



Модуль моделирования упругих тел

Начинаем работать

2010

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.....	7
1.2. Подготовка данных упругого шатуна	8
1.2.1. Работа в среде ANSYS и преобразование данных	8
1.2.2. Мастер подготовки данных упругих подсистем	11
1.3. Создание модели	18
1.3.1. Создание графических объектов.....	19
1.3.2. Создание тел	20
1.3.3. Добавление упругой подсистемы	21
1.3.4. Создание шарниров	22
1.3.5. Подготовка к моделированию.....	24
1.4. Моделирование динамики механизма.....	25
2. ЭЛЕКТРОМОТОР НА УПРУГОЙ ПЛАТФОРМЕ.....	33
2.1. Подготовка данных упругой платформы	35
2.1.1. Работа в среде ANSYS и преобразование данных	36
2.1.2. Мастер подготовки данных упругих подсистем	37
2.2. Создание модели.....	38
2.2.1. Добавление упругой платформы.....	38
2.2.2. Крепление упругой платформы к базе.....	38
2.2.3. Создание графических объектов.....	39
2.2.4. Создание силовых элементов.....	43
2.2.5. Создание модели электромотора	48
2.2.5.1. Добавление электромотора как подсистемы	48
2.2.5.2. Описание режимов вращения ротора.....	50
2.2.6. Крепление электромотора на платформе посредством силовых элементов	52
2.2.7. Подготовка к моделированию.....	53
2.2.8. Моделирование динамики вибростенда	54
2.2.8.1. Расчет положения равновесия и частот	55
2.2.8.2. Интегрирование уравнений движения.....	57

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 `{um_root}\manual` или скачать по адресу: http://www.umlabor.ru/download/60/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 тела¹. 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

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.umlabor.ru/download/60/rus/gs_um.pdf

UMInput.exe. 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**.

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 Simulation**, выберите пункт меню **Помощь / О программе**. В разделе **Конфигурация** вы найдете список установленных модулей.

¹ Определение понятий «собственная форма» и «статическая форма», а также алгоритм преобразований приводится в главе 11 руководства пользователя ПК «Универсальный механизм», (11_UM_FEM.pdf)

1. Кривошипно-ползунный механизм

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

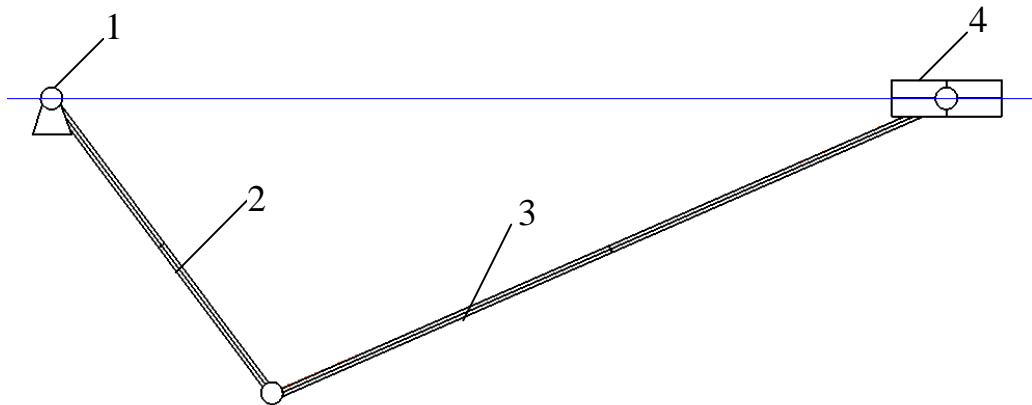


Рис. 1.1 Схема кривошипно-ползунного механизма: 1 – база, 2 – кривошип, 3 – шатун, 4 – ползун.

В каталоге `{um_root}\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. 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 **{um_root}\Samples\Flex\flexbeam\input.fum** в каталог **.\flexbeam** и перейти к изучению п. 1.2.2 настоящего руководства.
- Если пользователь желает пропустить изучение всех этапов подготовки данных упругого шатуна, нужно скопировать файл **{um_root}\Samples\Flex\flexbeam\input.fss** в каталог **.\flexbeam** и перейти к изучению п. 1.3 настоящего руководства.

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 **{um_root}\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 **.\apdl** 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:\um60\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:\um60\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 `{um_root}\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 `{um_root}\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 балки¹. 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.

¹ Определение понятия и описание назначения интерфейсных узлов приводятся в главе 11 руководства пользователя ПК «Универсальный механизм» (part11.pdf).

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_root}\bin**.
5. На вкладке **Основные** укажите файл результатов **.\flexbeam\flexbeam.rst** и каталог для сохранения данных **.\flexbeam** (рис. 1.2).

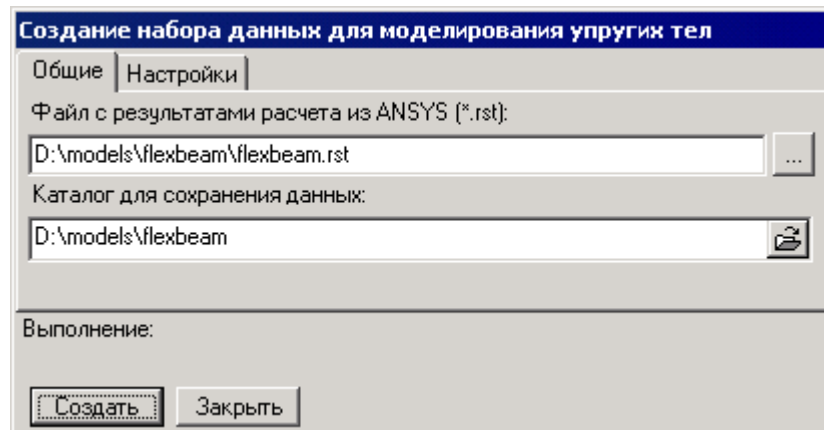


Рис. 1.2.

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

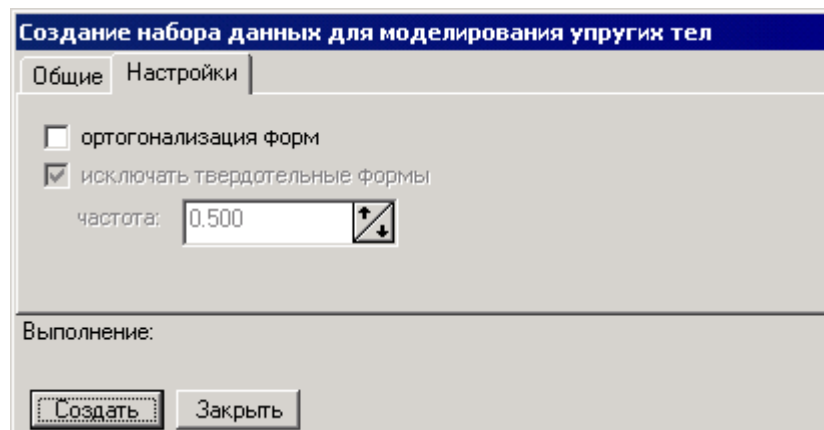


Рис. 1.3.


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 **Заккрыть**.

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 **UMInput.exe**.
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 .

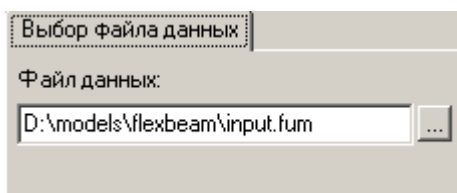


Рис. 1.4.

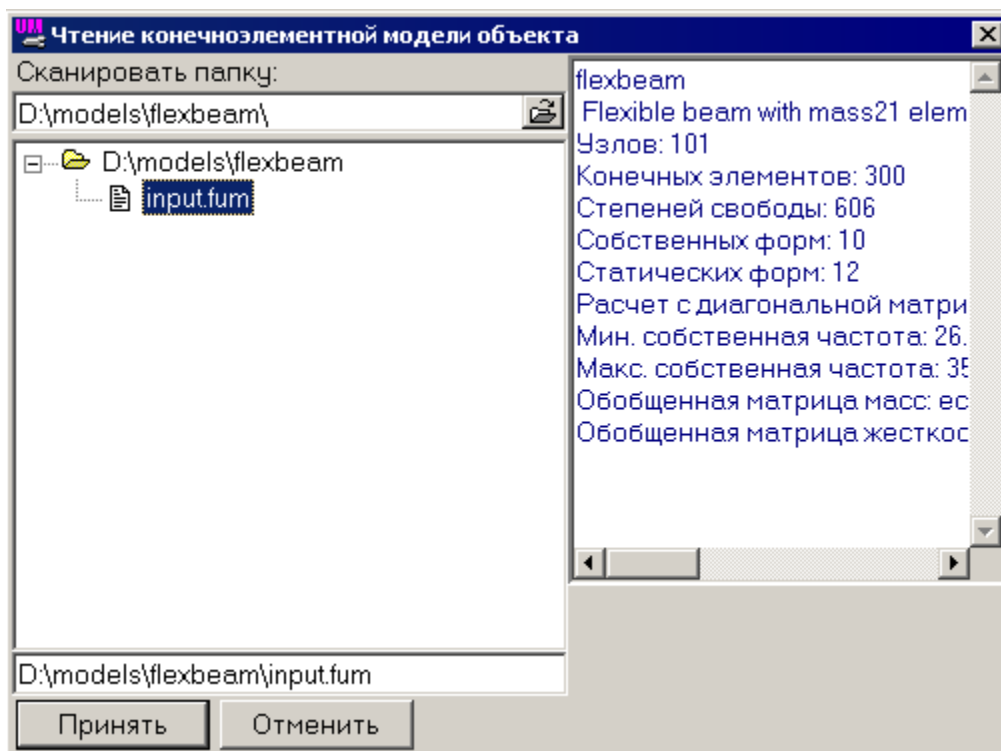


Рис. 1.5.

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).

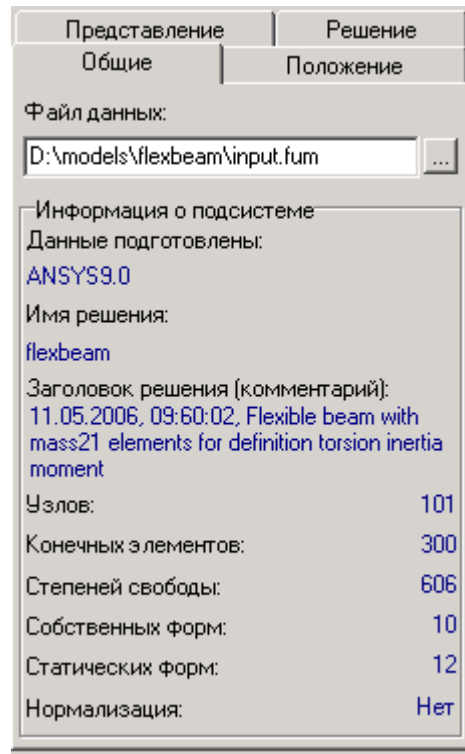


Рис. 1.6.

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 закладки **Представление** как это показано на рисунке 1.8.

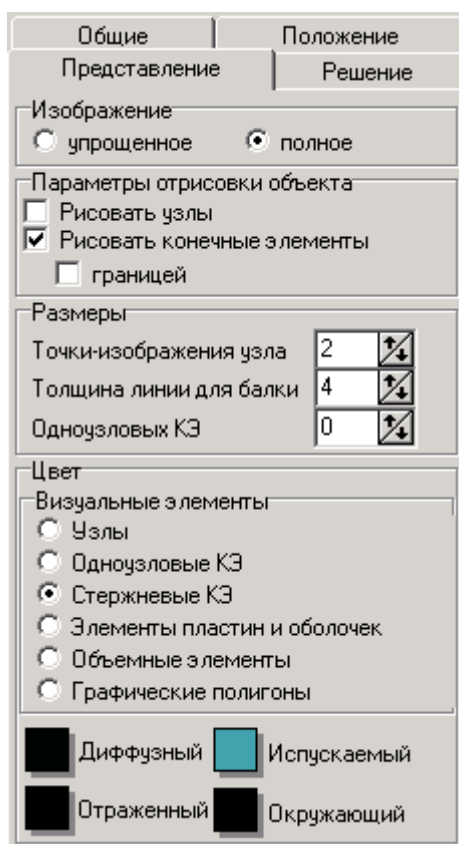


Рис. 1.8.

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.

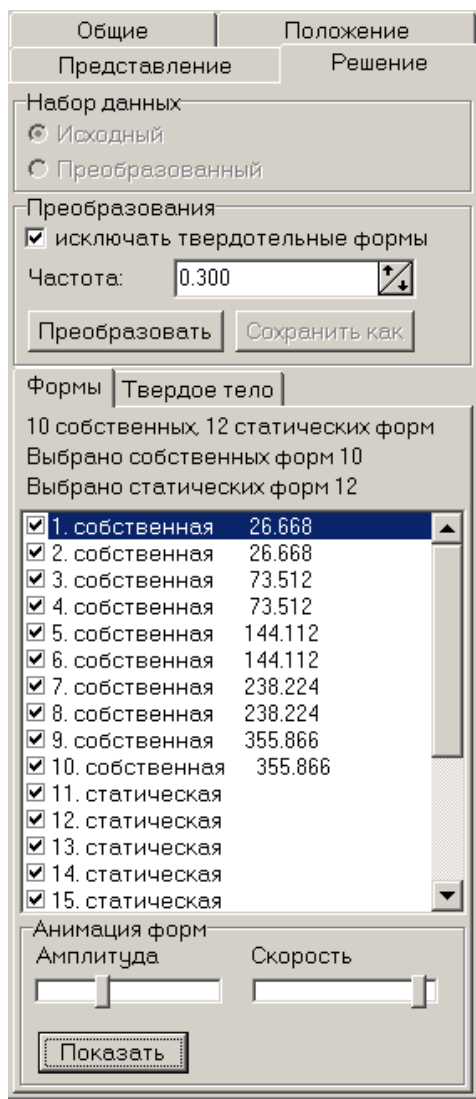


Рис. 1.9.

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

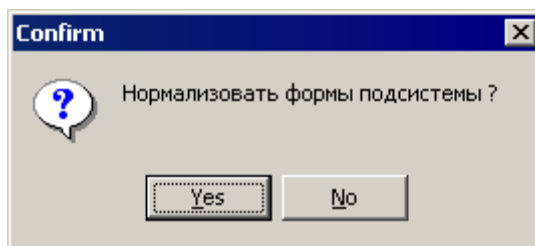


Рис. 1.10.

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).

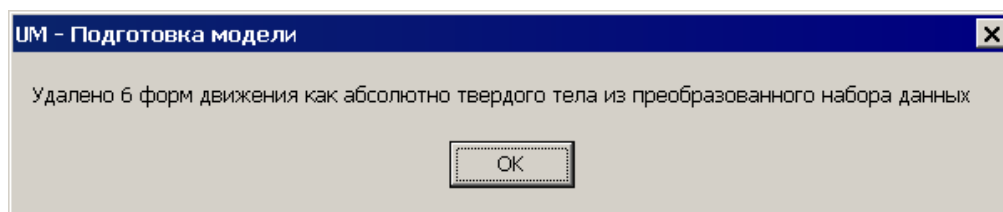


Рис. 1.11.

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).

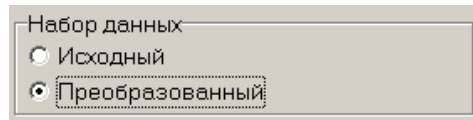


Рис. 1.12.

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**.

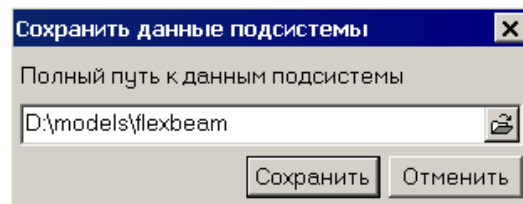


Рис. 1.13.

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 `{um_root}\bin\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).

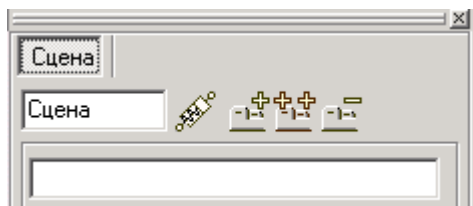


Рис. 1.14.

3. Повторите еще дважды эти действия для файлов **Crank1.umi** и **Slider1.umi**, расположенных в каталоге `{um_root}\bin\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).

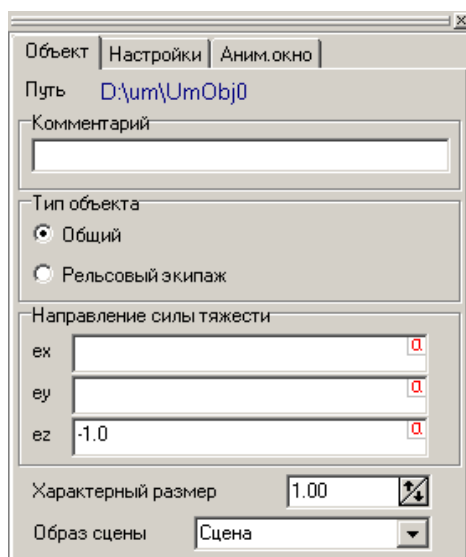


Рис. 1.15.

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 закладку **Параметры** и установите флажок **Вычислять автоматически**, после чего рассчитаются инерционные параметры (рис. 1.16).

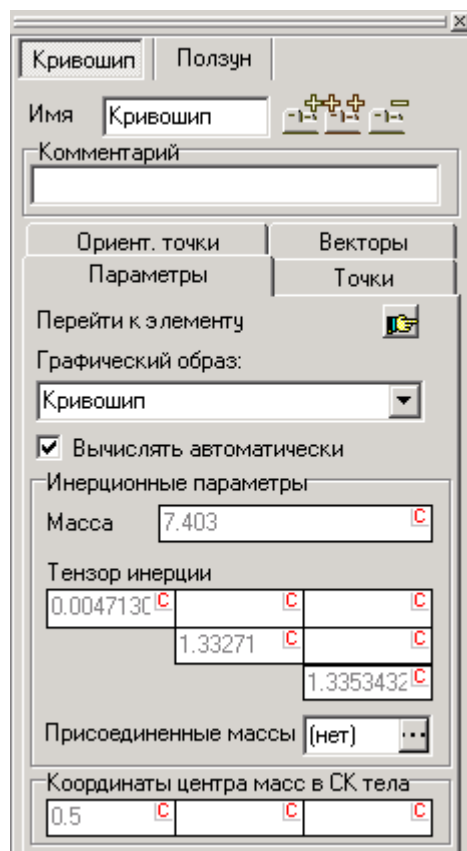



Рис. 1.16.

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 закладки **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).

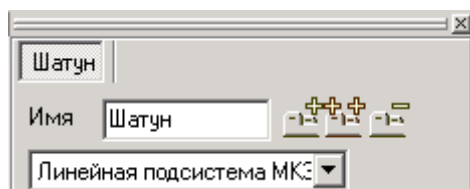



Рис. 1.17.

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 .

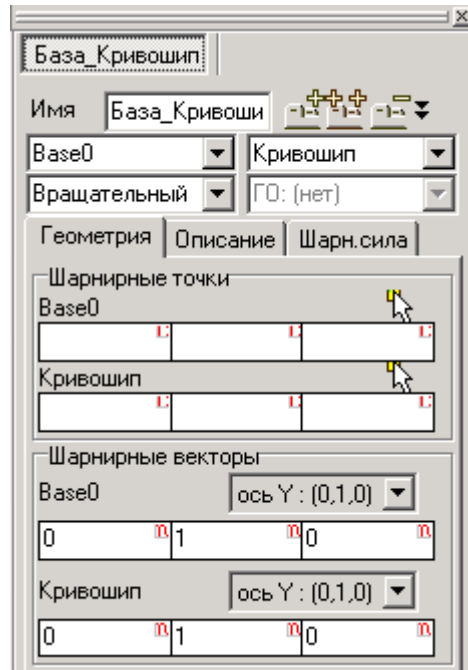


Рис. 1.18.

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

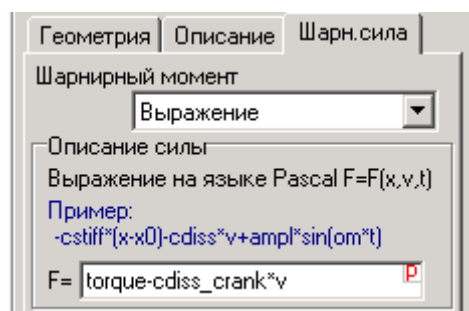


Рис. 1.19.

5. Добавьте остальные шарниры механизма как показано на рис. 1.20.

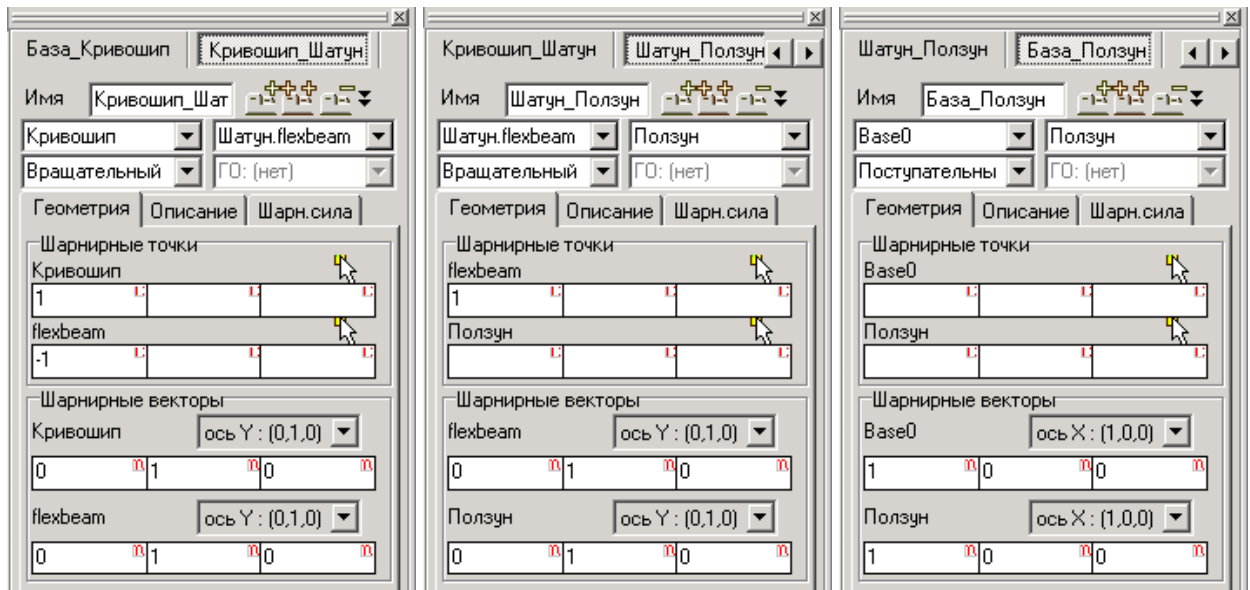


Рис. 1.20.

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**.

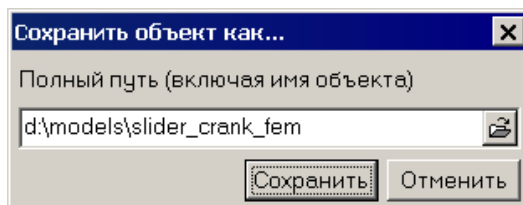


Рис.1.21.

2. Если используется численно-итерационный синтез уравнений, то данный пункт следует опустить. Если уравнения движения синтезируются в символьной форме, синтезируйте и откомпилируйте уравнения движения механизма, пункт меню **Объект/Синтезировать уравнения**. В диалоге **Синтез и компиляция уравнений движения** установите флажок **Компилировать уравнения** (рис. 1.22). При необходимости измените **Язык выходных файлов** в соответствии с используемым Вами компилятором. Нажмите кнопку **Синтезировать**.

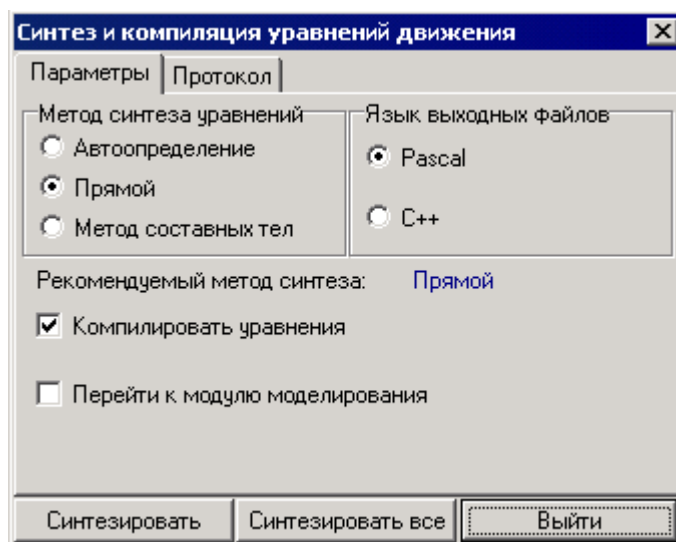


Рис.1.22.


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

Рассчитаем начальные условия.

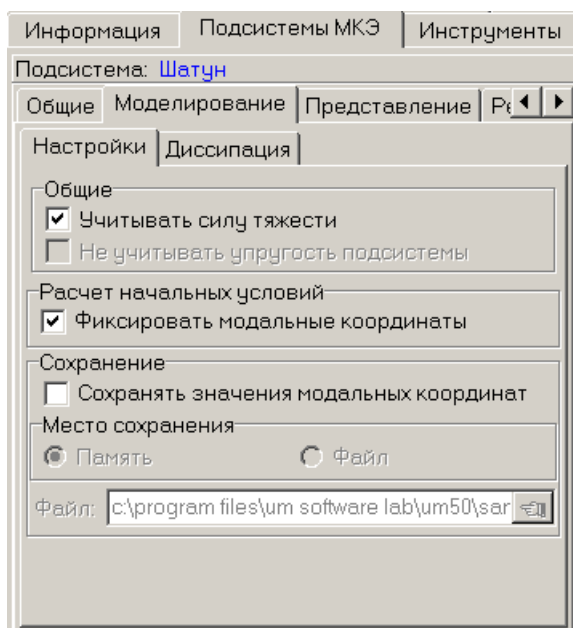




Рис.1.23

4. В **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на закладку **Подсистемы МКЭ | Моделирование | Настройки** включите флажок **Фиксировать модальные координаты** (рис.1.23).

5. Перейдите на закладку **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.

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

6. Убедитесь в том, что включен режим замыкания разрезанных цепей – нажата кнопка  в верхней части вкладки. В противном случае нажмите указанную кнопку. Выполните расчет начальных условий с помощью кнопки . Изображение механизма после расчета показано на рис. 1.25.

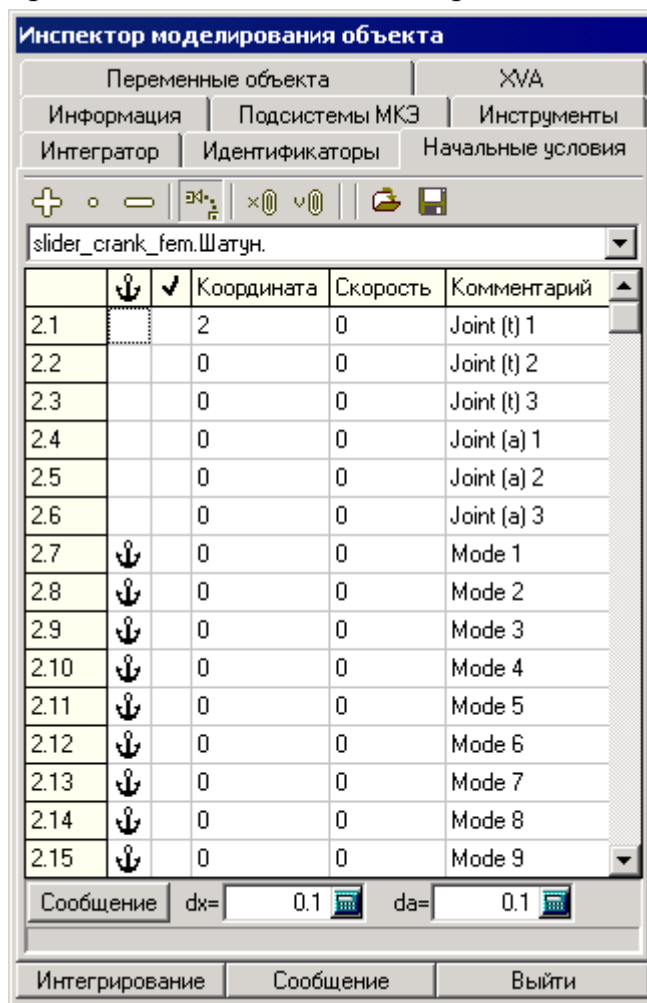


Рис.1.24.

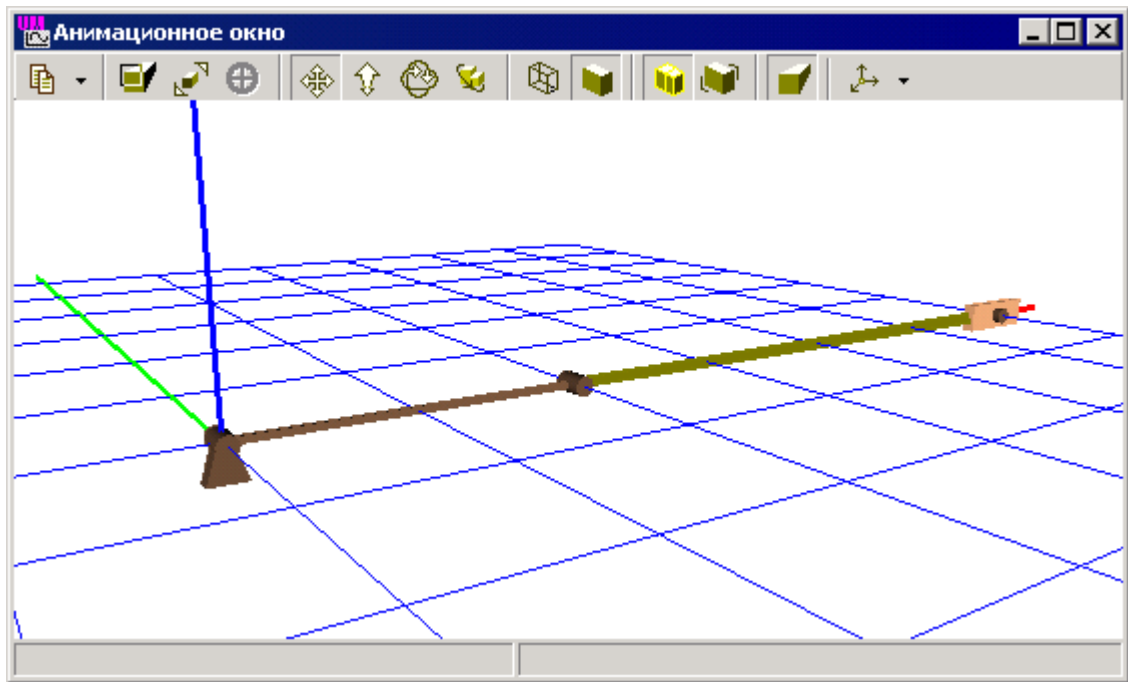


Рис.1.25.

7. Откройте новое графическое окно (меню **Инструменты** | **Графическое окно**).
8. 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. 1.26. Созданные переменные перенесите мышкой в графическое окно.

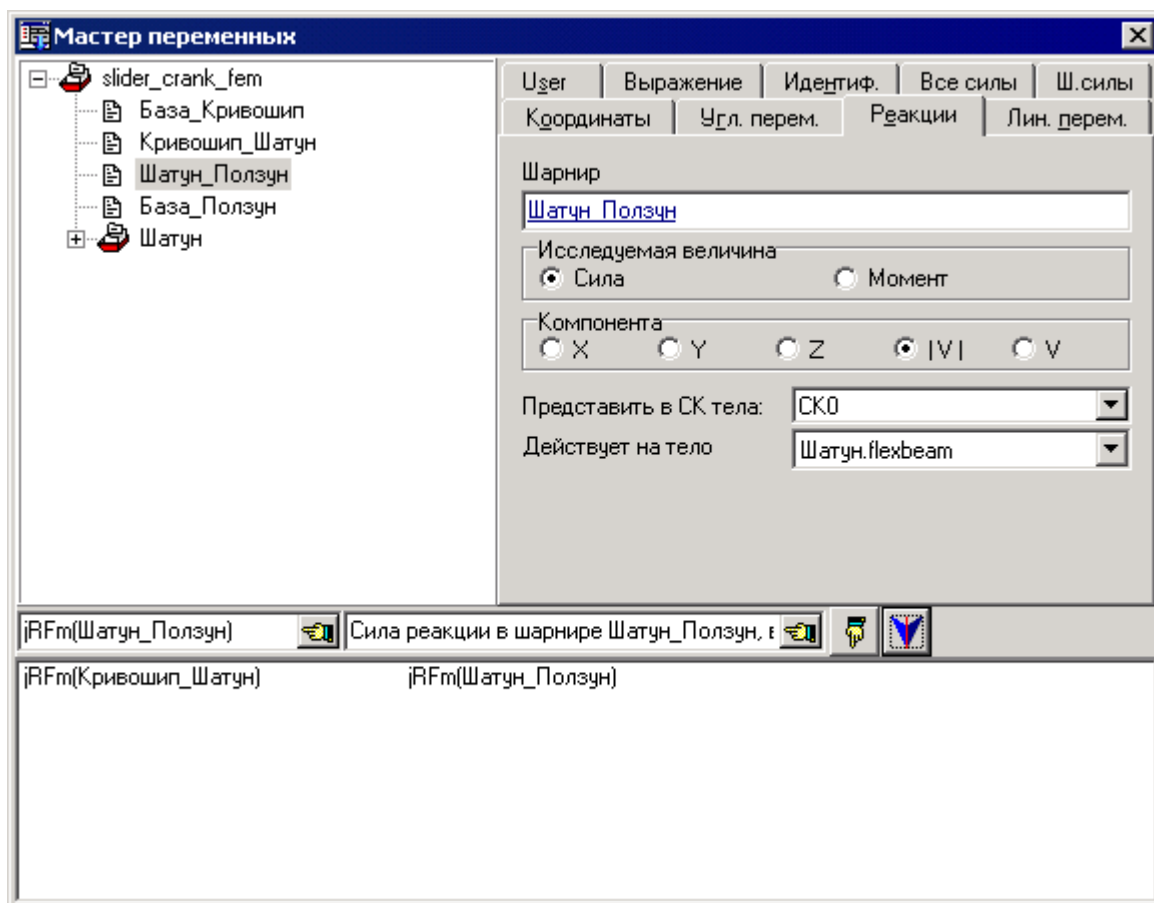


Рис. 1.26.

9. В **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на закладку **Интегратор** и установите следующие параметры, см. рис. 1.27:

- 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.

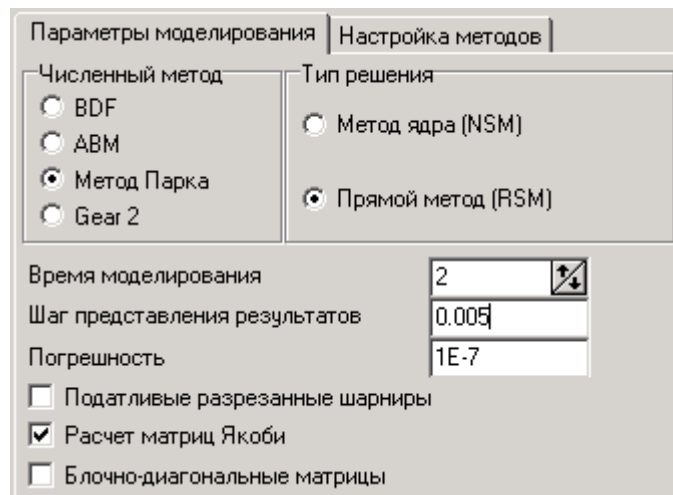


Рис. 1.27.

10. Перейдите на закладку **Подсистемы МКЭ | Моделирование | Настройки**. Флажок **учитывать силу тяжести** должен быть включен. Перейдите на закладку **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. 1.28).

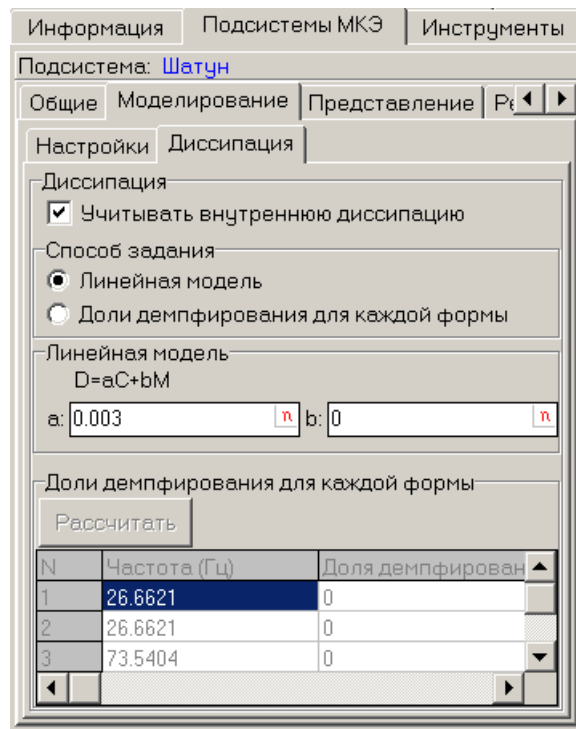


Рис. 1.28.

11. Запустите процесс интегрирования уравнений движения (кнопка **Интегрирование**). На рис 1.29 представлено изображение кривошипно-ползунного механизма в анимационном окне в некоторый момент времени.

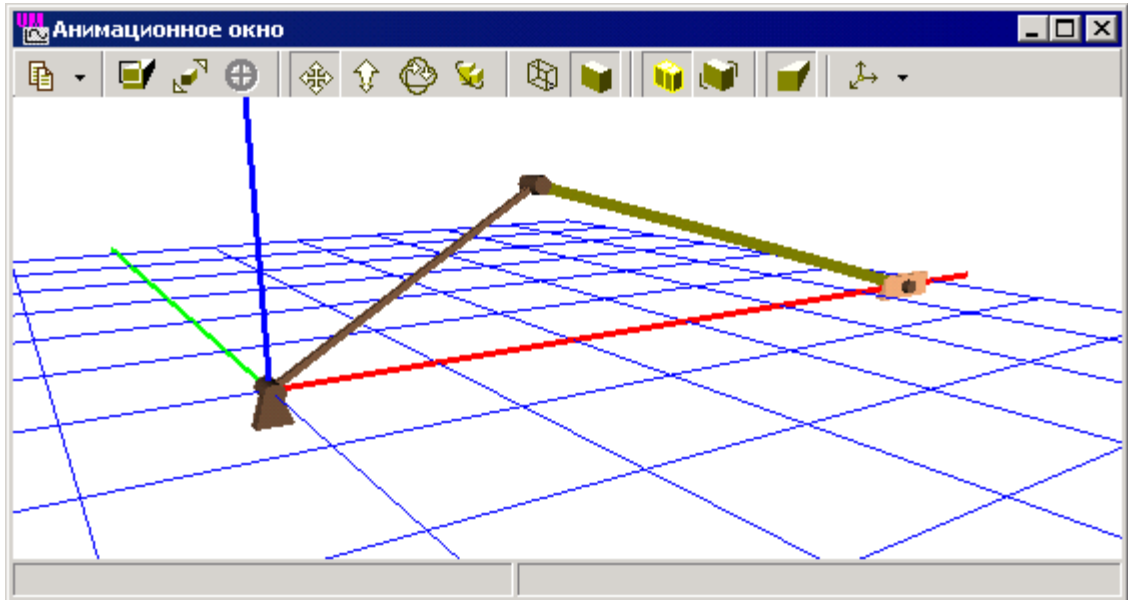


Рис. 1.29. Изображение кривошипно-ползунного механизма в процессе интегрирования уравнений движения

Графики модулей сил реакций изображены на рис 1.30.

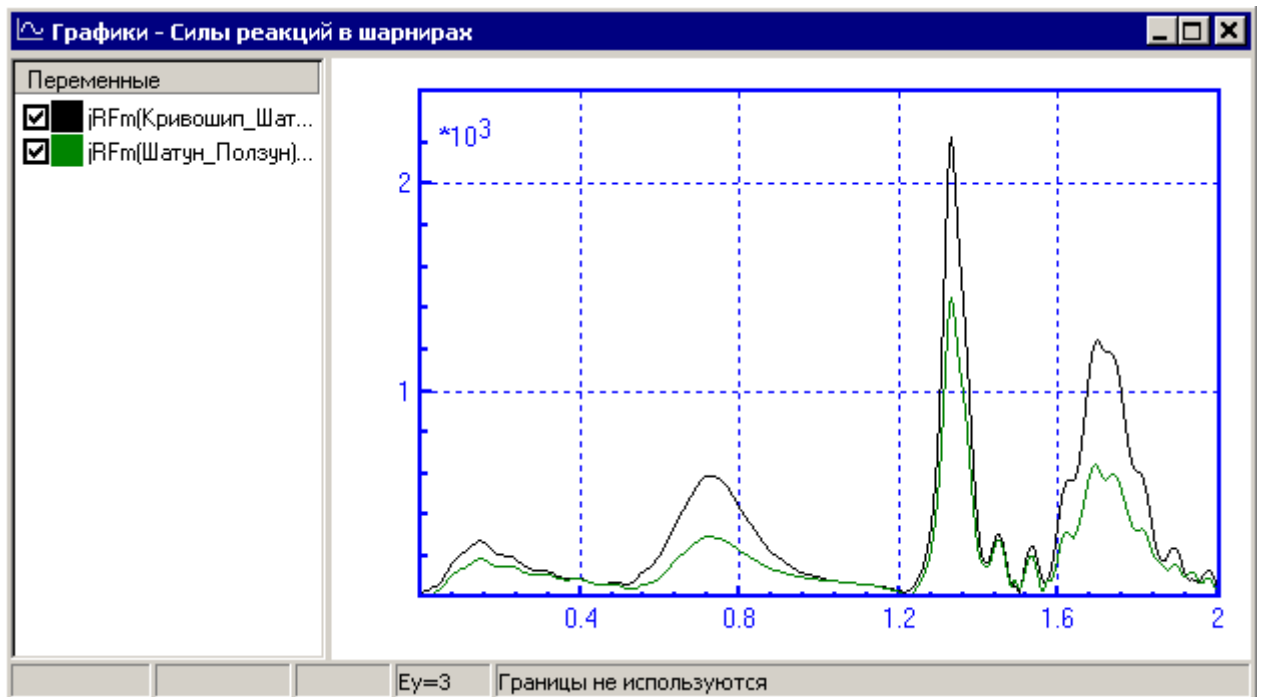


Рис. 1.30.

Для оценки влияния упругости шатуна на расчет сил реакций рассмотрите модель {um_root}\Samples\Flex\Slider_crank_all. Пример графиков, построенных с использованием этой модели, представлен на рис. 1.31.

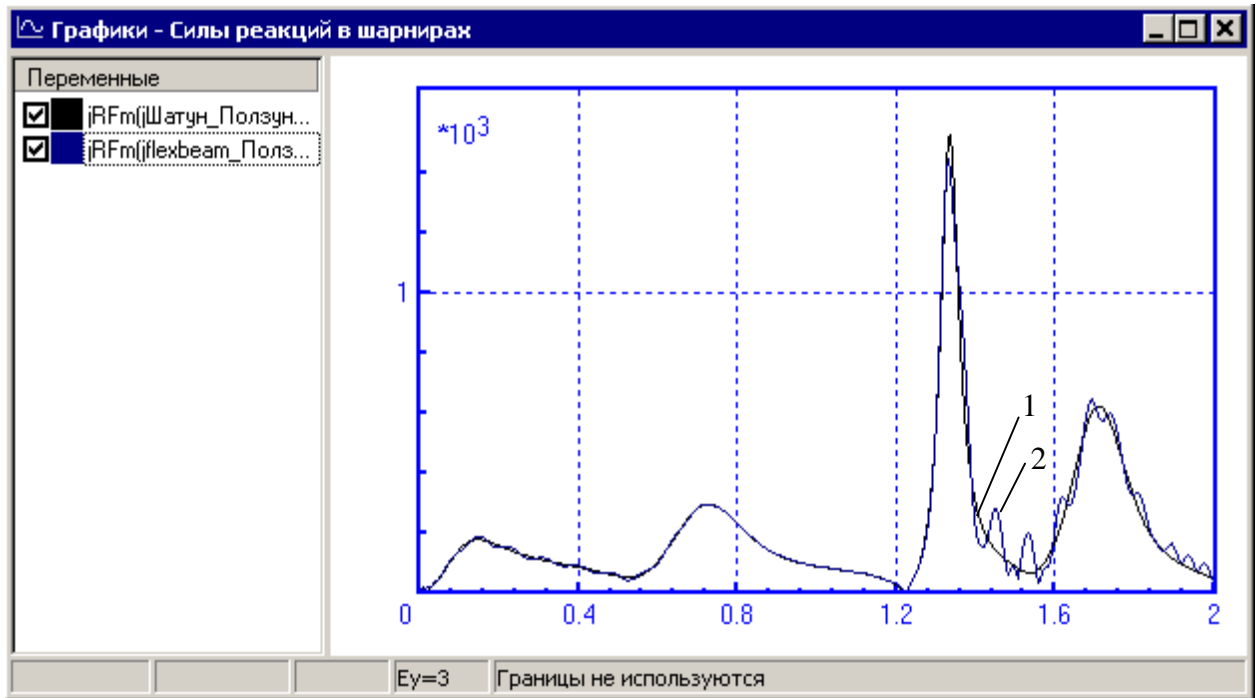


Рис. 1.31. Модуль сил реакция в шарнире шатун-ползун: 1 – шатун – абсолютно твердое тело, 2 – упругий шатун.

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.

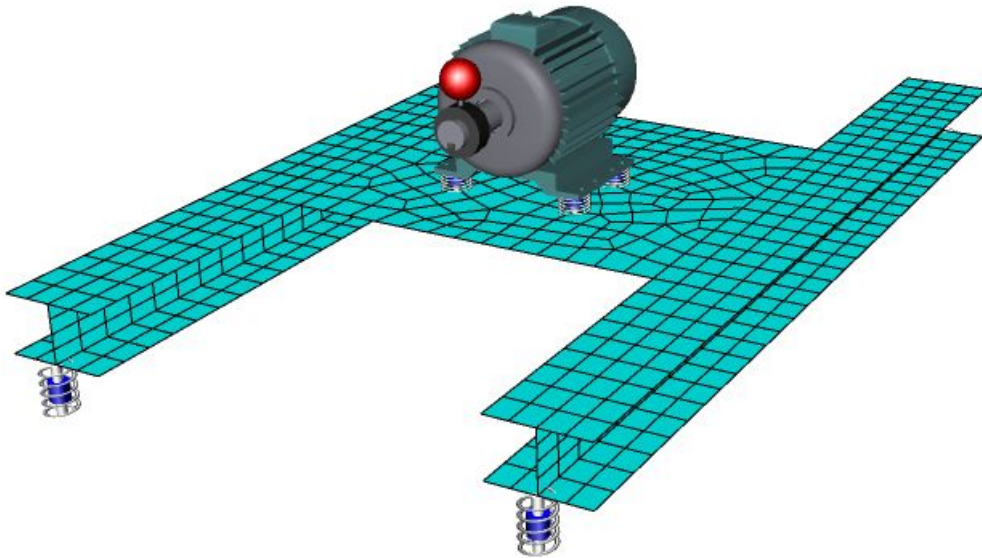


Рис. 2.1.

Она включает упругую платформу, которая крепится к базе посредством четырех упругих и четырех 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.

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.

- Подготовку данных упругой платформы.

- Добавление в модель упругой платформы как линейной подсистемы МКЭ.
- Крепление упругой платформы к базе, посредством линейных силовых элементов.
- Создание модели электромотора.
- Добавление в модель электромотора как внешней подсистемы.
- Крепление электромотора 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:

- 1) непосредственное создание файла **input.fss** программой **ANSYS_UM.exe**, которая выполняется после проведения расчетов в программе **ANSYS**;
- 2) создание промежуточного файла **input.fum**, программой **ANSYS_UM.exe** и последующее преобразование данных **Мастером подготовки данных упругих подсистем**, который является составной частью программы **UMInput.exe**. Он предоставляет возможности просмотра рассчитанных упругих форм подсистемы, а также исключения части форм из результирующего набора данных, сохраняемых в файле **input.fss**.

В каталоге **{um_root}\Samples\Flex\vibrostand\platform** расположены файлы **input.fss**, **input.fum** и **platformshell63.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 **{um_root}\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 **{um_root}\Samples\Flex\vibrostand\platform** в каталог **.\platform** и перейти к изучению п. 2.1.2 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 **platformshell63.ans** из каталога **{um_root}\tutorial\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 **platformshell63.ans**.

В результате будет создана стальная платформа, состоящая 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 886 элементов 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 базе.¹ 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 **{um_root}\bin**.
5. Выполните преобразование данных с помощью программы **ANSYS_UM.exe** аналогично этапам 5-8, описанным в п. 1.2.1 для упругого шатуна.

¹ определение понятия и описание назначения интерфейсных узлов приводятся в главе 11 руководства пользователя UM (11_UM_FEM.pdf).


2.1.2. 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. 2.2).

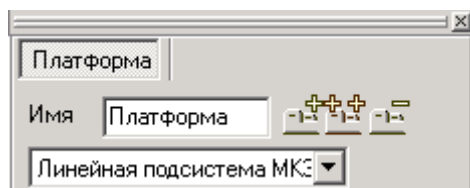



Рис. 2.2.

2.2.2. Крепление упругой платформы к базе

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

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 **Пружина** (рис. 2.3).

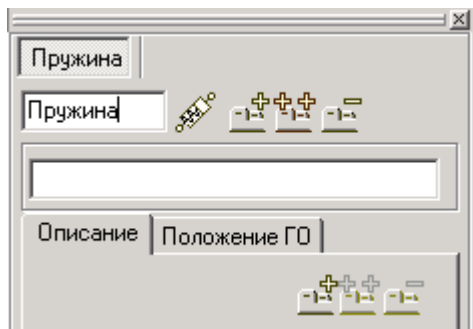



Рис. 2.3.

4. Добавьте новый графический элемент кнопкой  на нижней панели (рис. 2.4).

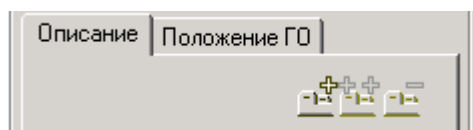


Рис. 2.4.

5. Выберите **Параметрический** в появившемся списке типов графических элементов (рис. 2.5).

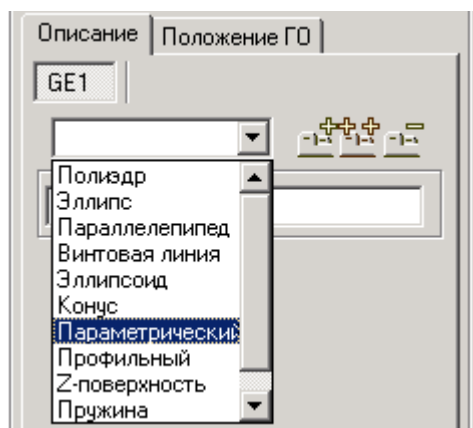


Рис. 2.5.

6. Выберите **Пружина** в появившемся списке стандартных видов параметрических графических элементов (рис. 2.6)

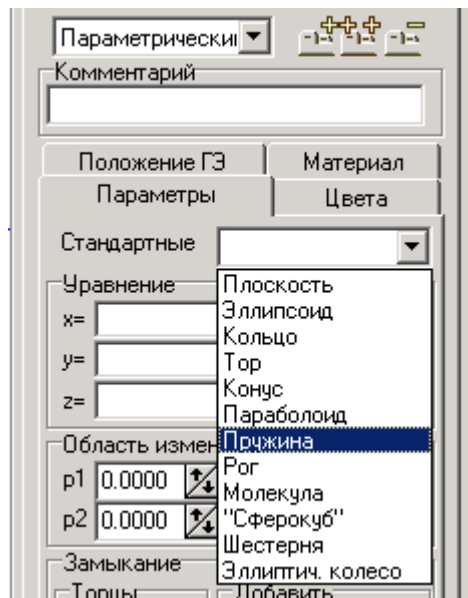


Рис. 2.6.

7. Задайте значения параметров в соответствии с рис. 2.7

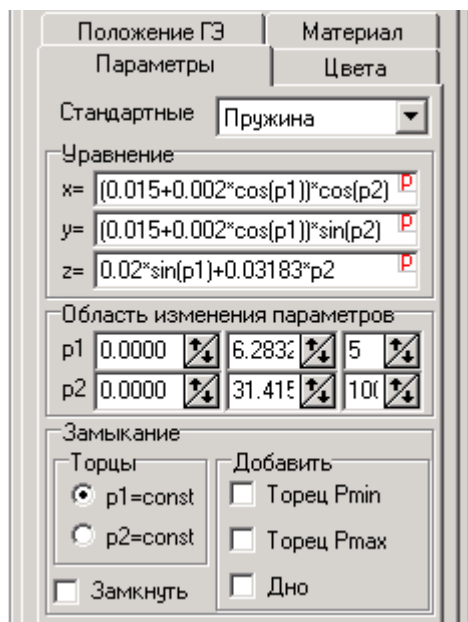
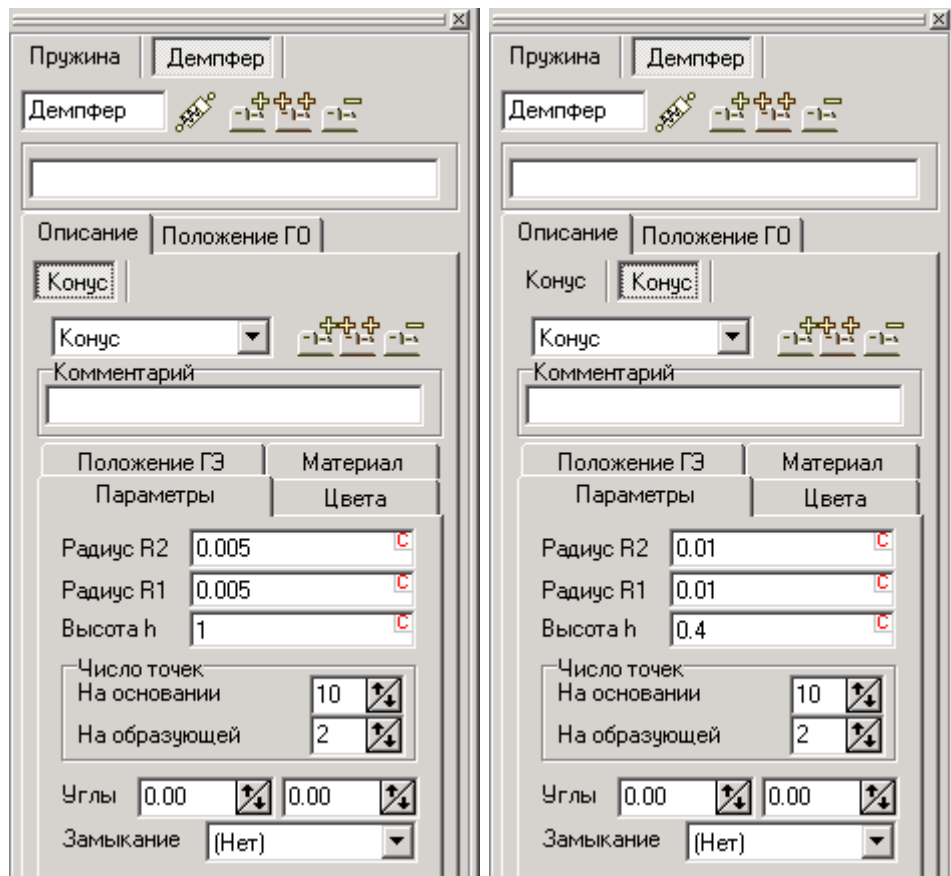


Рис. 2.7.

Введем графический объект для диссипативного силового элемента.

1. Добавьте новый графический объект.
2. Присвойте новому графическому объекту имя **Демпфер**
3. Добавьте новый графический элемент.
4. Назначьте ему тип **Конус** и задайте параметры в соответствии с рис. 2.8а.



a)

b)

Рис. 2.8.

5. Добавьте второй графический элемент **Конус** и задайте значения параметров в соответствии с рис. рис. 2.8b.
6. Перейдите на закладку **Положение ГЭ** и в поле **Сдвиг | z** задайте значение **0.3**.
7. Перейдите на закладку **Цвет** и задайте диффузный компонент цвета графического элемента кнопкой **Диффузный** (рис. 2.9)

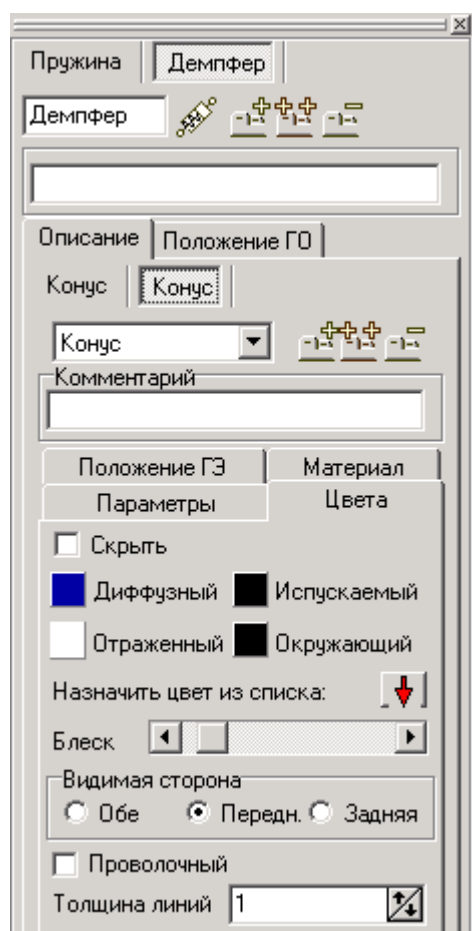


Рис. 2.9.


Графические объекты созданы, перейдем к заданию силовых элементов.

2.2.4. Создание силовых элементов

Для задания координат точек прикрепления силовых элементов введем следующие идентификаторы:

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

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 **ПружинаПЛ** (передняя, левая), тип силового элемента **Упругий**, взаимодействующие тела **Base0-Платформа.Platform**, графический объект **Пружина**, рис. 2.10.
4. Задайте координаты точки прикрепления силового элемента к первому телу **Base0**:

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

При первом вводе символьных идентификаторов будут появляться диалоги, в которых следует задать значения переменных (рис. 2.11).

Задайте значения:

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

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. 2.10):

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

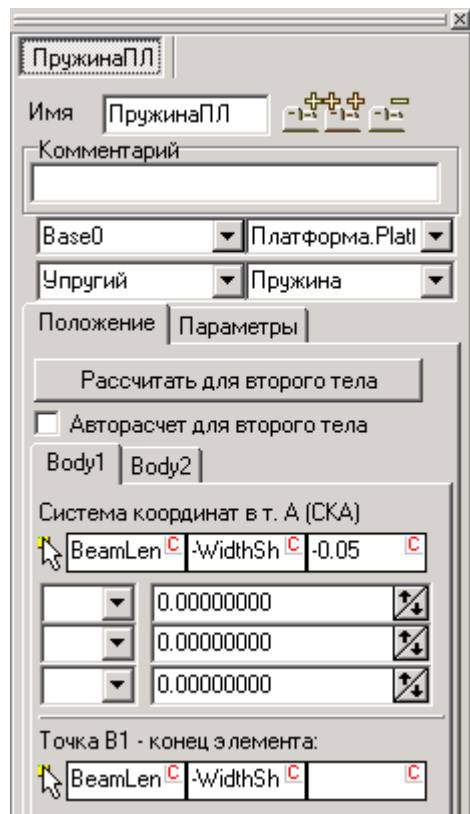


Рис. 2.10.

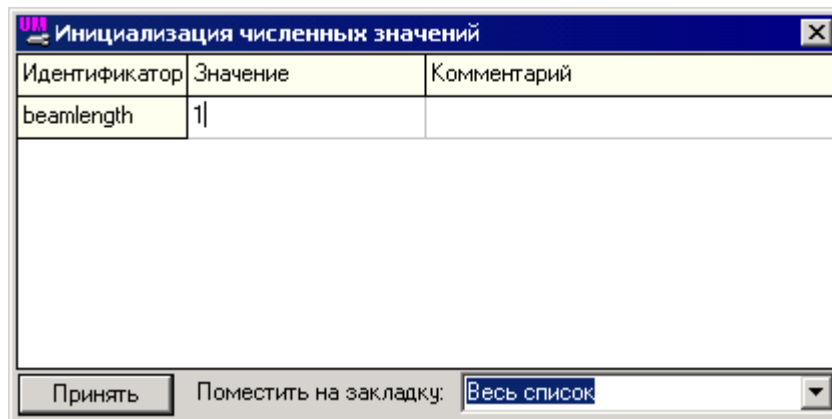



Рис. 2.11.

7. Определим матрицу жесткости силового элемента. Перейдите на закладку **Параметры**. Нажмите кнопку  в поле **Матрица жесткостей**, в появившемся диалоге задайте диагональные элементы, соответствующие поступательным степеням свободы (рис. 2.13), и нажмите кнопку ОК. При вводе идентификаторов в появляющихся диалогах задайте следующие значения: **cxx=1E6, cyu=1E6, czz=1E6** (Н/м).

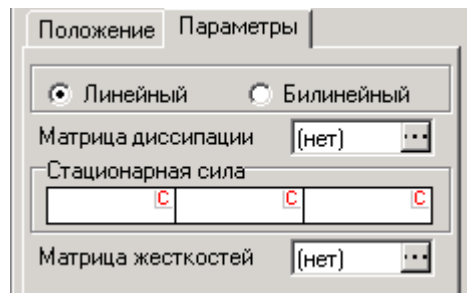


Рис. 2.12.

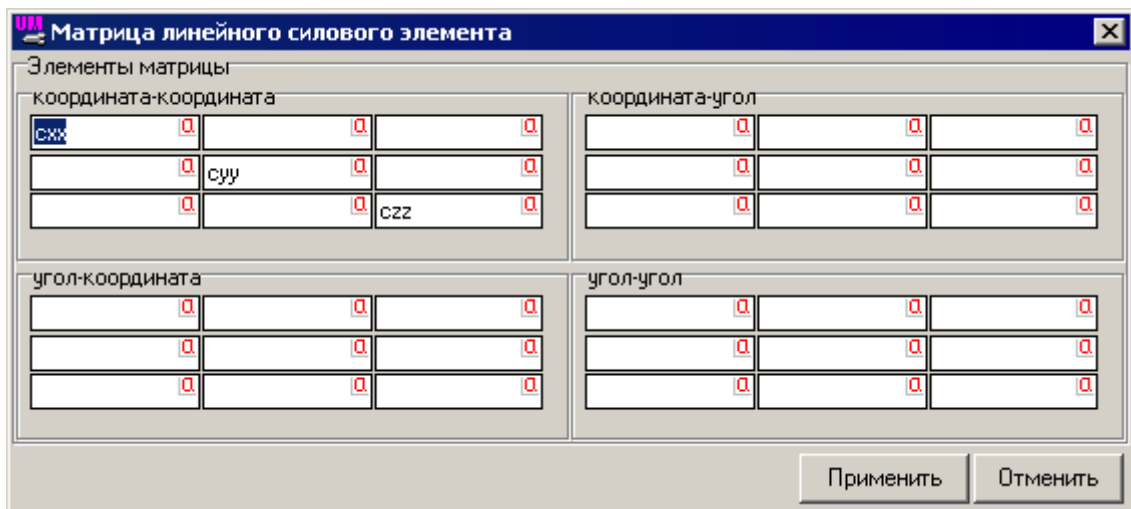



Рис. 2.13.

Описание упругого силового элемента закончено.

Опишем передний левый диссипативный элемент.

1. Добавьте новый силовой элемент кнопкой  инспектора.
2. Назначьте имя **ДемпферПЛ** (передний, левый), тип силового элемента **Диссипативный**, взаимодействующие тела **Base0-Платформа.Platform**, графический объект **Демпфер** (рис. 2.14).
3. Задайте координаты точек прикрепления к первому и второму телам аналогично точкам для упругого элемента **ПружинаПЛ** (рис. 2.14).

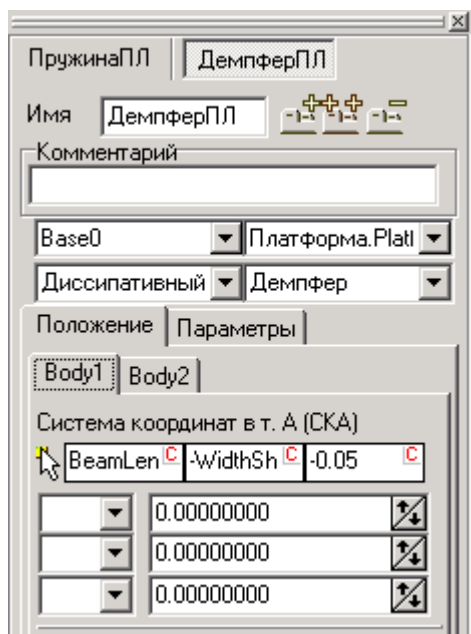





Рис. 2.14.

4. Определим матрицу диссипации силового элемента. Нажмите кнопку  в поле **Матрица диссипации** и в появившемся диалоге задайте диагональные элементы, соответствующие поступательным степеням свободы: **dxx**, **dyu**, **dzz**. Нажмите кнопку **ОК**. При первом вводе идентификаторов в появляющихся диалогах задайте значения: **dxx=1e+3**, **dyu=1e+3**, **dzz=1e+3** (Нс/м).

Описание диссипативного силового элемента закончено.

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.

1. Выбор введенного ранее силового элемента, имеющего одинаковый тип, с элементом, который планируется создать. Например, для упругого силового элемента – **ПружинаПЛ**.
2. Копирование элемента кнопкой .
3. Редактирование имени элемента. Например, **ПружинаПП** (передняя, правая).
4. Задание координат точек прикрепления. Для элемента **ПружинаПП**
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):


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

Таким образом, полный список силовых элементов, соединяющих упругую платформу с базой должен включать следующие элементы: **ПружинаПЛ, ДемпферПЛ, ПружинаПП, ДемпферПП, ПружинаЗЛ, ДемпферЗЛ, ПружинаЗП, ДемпферЗП.**

2.2.5. Создание модели электромотора

В настоящем пункте мы не будем рассматривать создание модели электромотора, а воспользуемся данными каталога `{um_root}\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) `{um_root}\Samples\Flex\electricmotor` (рис. 2.15).

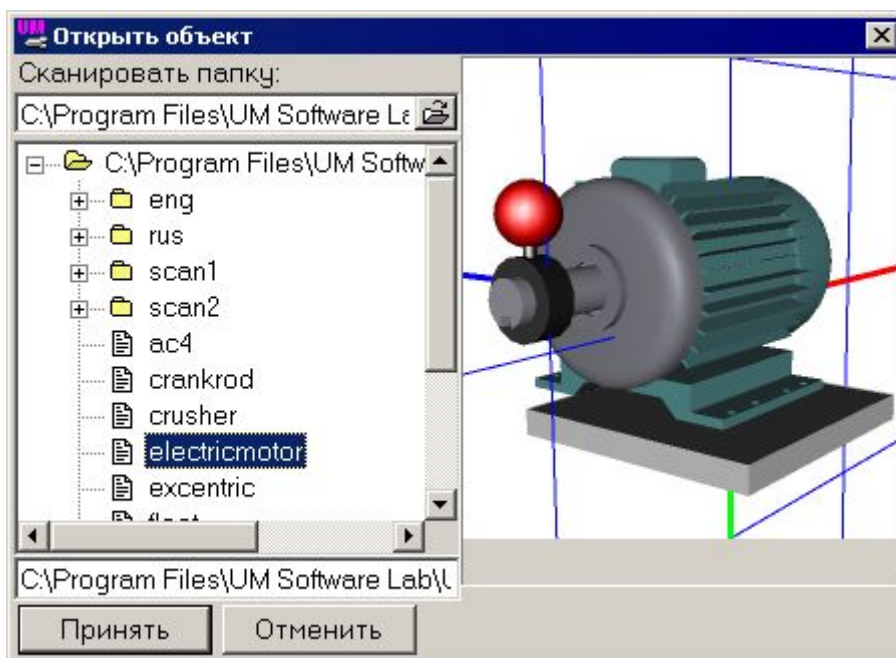


Рис. 2.15.

3. Задайте имя подсистемы – **Электромотор**.
4. Перейдите на закладку **Положение** и задайте значения, согласно рис. 2.16.

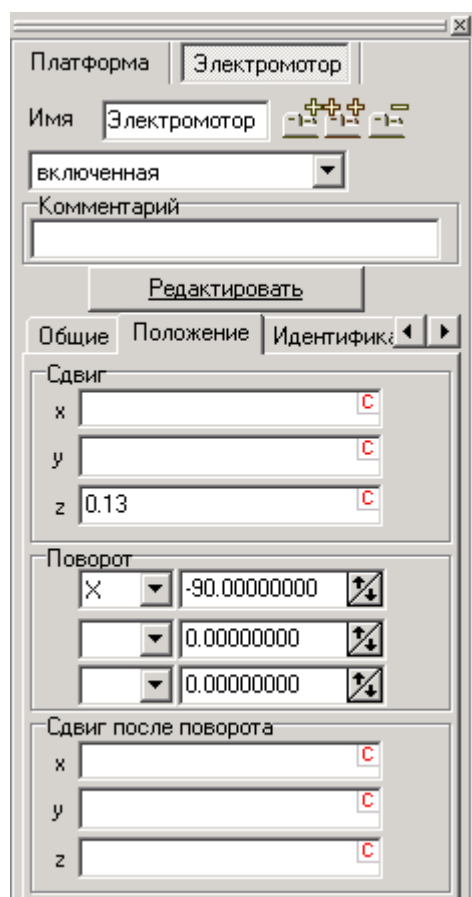


Рис. 2.16.

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. 2.17). Для описания режимов введены шесть переменных, представленных в таблице 1. Значение переменной **omega** рассчитывается по значению **nu**.

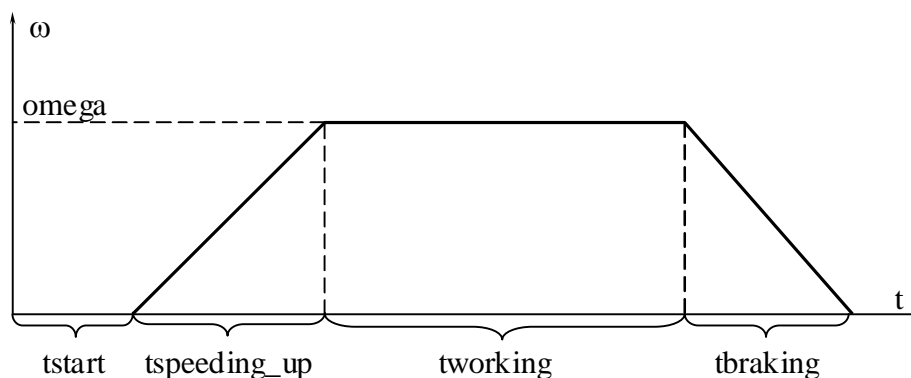


Рис. 2.17. Закон изменения угловой скорости вращения ротора

Таблица 1. Переменные для описания вращения ротора электродвигателя.

№	Наименование переменной	Обозначаемая величина
1	nu	Частота вращения ротора, об/мин.
2	omega	Угловая скорость вращения ротора в рабочем режиме
3	tstart	Время начала разбега (включения мотора)
4	tspeeding_up	Время разбега
5	tworking	Рабочее время
6	tbraking	Время выбега (торможения после выключения мотора)

1. Перейдите в режим редактирования подсистемы **Электромотор**, нажав клавишу **Редактировать** (рис. 2.16). Откроется новый **Конструктор объекта** для электромотора.
2. Выберите **Шарниры | jРотор->Корпус** в дереве элементов объекта. Шарнир имеет тип **Обобщенный**.
3. В инспекторе данных выберите элементарное преобразование **RTx** (рис. 2.18). Закон вращения ротора задан функцией типа **Расписание**, состоящего из пяти пунктов, представленных в таблице 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	$(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{t-tstart}/2$
3	tstart+tspeeding_up+tworking	$(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{tspeeding_up}/2+\omega*(t-tstart-tspeeding_up)$
4	tstart+tspeeding_up+tworking+tbraking	$(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{tspeeding_up}/2+\omega*tworking+\omega*(t-tstart-tspeeding_up-tworking)-(\omega/tbraking)*\sqrt{t-tstart-tspeeding_up-tworking}/2$
5	100	$(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{tspeeding_up}/2+\omega*tworking+\omega*(tworking)-(\omega/tbraking)*\sqrt{tbraking}/2$

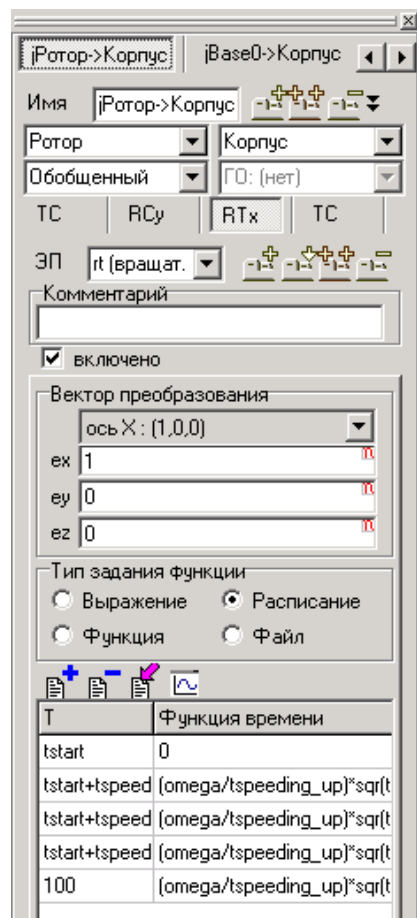


Рис. 2.18.

4. Закройте конструктор объекта для электромотора, возвратитесь к построению модели составного объекта.

2.2.6. Крепление электродвигателя на платформе посредством силовых элементов

Крепление мотора на платформе задается аналогично креплению платформы к базе. Взаимодействующие тела – **Электродвигатель.Корпус** и **Платформа.Platform**. Пример задания упругого силового элемента изображен на рис. 2.19.

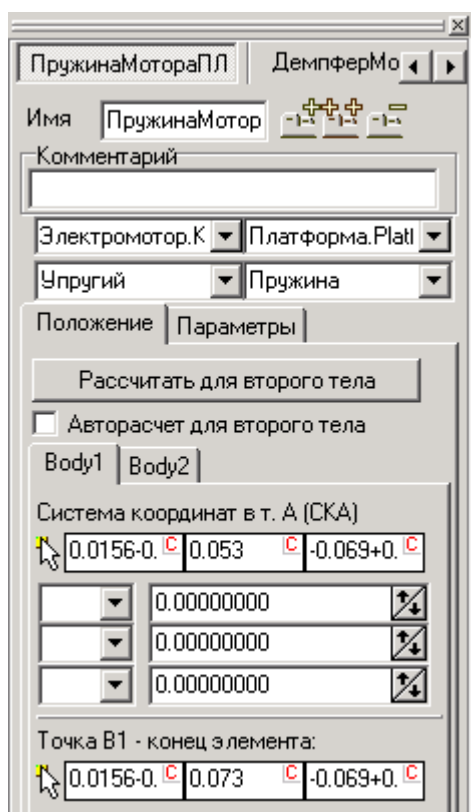


Рис. 2.19.

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

Таблица 3.

Силовой элемент	Электродвигатель.Корпус (вкладка Body1)			Платформа.Platform (вкладка Body2)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
ПружинаМотораПЛ, ДемпферМотораПЛ	0.0156- 0.015	0.053	-0.069+ 0.015	0.0156- 0.015	-0.069+ 0.015	0.06
ПружинаМотораПП, ДемпферМотораПП	0.0156- 0.015	0.053	0.1-0.015	0.0156- 0.015	0.1-0.015	0.06

ПружинаМотораЗЛ, ДемпферМотораЗЛ	-0.1+ 0.015	0.053	-0.069+ 0.015	-0.1+ 0.015	-0.069+ 0.015	0.06
ПружинаМотораЗП, ДемпферМотораЗП	-0.1+ 0.015	0.053	0.1-0.015	-0.1+ 0.015	0.1-0.015	0.06

Координаты **X**, **Z** концевых точек в стационарном состоянии в СК первого тела для всех элементов совпадают с координатами **Электромотор.Корпус**, **Y=0.073**.

Задание значений координат в виде суммы объясняется особенностями построения модели электромотора. Обратите внимание на необходимость задания поворота на -90 градусов вокруг оси **X** (рис. 2.19), чтобы системы координат силового элемента и тела **Электромотор.Корпус** имели одинаковую ориентацию.

Для всех упругих элементов задайте матрицы жесткости, как показано на рис. 2.20.

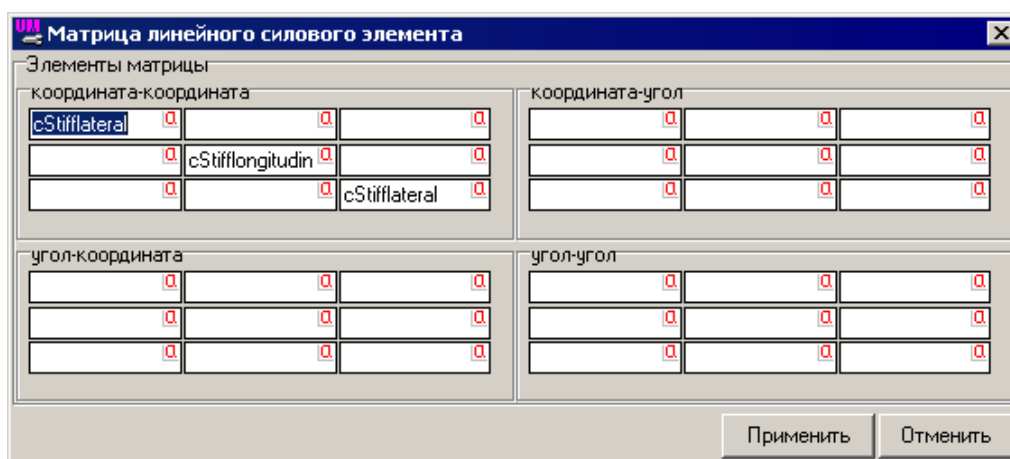


Рис. 2.20.

Задайте значения **cStiffLateral=1.0e+6**, **cStiffLongitudinal=1.0e+6**(Н/м). Значения аналогичных переменные для диссипативных элементов: **cDissLateral=1.0e+3**, **cDissLongitudinal=1.0e+3** (Нс/м).


2.2.7. Подготовка к моделированию

1. С помощью основного меню или кнопки на панели инструментов сохраните модель под именем **vibrostand**.
2. Синтезируйте и откомпилируйте уравнения движения объекта.


При отсутствии ошибок объект готов к моделированию.

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 $n_u = 1620$ 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** клавишей **F9** или кнопкой  на панели инструментов.
2. Откройте анимационное окно и настройте параметры изображения для визуального контроля процесса моделирования.
3. Для настройки изображения упругой платформы откройте **Инспектор моделирования объекта** (пункт меню **Анализ | Моделирование**) и воспользуйтесь закладкой **Подсистемы МКЭ | Представление**.

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 **Линейный анализ** (пункт меню **Анализ | Линейный анализ**, либо кнопка  на панели инструментов, либо клавиша **F8**).
2. Перейдите на закладку **Равновесие**, установите флажок **Запоминать координаты и идентификаторы** и запустите расчет кнопкой **Выполнить расчет** (рис. 2.21).

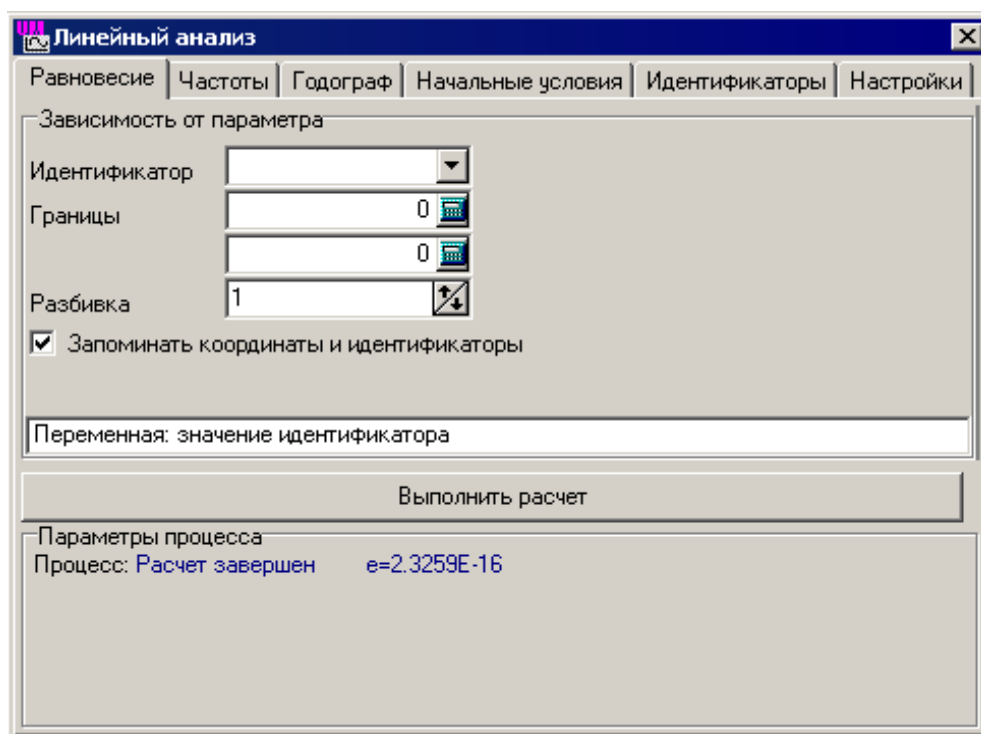



Рис. 2.21.

3. После завершения расчета значения рассчитанных координат и скоростей становятся текущими. Перейдите на закладку **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 закладку **Частоты**. При этом автоматически рассчитаются и будут представлены в виде списка частоты вибростенда с учетом упругости платформы (рис 2.22).

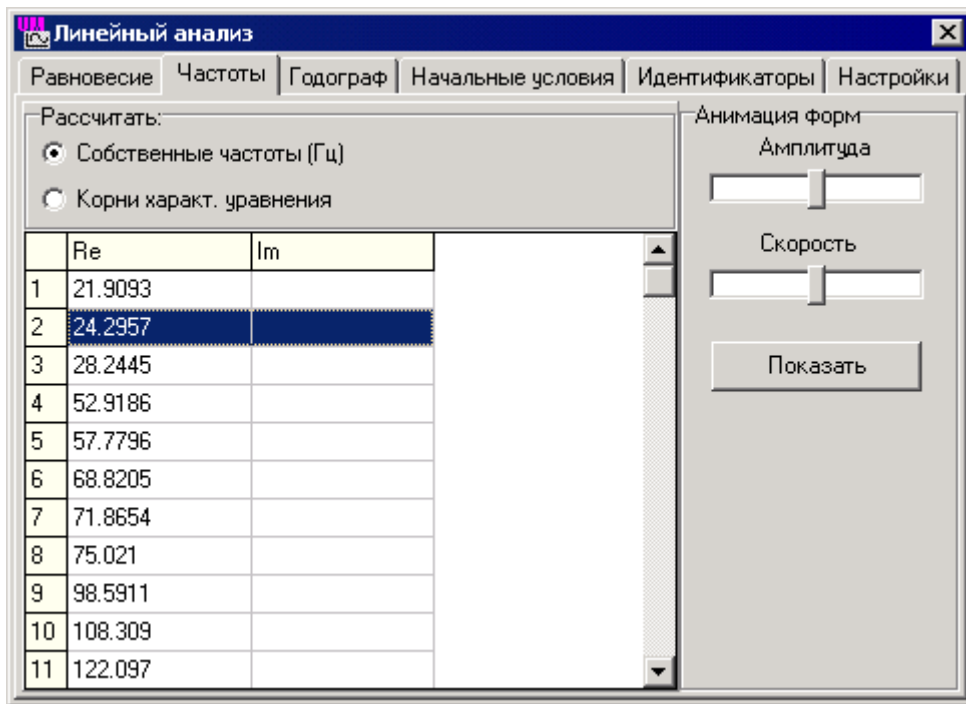


Рис. 2.22.

5. Формы колебаний вибростенда можно просмотреть в анимационном окне, выбрав соответствующую частоту в списке и нажав кнопку **Показать**. При этом наименование кнопки на **Стоп** (рис. 2.22) и стартует анимация формы колебаний (рис. 2.23). Параметры анимации можно настроить движками **Амплитуда** и **Скорость**. Для окончания анимации нажмите клавишу **Стоп**.

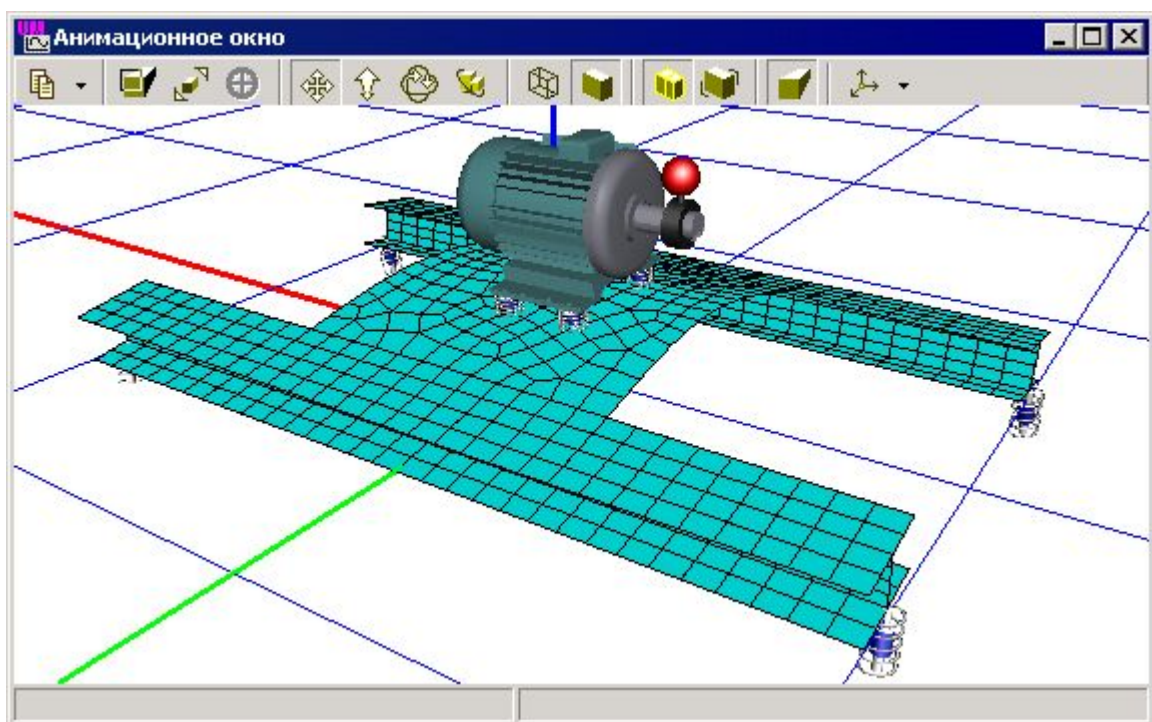


Рис. 2.23. Изображение формы колебаний вибростенда, соответствующей 2-ой собственной частоте 24.3 Гц

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 компонент **Z** линейных сил для силовых элементов **ПружинаМотораЗП**, **ДемпферМотораЗП** (рис. 2.24).

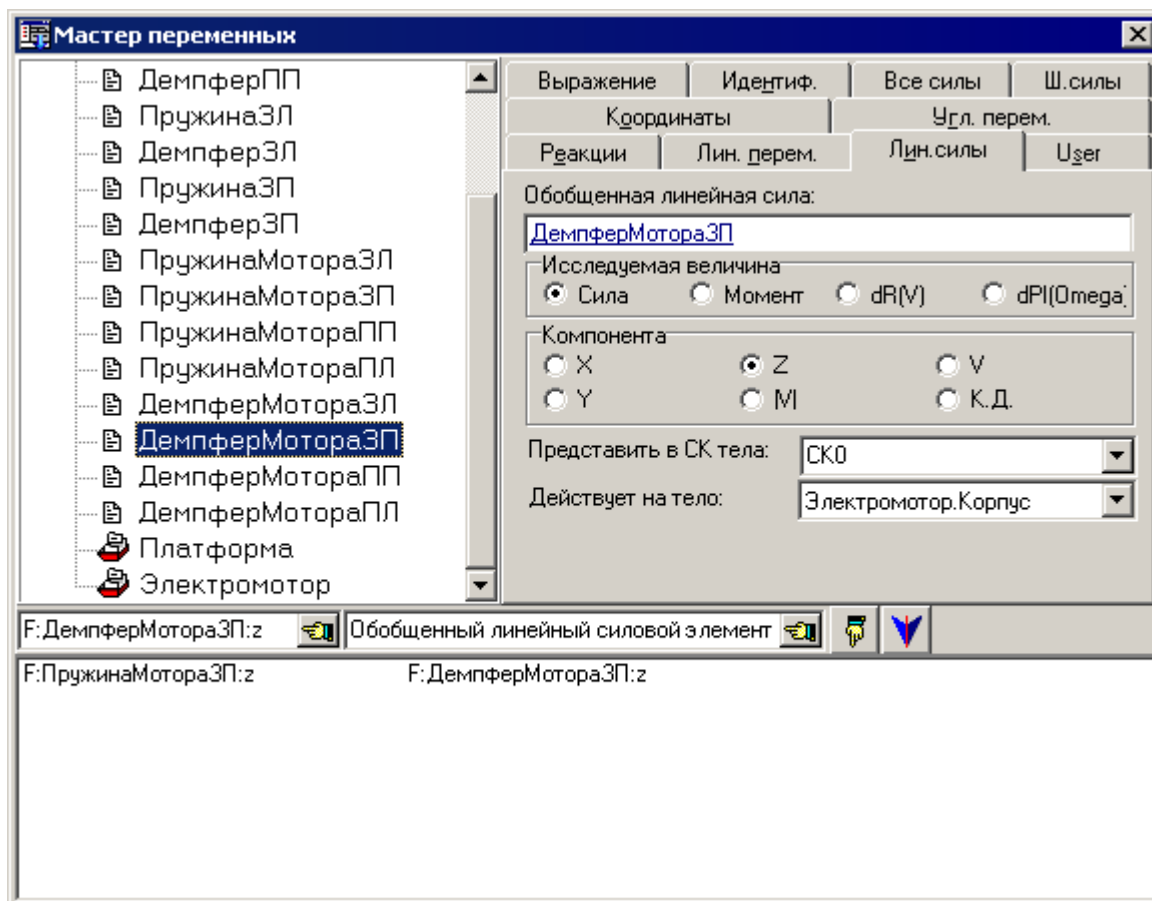


Рис. 2.24.

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. 2.25).
4. Перетащите мышкой созданные переменные в графическое окно.
5. Выберем узел конечно-элементной схемы платформы, в котором будут вычисляться компоненты **Z** перемещения и ускорения. Если в анимационном окне не отображаются узлы, выберите закладку **Подсистемы МКЭ | Представление** и установите переключатель **Изображение** в положение **полное**. Установите флажок **Отрисовать**

узлы и задайте ненулевое значение в поле **Размер | Точки-изображения узла** (рис. 2.26).

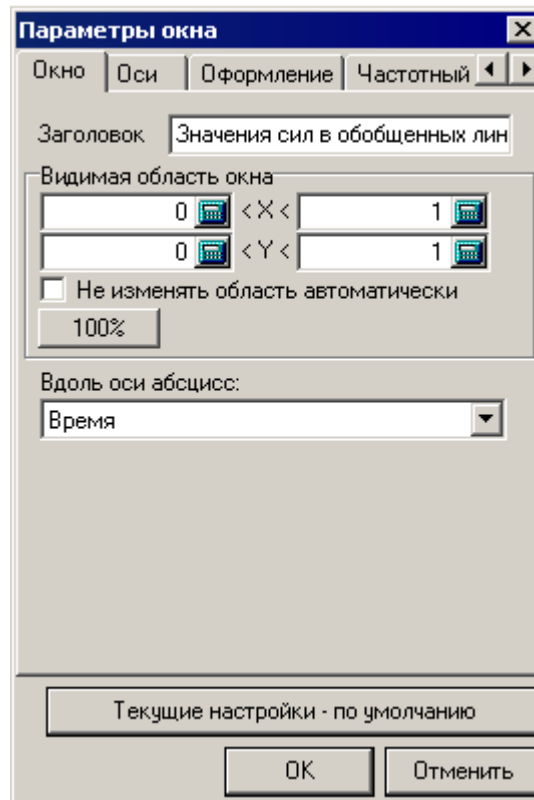


Рис. 2.25.

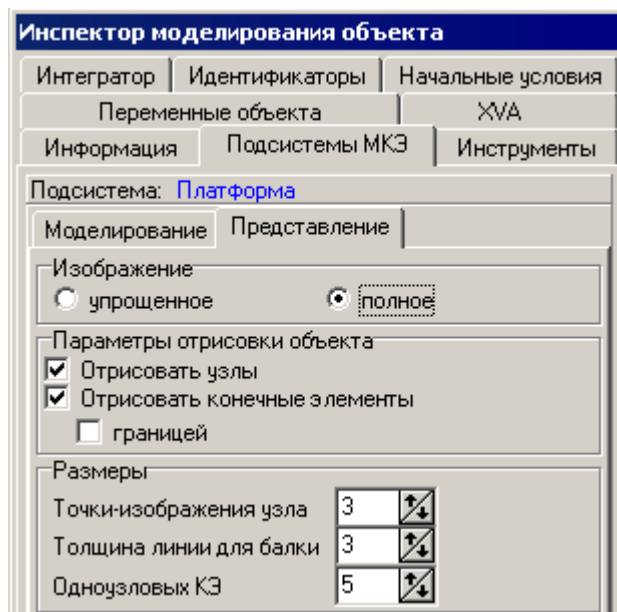


Рис. 2.26.

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. 2.27). Запишите или запомните их с точностью до трех знаков.

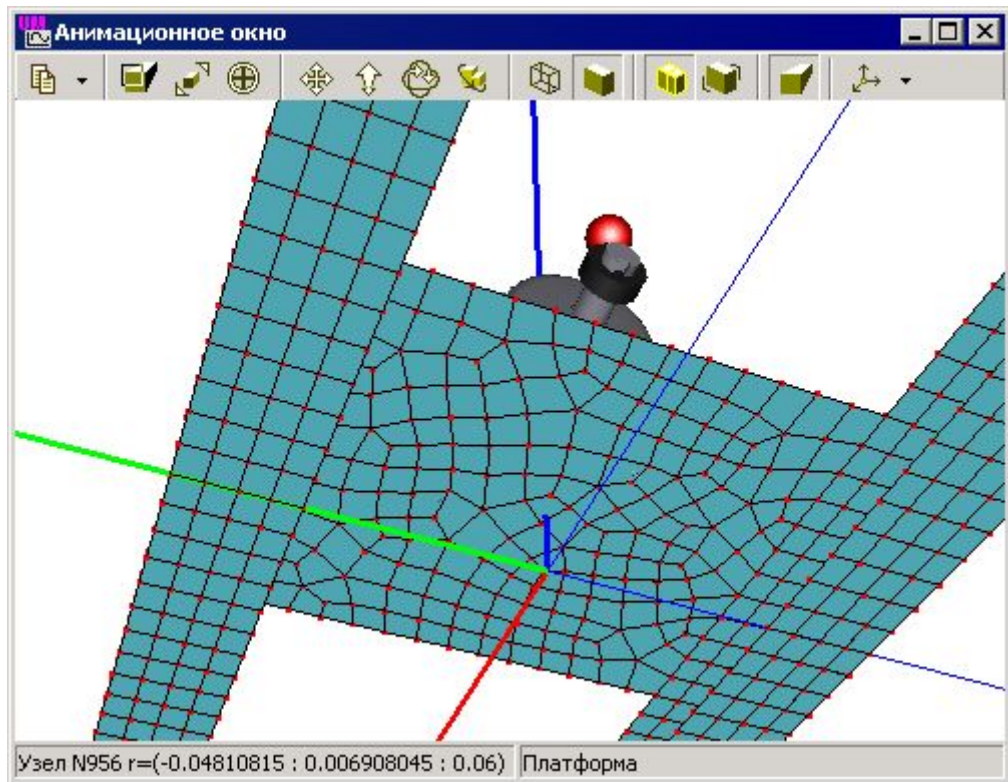


Рис. 2.27.

7. С помощью **Мастера переменных** создайте переменные для расчета компонент Z перемещений и ускорений выбранного узла, как это показано на рис. 2.28.
8. Последовательно создайте два новых графических окна для перемещений и ускорений точек и поместите в них созданные переменные аналогично пунктам 3-4.

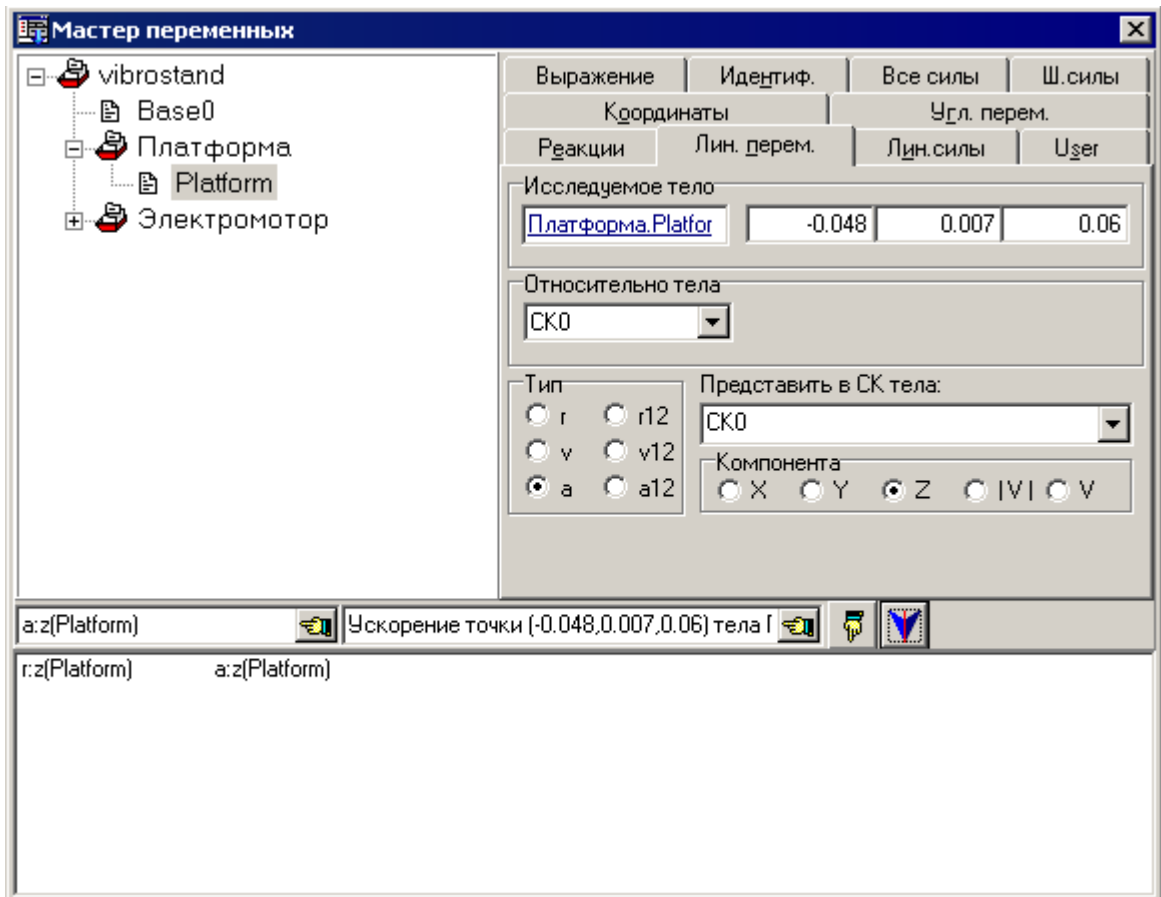


Рис. 2.28.

9. В **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на закладку **Интегратор** и установите следующие параметры (рис. 2.29):

- 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 **Блочнo-диагональные матрицы** выключен.

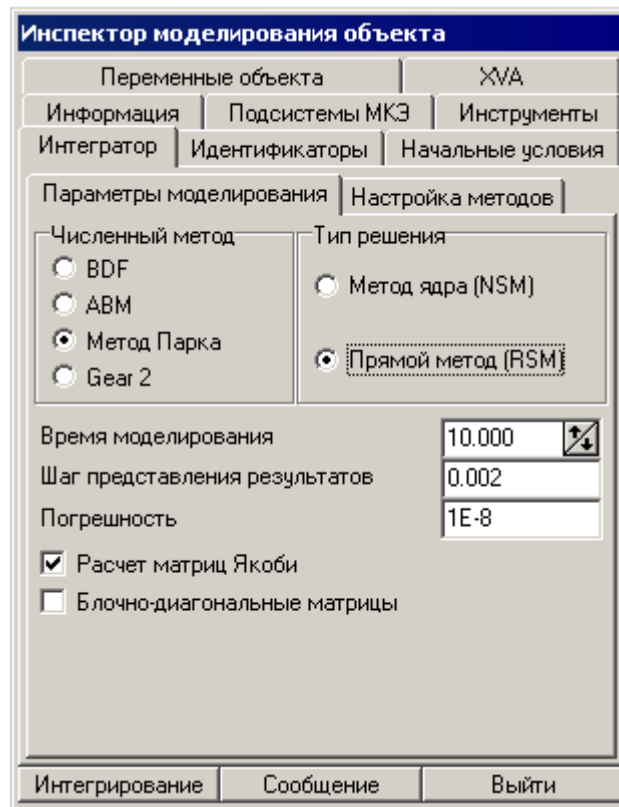


Рис. 2.29.

10.Перейдите на закладку **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 матрица диссипации**, задайте коэффициент **a=0.001, b=0** (рис. 2.30).

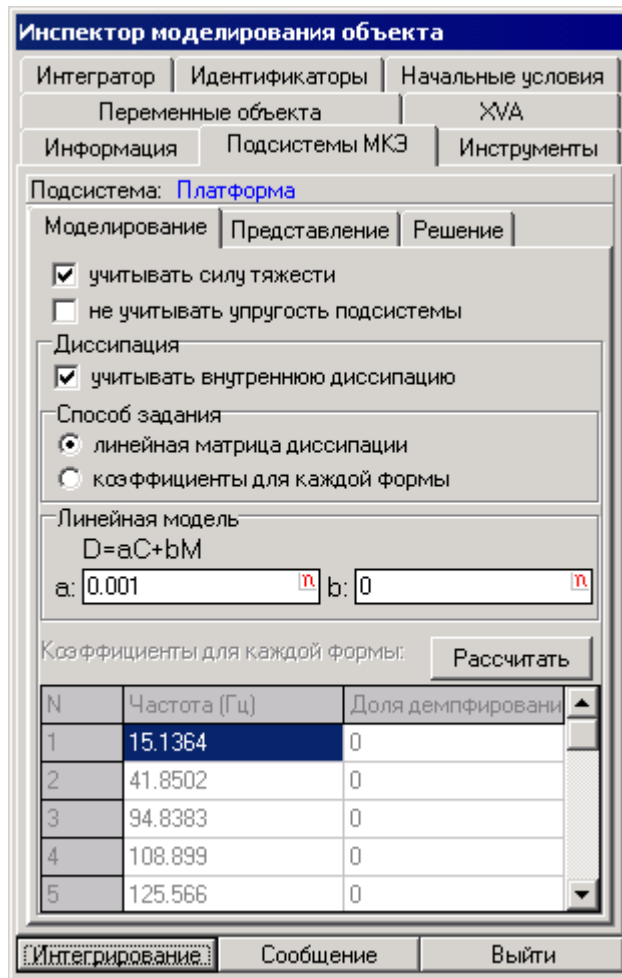


Рис. 2.30.

11. Перейдите на закладку **Идентификаторы**. Выберите элемент списка **vibrostand.Электродвигатель**. Задайте следующие значения идентификаторов, определяющих режимы вращения ротора (рис.2.31.):

- **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.

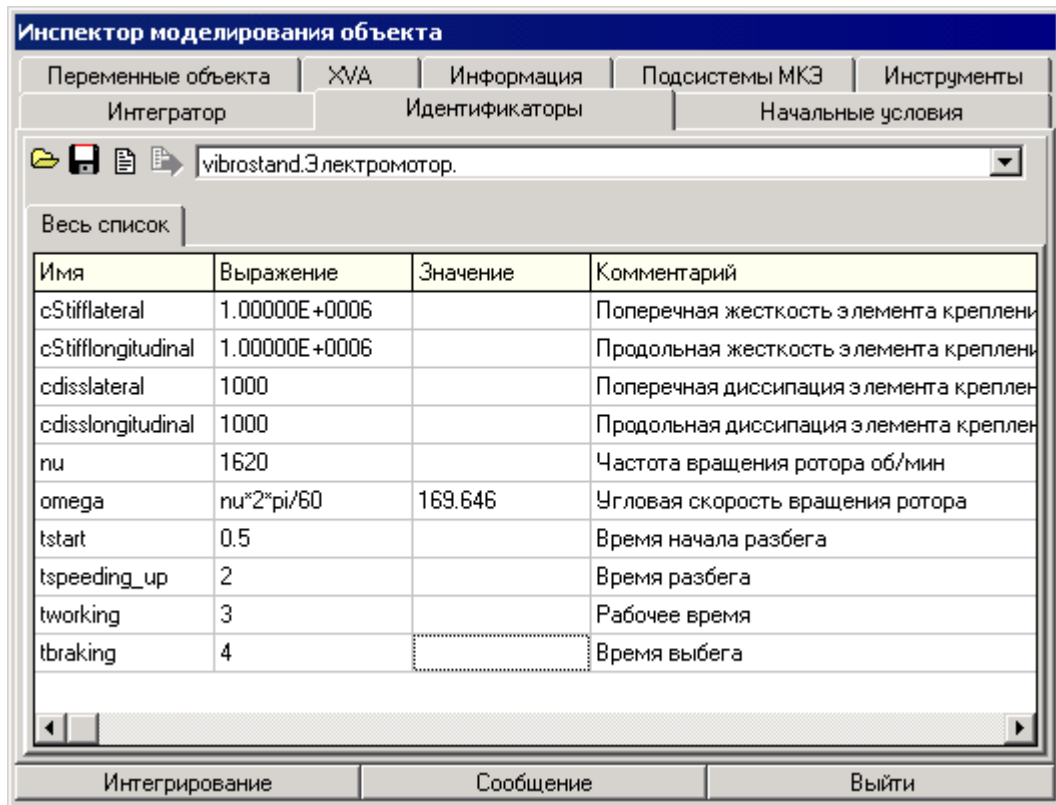
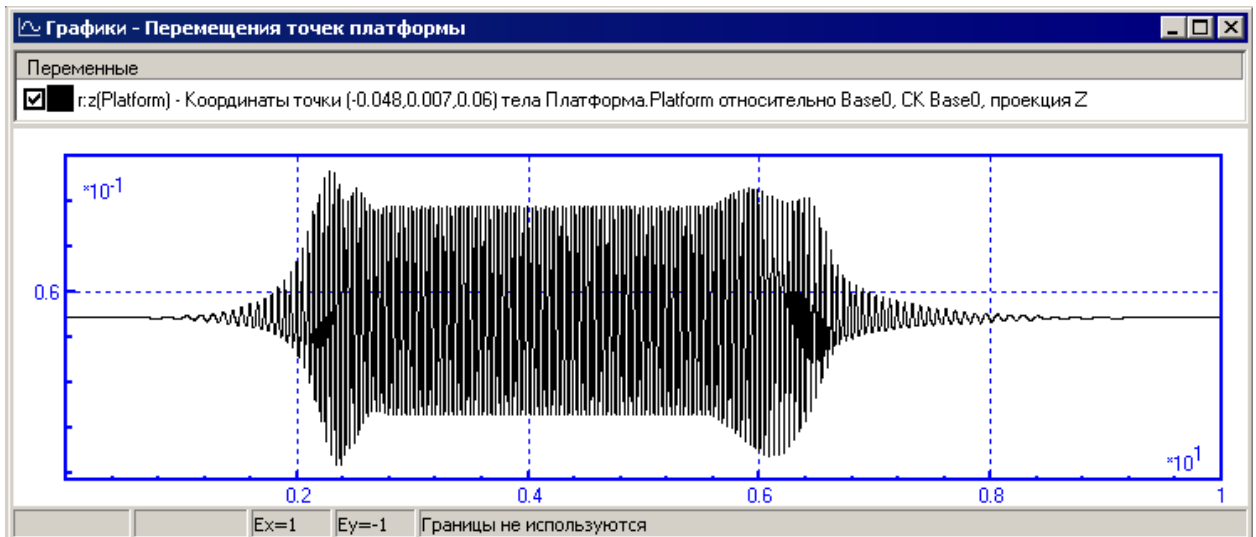


Рис. 2.31.

12. Запустите процесс интегрирования уравнений движения (кнопка **Интегрирование**). На рис. 2.32 представлены графические окна с графиками исследуемых переменных.



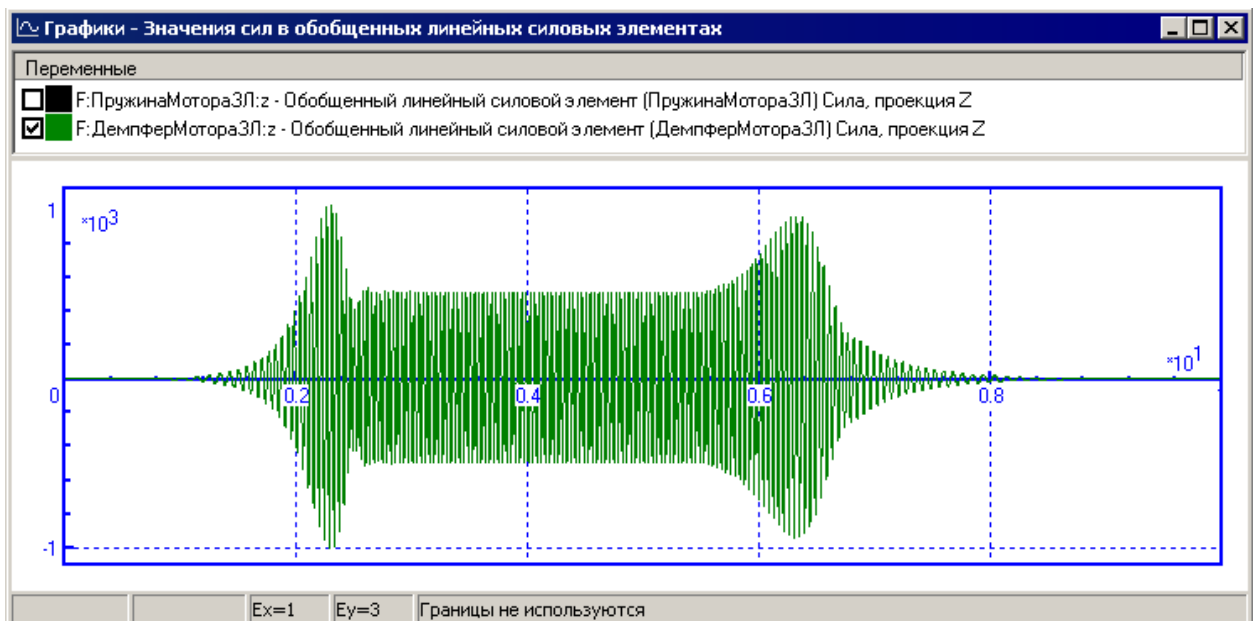
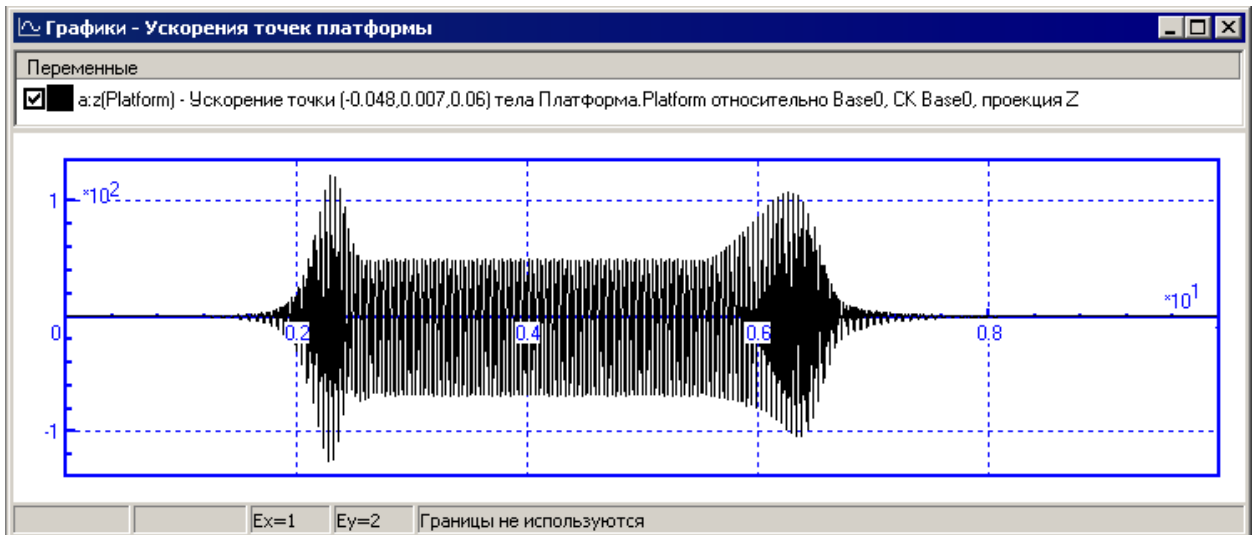


Рис. 2.32.

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

1. Перед началом интегрирования включите флажок **не учитывать упругость подсистемы** на закладке **Подсистемы МКЭ | Моделирование инспектора**.
2. Выполните интегрирования.
3. С помощью контекстного меню графического окна сохраните графики интересующих переменных в файл.
4. Отключите флажок **не учитывать упругость подсистемы**.
5. Проведите повторное интегрирование. В графических окнах построятся те же самые графики, но уже с учетом упругости модели.
6. Оцените влияние упругости платформы по разности графиков.