатор_ПЛ**, **Амортизатор_ПП**, **Амортизатор_ЗЛ**, **Амортизатор_ЗП**.

2.2.5. Создание модели электромотора

В настоящем пункте мы не будем рассматривать создание модели электромотора, а воспользуемся данными каталога `{Данные УМ}\ SAMPLES\Flex\electricmotor`, содержащем эту модель.

2.2.5.1. Добавление электромотора как подсистемы

1. Выберите вкладку **Подсистемы** конструктора объекта. Добавьте новую подсистему кнопкой .
2. Задайте тип **включенная** и с помощью появившегося диалога выберите подсистему (каталог) [{Данные УМ}\SAMPLES\Flex\electricmotor](#) (рис. 2.50).

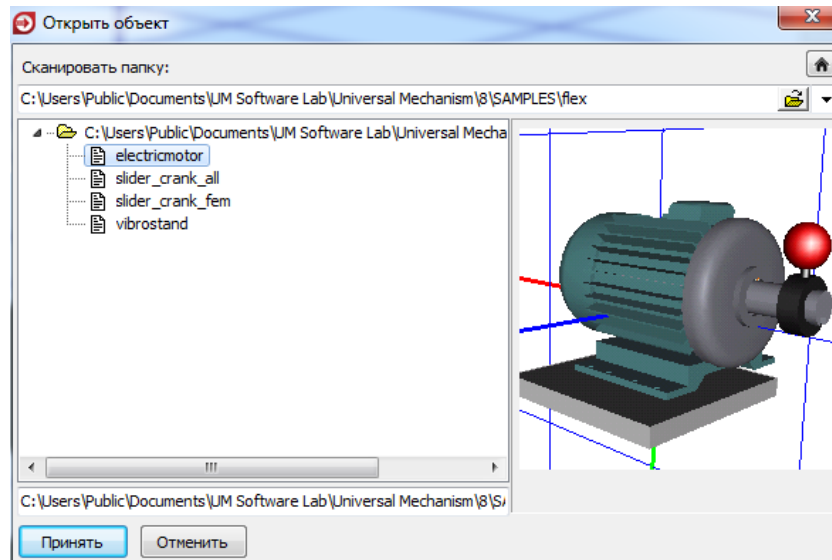


Рис. 2.50

3. Задайте имя подсистемы – **Электродвигатель**.
4. Перейдите на вкладку **Положение** и задайте значения, согласно рис. 2.51.

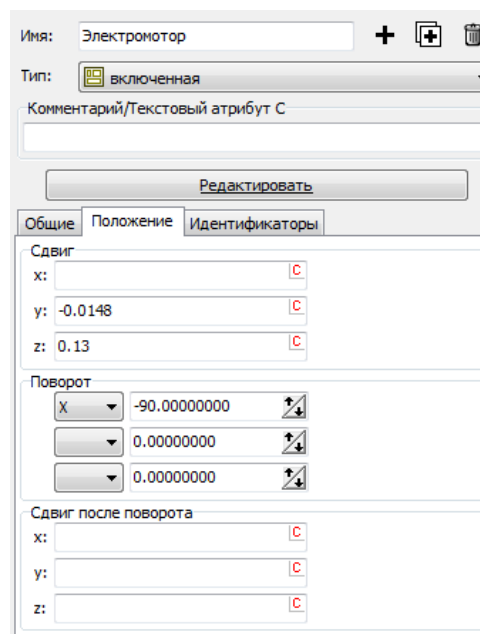


Рис. 2.51

2.2.5.2. Описание режимов вращения ротора

Рассмотрим один из способов задания режимов вращения ротора. В настоящем примере описана последовательность следующих режимов: разбег, рабочий режим и выбег. Угловая скорость ротора при разбеге и выбеге изменяется линейно, то есть угловое ускорение постоянно (рис. 2.52). Для описания режимов введены шесть переменных, представленных в табл. 1. Значение переменной **omega** рассчитывается по значению **nu**.

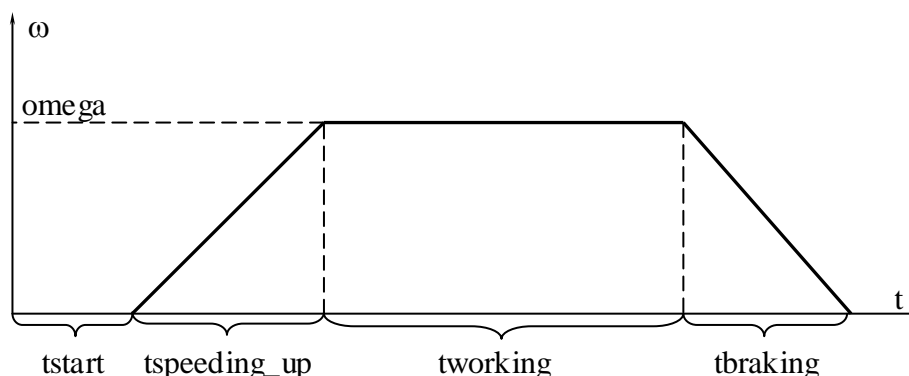


Рис. 2.52. Закон изменения угловой скорости вращения ротора

Таблица 1.

Переменные для описания вращения ротора электродвигателя

Имя переменной	Выражение	Комментарий
nu	1620	Частота вращения ротора об/мин
omega	$nu * 2 * \pi / 60$	Угловая скорость вращения ротора
tstart	1	Время начала разбега
tspeeding_up	3	Время разбега
tworking	3	Рабочее время
tbraking	3	Время выбега

1. Перейдите в режим редактирования подсистемы **Электромотор**, нажав клавишу **Редактировать** (рис. 2.16). Откроется новый **Конструктор объекта** для электромотора.
2. Выберите **Шарниры | Ротор->Корпус** в дереве элементов объекта. Шарнир имеет тип **Обобщенный**.
3. В инспекторе данных выберите элементарное преобразование **RTx** (Рис. 2.53). Закон вращения ротора задан функцией типа **Расписание**, состоящего из пяти пунктов, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Выражения функции типа «расписание», описывающей вращение ротора

№	Граница временного интервала	Выражение для угла поворота ротора
1	tstart	0

2	tstart+tspeeding_up	$(\omega/t_{\text{speeding_up}}) \cdot \sqrt{t-t_{\text{start}}}/2$
3	tstart+tspeeding_up+tworking	$(\omega/t_{\text{speeding_up}}) \cdot \sqrt{t_{\text{speeding_up}}}/2 + \omega \cdot (t-t_{\text{start}}-t_{\text{speeding_up}})$
4	tstart+tspeeding_up+tworking+tbraking	$(\omega/t_{\text{speeding_up}}) \cdot \sqrt{t_{\text{speeding_up}}}/2 + \omega \cdot t_{\text{working}} + \omega \cdot (t-t_{\text{start}}-t_{\text{speeding_up}}-t_{\text{working}}) - (\omega/t_{\text{braking}}) \cdot \sqrt{(t-t_{\text{start}}-t_{\text{speeding_up}}-t_{\text{working}})}/2$
5	100	$(\omega/t_{\text{speeding_up}}) \cdot \sqrt{t_{\text{speeding_up}}}/2 + \omega \cdot t_{\text{working}} + \omega \cdot (t_{\text{working}}) - (\omega/t_{\text{braking}}) \cdot \sqrt{t_{\text{braking}}}/2$

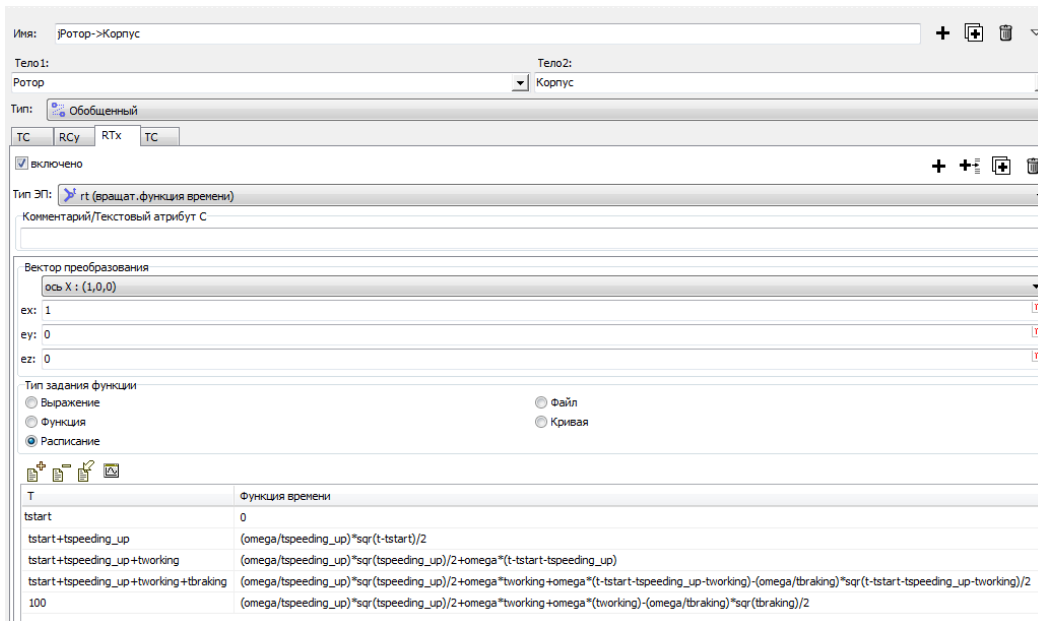


Рис. 2.53

5. Закройте конструктор объекта для электромотора, вернитесь к построению модели составного объекта.

2.2.6. Крепление электромотора на платформе посредством силовых элементов

Крепление мотора на платформе задается аналогично креплению платформы к базе. Взаимодействующие тела – **Электромотор.Корпус** и **Платформа.Platform**. Пример задания упругого силового элемента изображен на рис. 2.54.

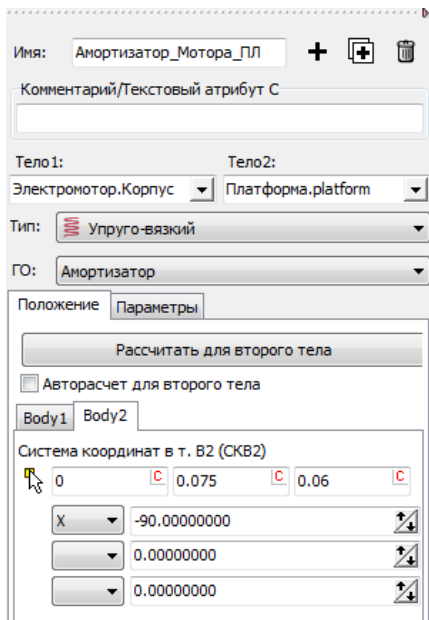


Рис. 2.54

В табл. 3 приведены координаты точек крепления упругих и диссипативных силовых элементов, соединяющих электромотор с платформой.

Таблица 3

Координаты точек крепления силовых элементов

Силовой элемент	Электромотор.Корпус (вкладка Body1)			Платформа.Platform (вкладка Body2)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Амортизатор_Мотора_ПЛ	0	0.05	0.0899	0	0.075	0.06
Амортизатор_Мотора_ПП	0	0.05	-0.06	0	-0.075	0.06
Амортизатор_Мотора_ЗЛ	-0.0875	0.05	0.0899	-0.0875	0.075	0.06
Амортизатор_Мотора_ЗП	-0.0875	0.05	-0.06	-0.0875	-0.075	0.06

Координаты **X**, **Z** концевых точек в стационарном состоянии в СК первого тела для всех элементов совпадают с координатами **Электромотор.Корпус**, **Y=0.07**.

Обратите внимание на необходимость задания поворота на -90 градусов вокруг оси **X** (Рис. 2.54), чтобы системы координат силового элемента и тела **Электромотор.Корпус** имели одинаковую ориентацию.

Для всех упругих элементов задайте матрицы жесткости и диссипации, как показано на рис. 2.55.

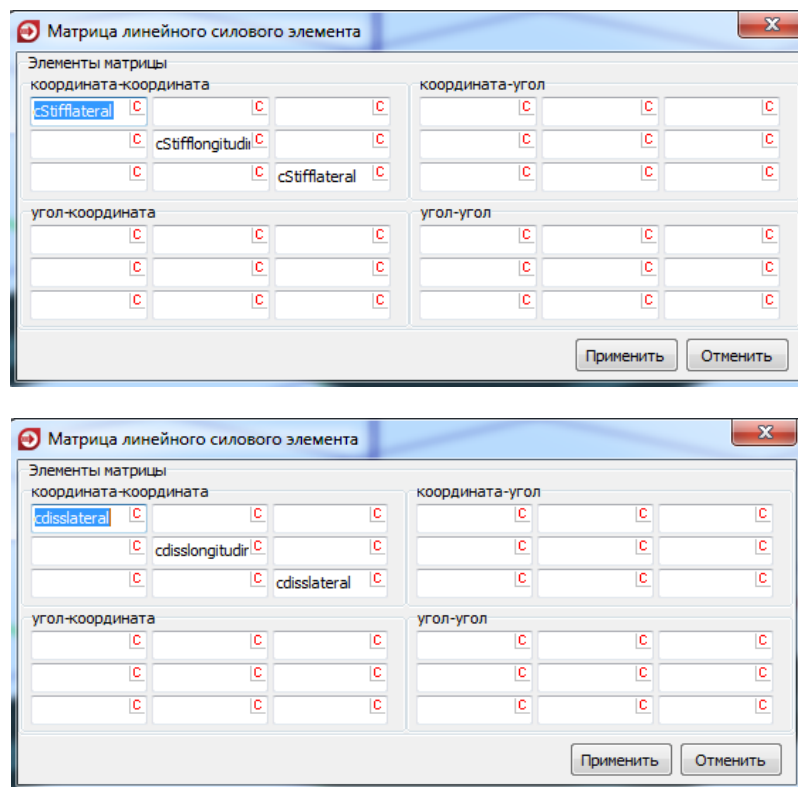


Рис. 2.55

Задайте значения $cStiff_{lateral}=1.0e6$, $cStiff_{longitudinal}=1.0e6$ (Н/м) в матрице жесткостей. Значения аналогичных переменные для диссипативной матрицы: $cDiss_{lateral}=1.0e3$, $cDiss_{longitudinal}=1.0e3$ (Нс/м).

2.2.7. Подготовка к моделированию

1. С помощью основного меню или кнопки на панели инструментов сохраните модель под именем **vibrostand**.
2. Для перехода в программу моделирования нажмите на соответствующую кнопку на верхней панели (Рис. 2.56).

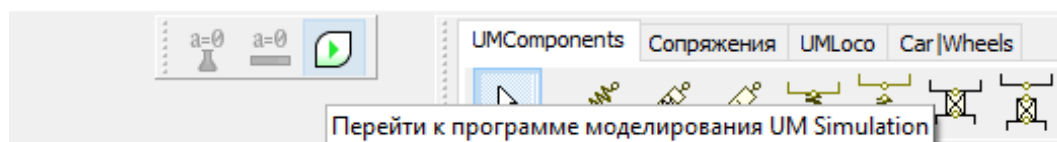


Рис. 2.56

2.2.8. Моделирование динамики вибростенда

Исследуем вертикальную компоненту сил, возникающих в паре силовых элементов, посредством которых электромотор установлен на платформе, при вращении вала мотора с рабочей частотой $n = 1620$ об/мин. Выберем для исследования, например, правую заднюю пару. Рассчитаем также перемещения и ускорения платформы на площадке под электромотором. Исследуемый узел конечно-элементной схемы выберем на этапе создания переменных.

1. Запустите программу моделирования динамики **UM Simulation**.
2. Откройте анимационное окно и настройте параметры изображения для визуального контроля процесса моделирования.

Для настройки изображения упругой платформы откройте **Инспектор моделирования объекта** (пункт меню **Анализ | Моделирование**) и воспользуйтесь вкладкой **Подсистемы МКЭ | Представление** (Рис. 2.57).

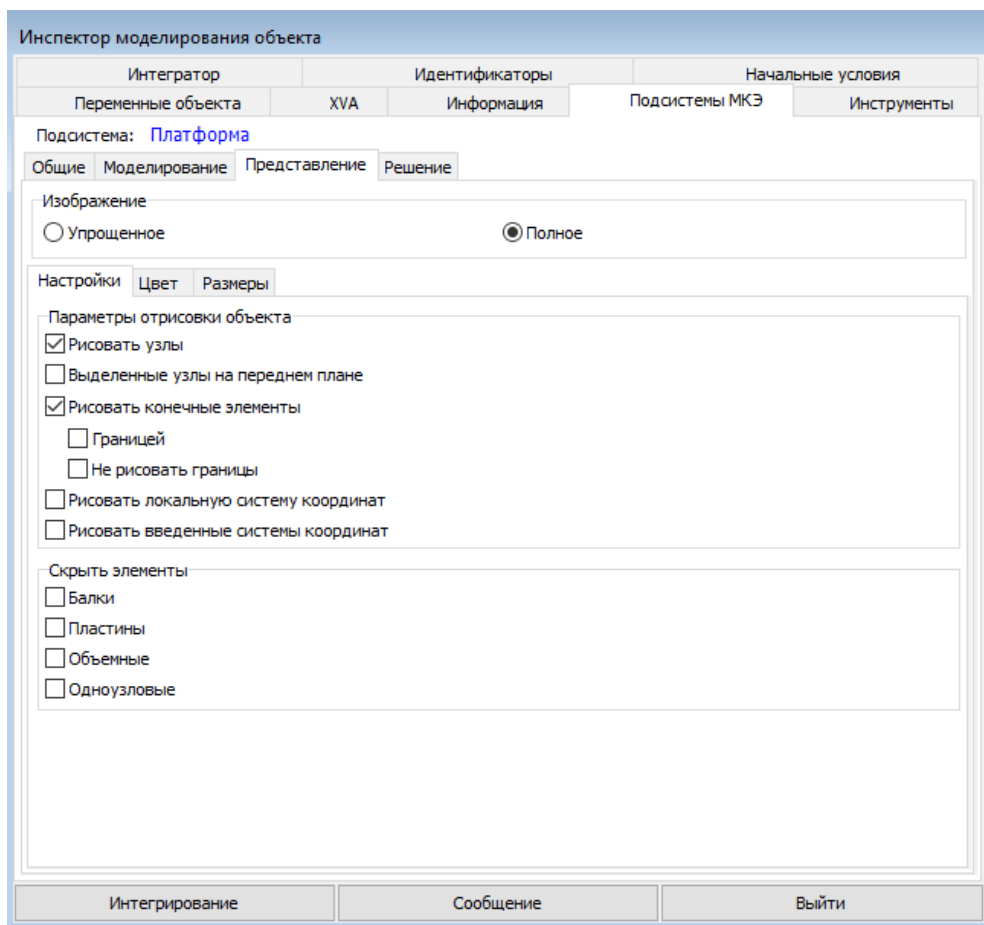




Рис. 2.57

2.2.8.1. Расчет положения равновесия и частот

1. Рассчитаем положение равновесия вибростенда. Если активен **Инспектор моделирования объекта**, закройте его кнопкой **Выйти**. Откройте форму **Статический и Линейный анализ** (пункт меню **Анализ | Статический и Линейный анализ...**, либо кнопка  на панели инструментов, либо клавиша F8).
2. Перейдите на вкладку **Равновесие** и запустите расчет кнопкой  **Выполнить расчет** (рис. 2.58).

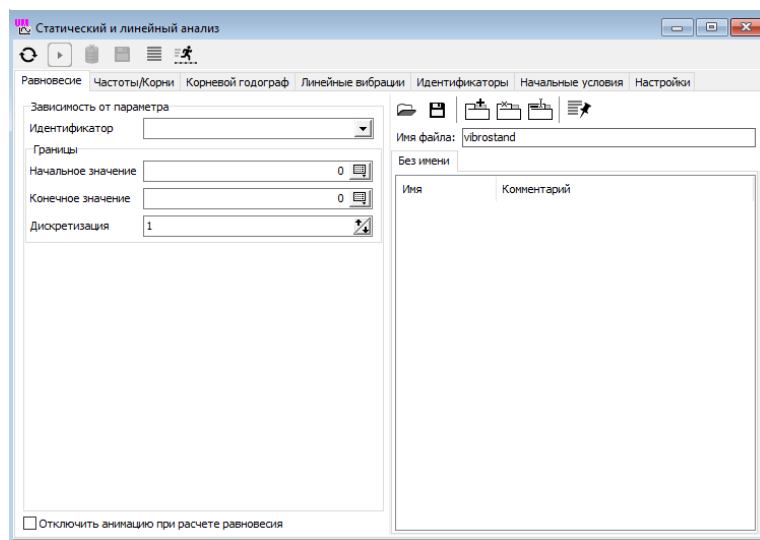




Рис. 2.58

3. После завершения расчета значения рассчитанных координат и скоростей становятся текущими. Перейдите на вкладку **Начальные условия** и кнопкой  сохраните значения координат в файл **equilibrium.xv**. Эти значения также будут автоматически записаны в файл **last.xv** по окончании работы с моделью. Заметим, что при изменении параметров модели, например, жесткости пружин, значения координат в файле **equilibrium.xv** не будут соответствовать положению равновесия. В этом случае необходимо выполнить повторный расчет.
4. Перейдите на вкладку **Частоты/Корни**. После нажатия кнопки  рассчитаются и будут представлены в виде списка частоты вибростенда с учетом упругости платформы (рис. 2.59).

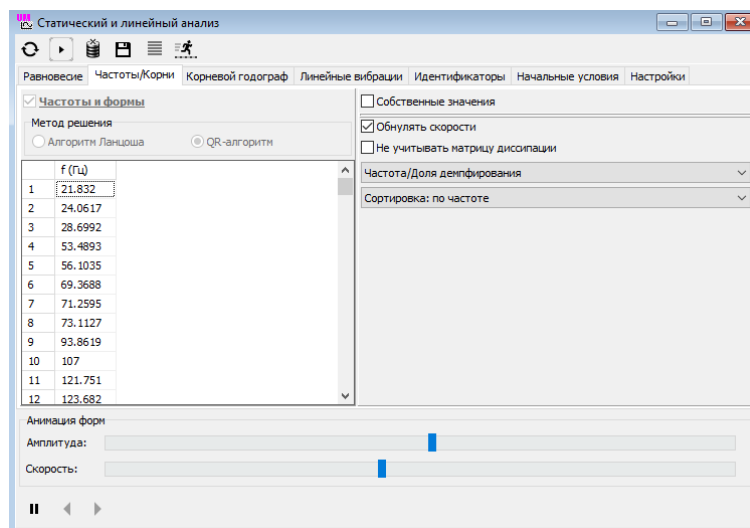





Рис. 2.59

5. Формы колебаний вибростенда можно просмотреть в анимационном окне, выбрав соответствующую частоту в списке и нажав кнопку  **Показать**. При этом наименование кнопки поменяется на **Стоп**  и стартует анимация формы колебаний (рис. 2.60). Для прерывания анимации нажмите клавишу **Поставить на паузу/снять с паузы** .

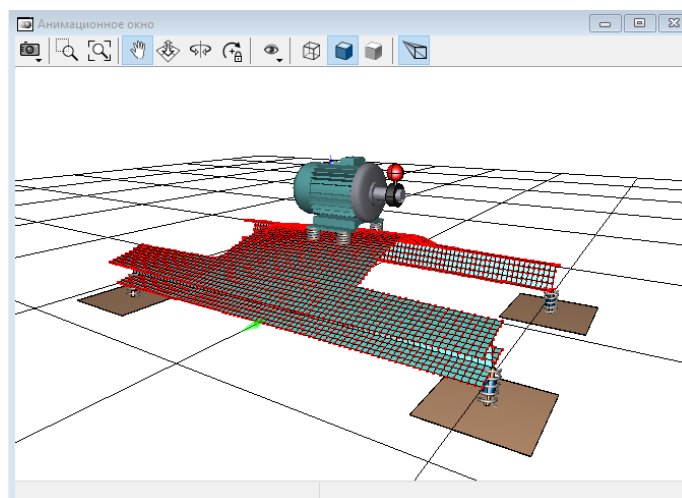


Рис. 2.60. Изображение формы колебаний вибростенда, соответствующей 2-ой собственной частоте 24.0617 Гц

2.2.8.2. Интегрирование уравнений движения

1. Закройте окно **Линейного анализа** и откройте **Инспектор моделирования объекта**.
2. Создадим переменные для расчета исследуемых величин. Откройте **Мастер переменных** (меню **Инструменты | Мастер переменных...**) и создайте переменные для определения компоненты **Z** линейных сил для силового элемента **Амортизатор_Мотора_ЗП** (рис. 2.61).

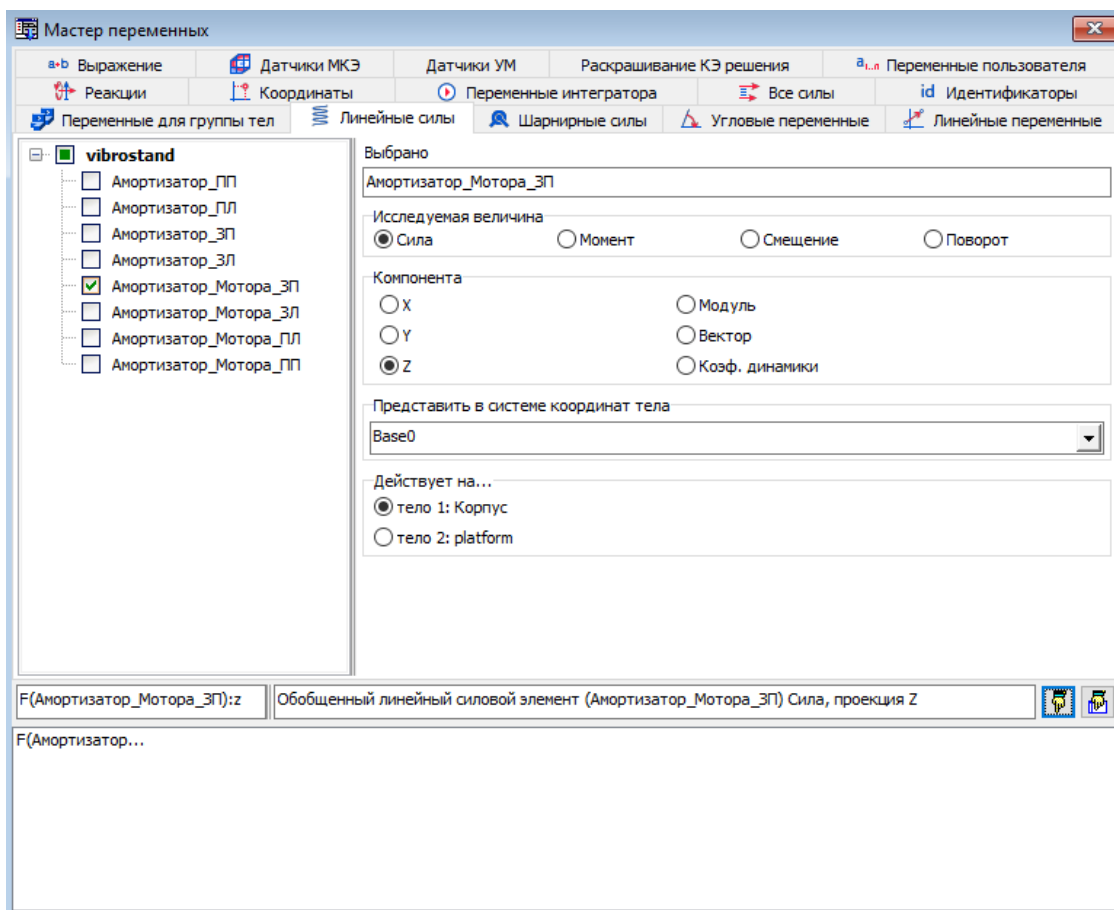


Рис. 2.61

3. Откройте новое графическое окно (меню **Инструменты | Графическое окно...**). Задайте имя окна в диалоге **Параметры окна**, который вызывается с помощью одноименного пункта контекстного меню (рис. 2.62).
4. Перетащите мышкой созданные переменные в графическое окно.
5. Выберем узел конечно-элементной схемы платформы, в котором будут вычисляться компоненты Z перемещения и ускорения, а также напряжения. Если в анимационном окне не отображаются узлы, выберите вкладку **Подсистемы МКЭ | Представление** и установите переключатель **Изображение** в положение **Полное**. Установите флажок **Рисовать узлы** на вкладке **Настройки**, задайте ненулевое значение в поле **Размеры | Точки-изображения узла** (рис. 2.63).

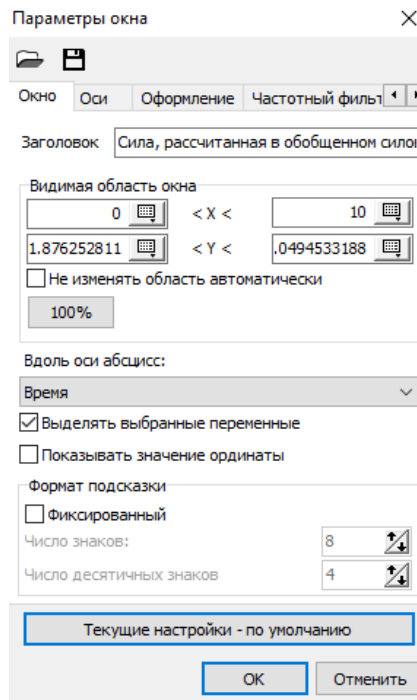


Рис. 2.62

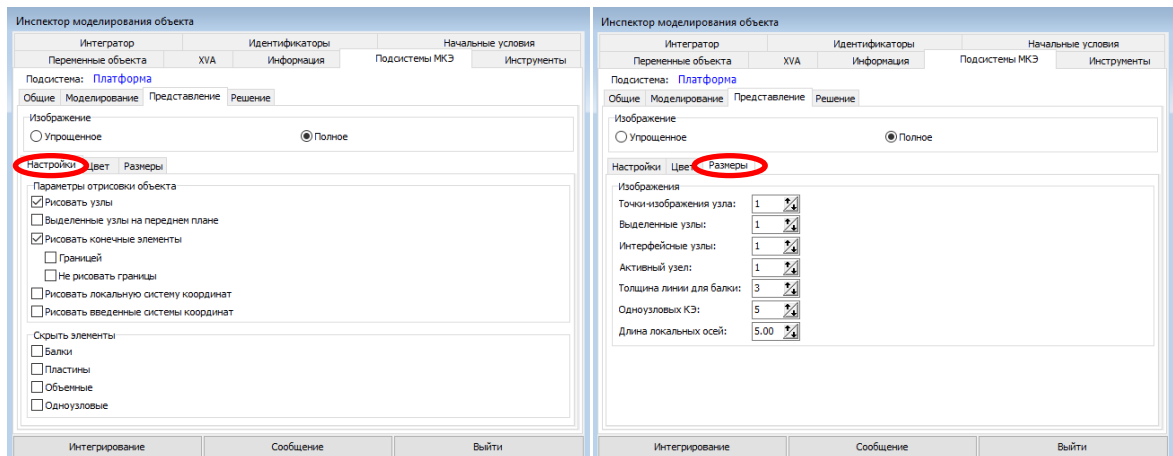


Рис. 2.63

6. Разверните модель в анимационном окне мышкой или кнопками панели инструментов так, чтобы интересующая часть конечно-элементной схемы оказалась на переднем плане. При наведении курсора мыши на выбранный узел его координаты отображаются в статус-строке анимационного окна (рис. 2.64). Запишите или запомните их с точностью до трех знаков.

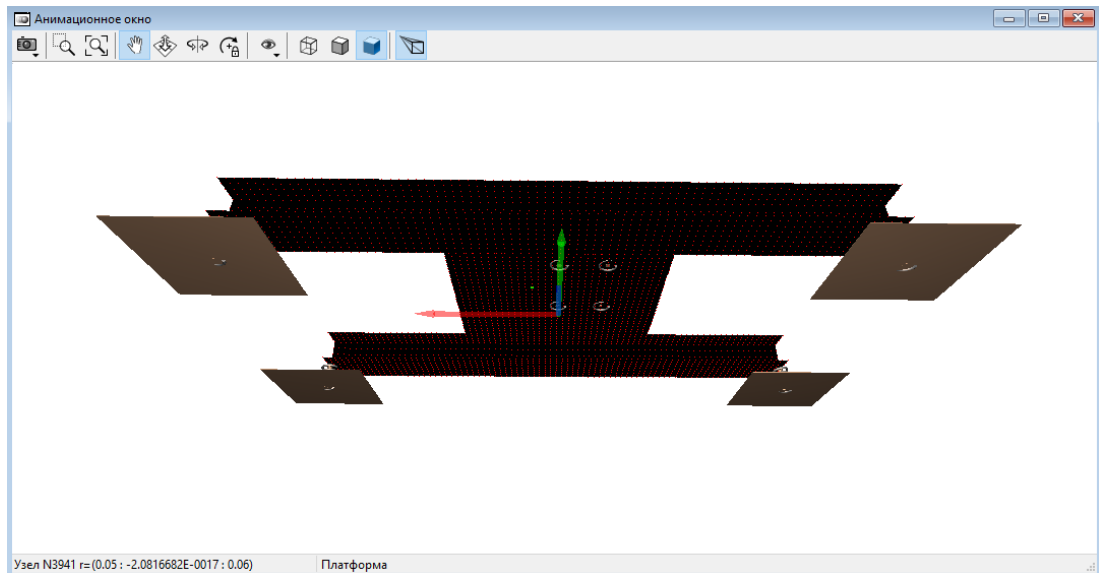


Рис. 2.64

Для выбора узлов и элементов модели в анимационном окне удобно пользоваться мастером **Выбора узлов** (Рис. 2.65), вызываемым из контекстного меню анимационного окна (после нажатия правой кнопки нажимаем **Выбрать конечно-элементные узлы**). После ввода номера или координат искомого узла нажимаем **Найти**. Если данный узел присутствует в модели, нажимаем **Добавить**. Выбранный узел будет присутствовать в **Списке узлов**. Узел, выбранный таким способом, отображается в анимационном окне как *выделенный*. Для выделенного узла можно установить цвет и размер (рис. 2.63).

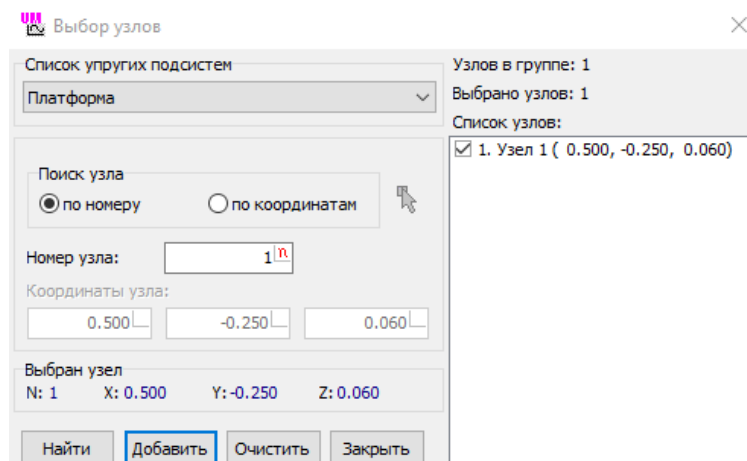


Рис. 2.65

С помощью **Мастера переменных** создайте переменные для расчета компонент *Z* перемещений и ускорений выбранного узла (Рис. 2.66). Выберите компоненты напряжения SX1 узла № 3941, как это показано на рис. 2.67.

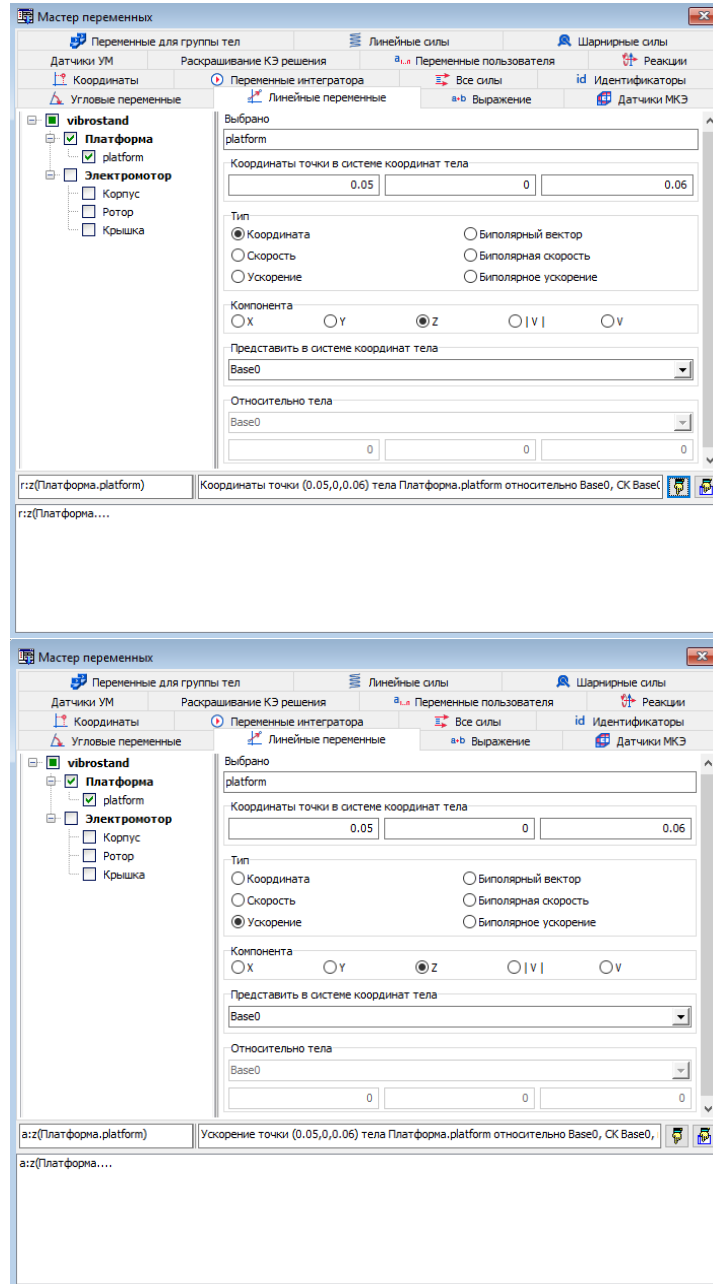


Рис. 2.66

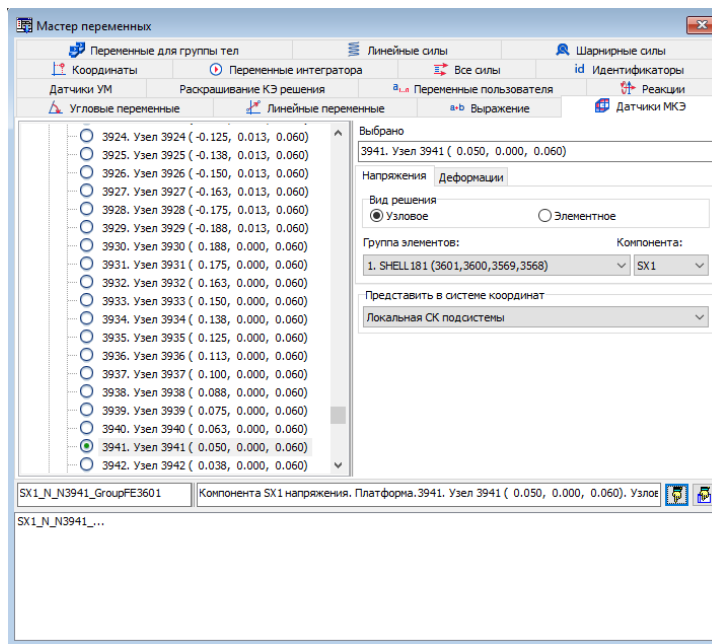


Рис. 2.67

7. Последовательно создайте три новых графических окна для перемещений и ускорений и напряжений точек и поместите в них созданные переменные аналогично пунктам 3-4.
8. В **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на вкладку **Интегратор** и установите следующие параметры (Рис. 2.68):
 - Численный метод = **Метод Парка**.
 - Тип решения = **Прямой метод (RSM)**.
 - Время моделирования = **10.0**.
 - Шаг представления результатов = **0.002**.
 - Погрешность = **1E-8**.
 - Флажок **Расчет матриц Якоби** включен.
 - Флажок **Блочно-диагональные матрицы** выключен.

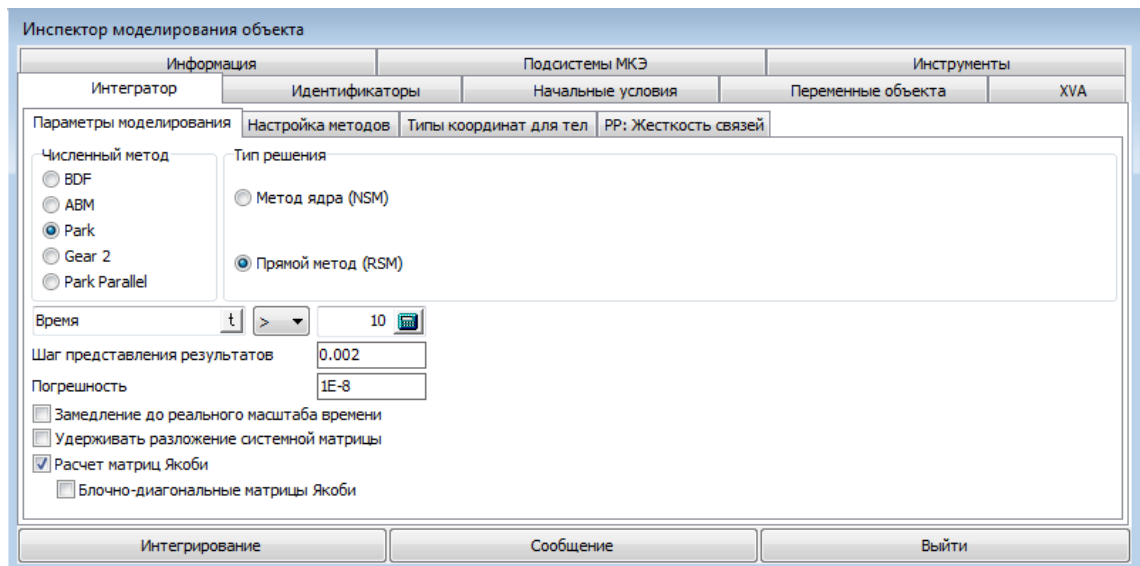


Рис. 2.68

9. Перейдите на вкладку **Подсистемы МКЭ | Моделирование**. Флажок **Учитывать силу тяжести** должен быть включен, **Учитывать внутреннюю диссипацию** – включен (моделирование с учетом внутренней диссипации). Выберите способ задания параметров внутренней диссипации **Линейная модель**, задайте коэффициенты: **$a=0.001$** , **$b=0$** (рис. 2.69).

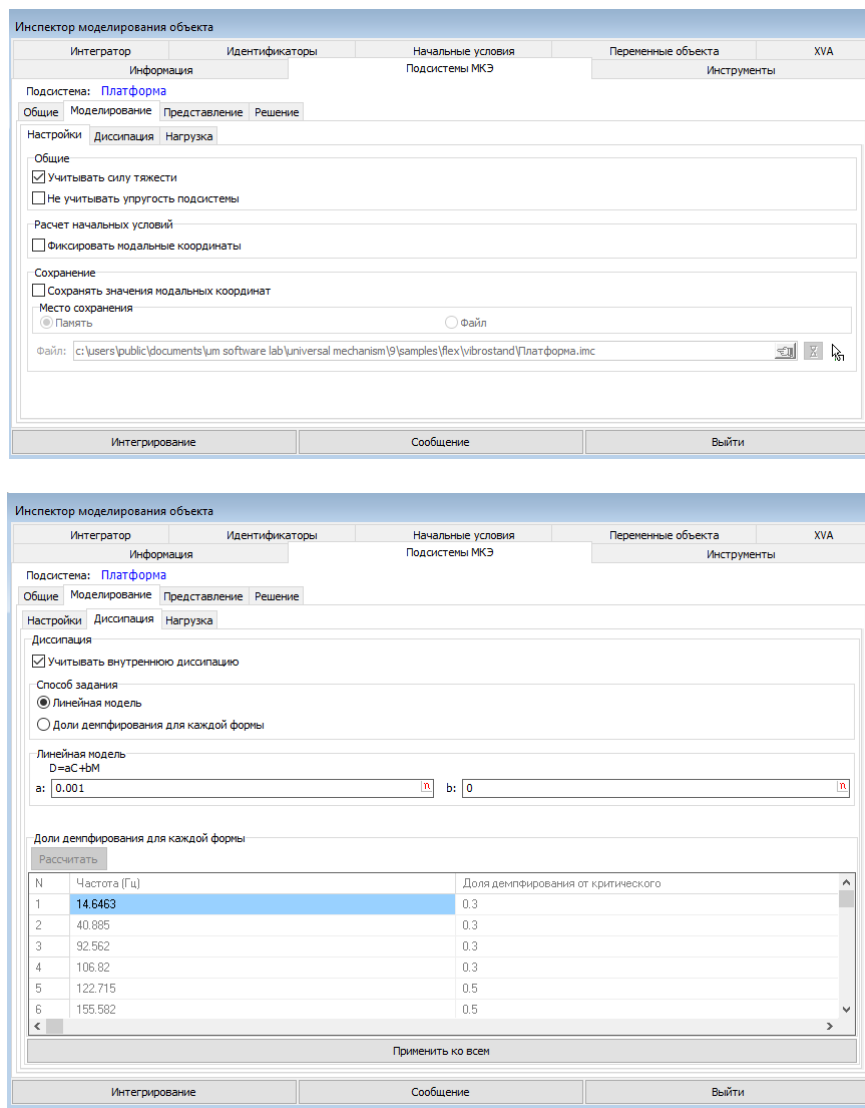


Рис. 2.69

10. Перейдите на вкладку **Идентификаторы**. Выберите элемент списка **vibrostand.Электромотор**. Задайте следующие значения идентификаторов, определяющих режимы вращения ротора (Рис. 2.70):

- **nu=1620** (27 об/ сек.);
- **tstart=0.5;**
- **tspeeding_up=2;**
- **tworking=3;**
- **tbraking=4.**

Таким образом, задана частота вращения ротора, превышающая первые две собственные частоты вибростенда, и мы будем наблюдать явление резонанса при возрастании угловой скорости ротора.

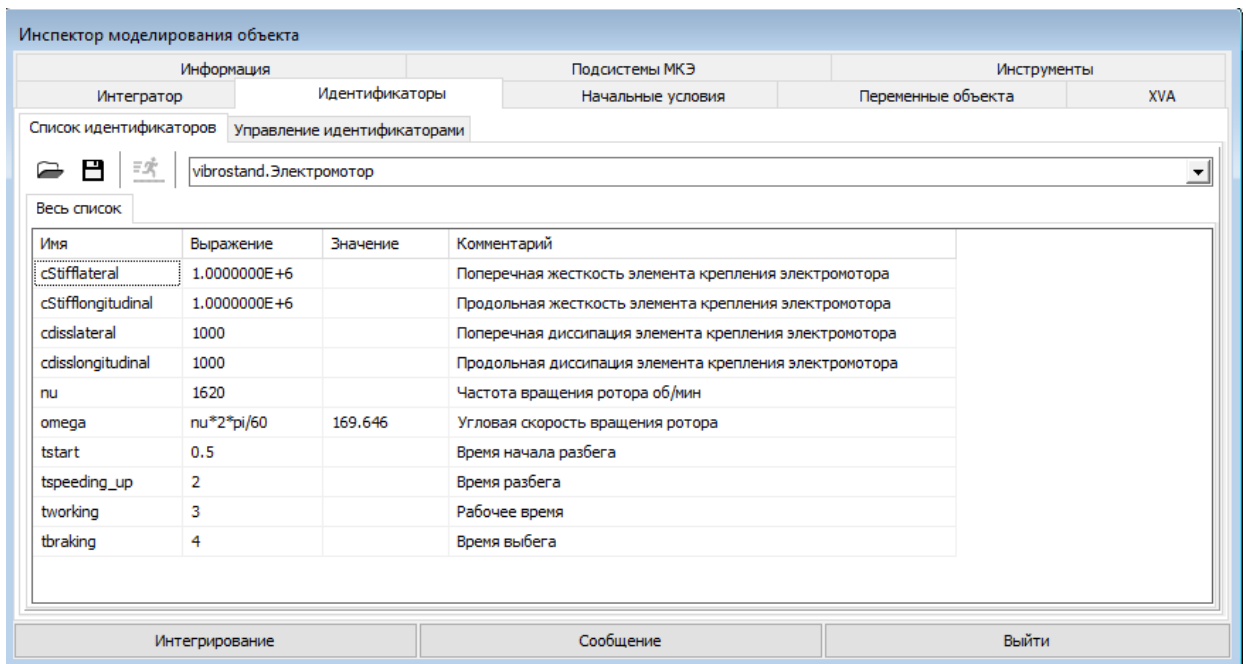
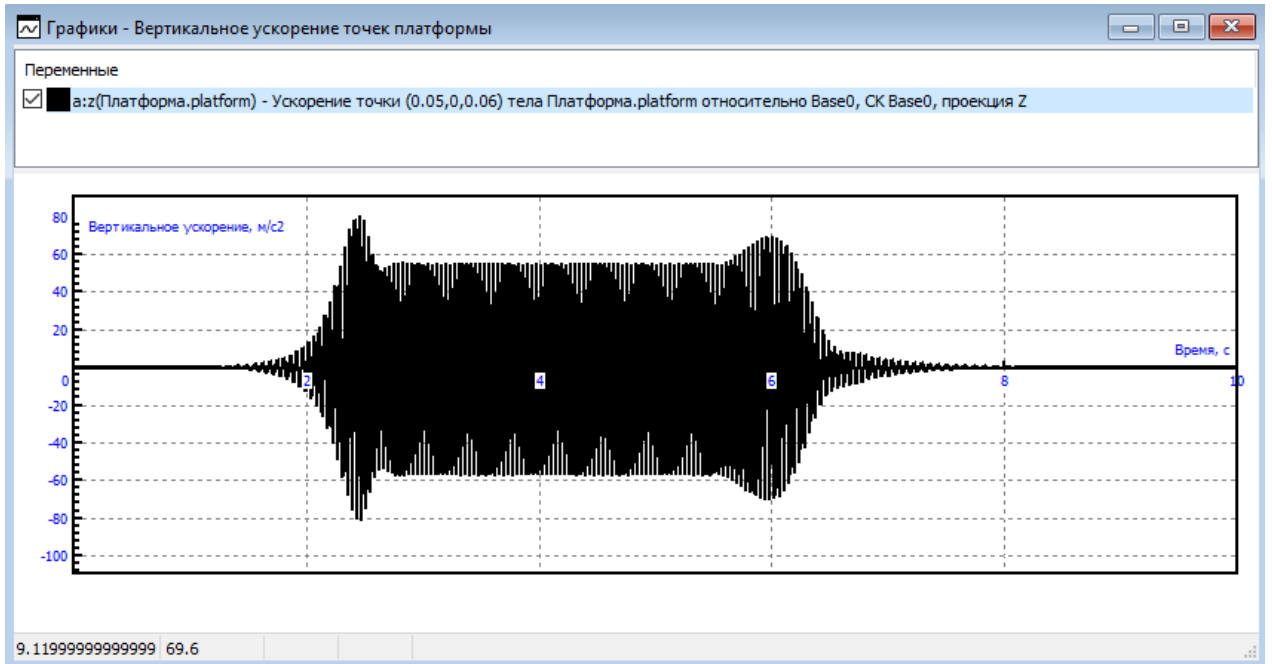
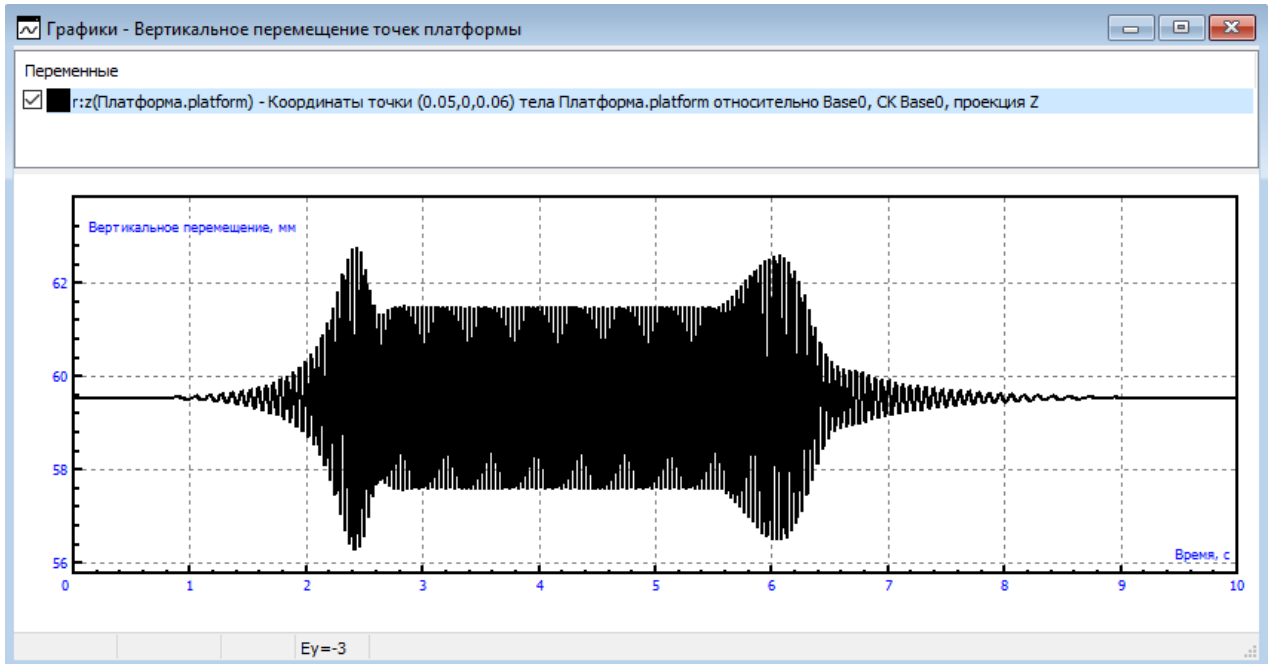


Рис. 2.70

11. Запустите процесс интегрирования уравнений движения (кнопка **Интегрирование**).
На рис. 2.71. представлены графические окна с графиками исследуемых переменных.



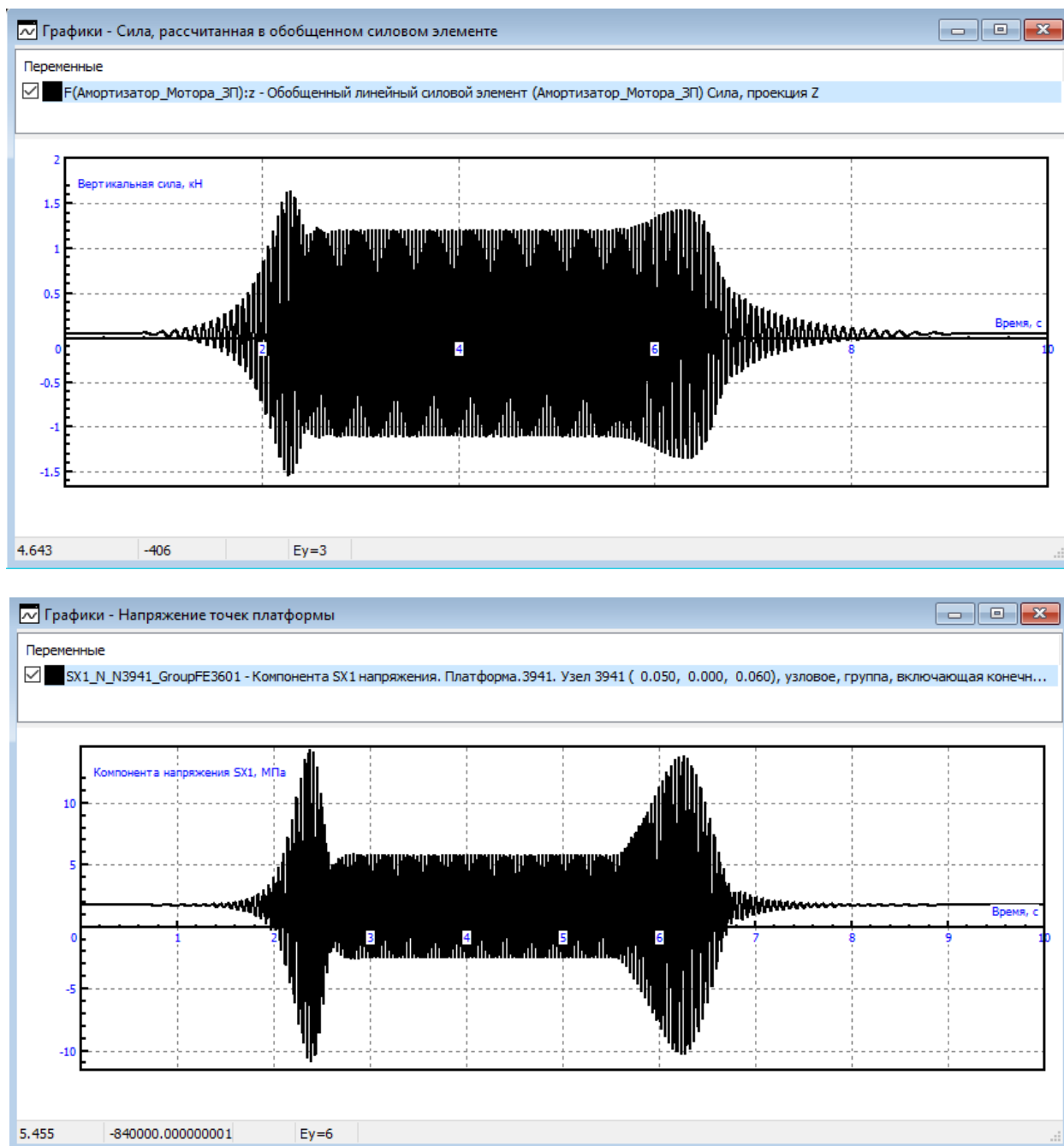


Рис. 2.71

Для оценки влияния упругости платформы на значения рассчитываемых переменных можно выполнить следующую последовательность действий.

12. Перед началом интегрирования включите флажок **Не учитывать упругость подсистемы** на вкладке **Подсистемы МКЭ | Моделирование инспектора**.
13. Выполните интегрирование.
14. С помощью контекстного меню графического окна скопируйте графики интересующих переменных как статические.
15. Отключите флажок **Не учитывать упругость подсистемы**.
16. Проведите повторное интегрирование. В графических окнах построятся те же самые графики, но уже с учетом упругости модели.
17. Оцените влияние упругости платформы по разности графиков.