



# Моделирование упругих тел

---

Руководство пользователя

2010

Модуль моделирования упругих тел позволяет включать конечно-элементные модели упругих тел в расчетные схемы программного комплекса «Универсальный механизм». Обсуждаются вопросы импорта конечно-элементных схем, взаимодействия упругих тел с остальной конструкцией, а также моделирования динамики гибридных моделей.

## Оглавление

<b>11.</b>	<b>МОДУЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ UM FEM .....</b>	<b>11-3</b>
<b>11.1.</b>	<b>Общие сведения .....</b>	<b>11-3</b>
11.1.1.	Кинематика .....	11-3
11.1.2.	Расчет напряжений и деформаций.....	11-5
<b>11.2.</b>	<b>Комплектация, указания по установке, последовательность подготовки данных 11-7</b>	
11.2.1.	Создание модели в среде ANSYS и обмен данными .....	11-7
11.2.1.1.	Порядок подготовки данных в ANSYS.....	11-7
11.2.1.2.	Создание датчиков напряжений и деформаций .....	11-11
11.2.1.3.	Обмен данными с программой ANSYS .....	11-13
11.2.2.	Создание модели MSC.NASTRAN и обмен данными .....	11-17
11.2.2.1.	Общие сведения.....	11-17
11.2.2.2.	Состав программного обеспечения, схема импорта.....	11-17
11.2.2.3.	Подготовка данных в среде MSC.PATRAN/NASTRAN .....	11-19
11.2.2.4.	Обмен данными с программой MSC.NSATRAN.....	11-26
11.2.3.	Особенности подготовки данных в программе МКЭ .....	11-28
11.2.3.1.	Выбор интерфейсных узлов .....	11-28
11.2.3.2.	Контроль нормалей к поверхностям оболочек и пластин.....	11-33
<b>11.3.</b>	<b>Мастер упругих подсистем.....</b>	<b>11-34</b>
11.3.1.	Анимационное окно .....	11-35
11.3.2.	Управляющая форма .....	11-36
11.3.2.1.	Вкладка «Общие» .....	11-37
11.3.2.2.	Вкладка «Решение» .....	11-38
11.3.2.3.	Вкладка «Представление».....	11-43
11.3.2.4.	Вкладка «Положение» .....	11-45
11.3.3.	Форма выбора узлов .....	11-45
<b>11.4.</b>	<b>Включение упругой подсистемы в составной объект.....</b>	<b>11-47</b>
11.4.1.	Добавление упругой подсистемы .....	11-47
11.4.2.	Экранная форма упругой подсистемы.....	11-48
11.4.2.1.	Вкладка «Общие» .....	11-48
11.4.2.2.	Вкладка «Положение» .....	11-49
11.4.2.3.	Вкладка «Решение» .....	11-50
11.4.2.4.	Вкладка «Представление» .....	11-50
11.4.2.5.	Вкладка «Системы координат».....	11-50
11.4.3.	Особенности описания взаимодействий с упругой подсистемой .....	11-52
11.4.3.1.	Особенности описания контактной силы .....	11-53
<b>11.5.</b>	<b>Исследование динамики упругой подсистемы в составе модели.....</b>	<b>11-57</b>
11.5.1.	Специальные инструменты .....	11-57
11.5.1.1.	Экспорт упругих перемещений в ANSYS .....	11-57
11.5.1.2.	Подготовка данных для UM Durability .....	11-58
11.5.2.	Инспектор моделирования объекта .....	11-60
11.5.2.1.	Вкладка «Моделирование».....	11-60
11.5.2.2.	Вкладка «Представление».....	11-63
11.5.2.3.	Вкладка «Решение» .....	11-63
11.5.3.	Работа с переменными .....	11-63
11.5.3.1.	Координаты.....	11-63
11.5.3.2.	Линейные переменные .....	11-64
11.5.3.3.	Напряжения и деформации .....	11-64
11.5.3.4.	Экспорт упругих перемещений в ANSYS .....	11-67

## 11. МОДУЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ UM FEM

### 11.1. Общие сведения

Модуль позволяет включать в состав модели механической системы упругие тела, 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. Такой подход позволяет уточнить результаты твердотельного моделирования. Он может быть использован, например, для исследования вибраций кузова или рамы железнодорожного экипажа при движении с учетом воздействий от силового оборудования и неровностей пути. Другой областью применения модуля является моделирование механизмов с учетом упругости звеньев, совершающих геометрически нелинейные движения.

Для использования модуля **UM FEM** необходим модуль подсистем **UM Subsystems**. Конечно-элементная модель упругого тела строится с использованием внешних программ МКЭ. После создания модели и выполнения необходимых расчетов, описанных ниже, данные импортируются в **UM**. Поддерживается импорт из следующих программ МКЭ:

- **ANSYS 5.5** и более поздних версий;
- **MSC.NASTRAN 2005**.

Предполагается, что пользователь владеет, как минимум, базовыми понятиями конечно-элементного анализа, навыками работы с программой МКЭ, а также имеет представление о модальном подходе.

В настоящем пункте сообщим необходимый минимум сведений о методах моделирования упругих тел в среде **UM**.

Математическая модель упругого тела строится с использованием комплекса следующих методов:

- метода подсистем;
- метода присоединенной системы координат;
- метода конечных элементов;
- метода связанных подструктур (Крэйга-Бэмптона).

Каждое упругое тело объекта рассматривается как отдельная подсистема, поэтому после подготовительного этапа, на котором рассчитываются необходимые данные, компоновка составного объекта с упругими телами в целом соответствует сборке твердотельной модели. Упругая подсистема может взаимодействовать с другими подсистемами объекта, в том числе упругими, посредством силовых элементов и шарниров, перечень которых указан в п.11.4.3.

#### 11.1.1. Кинематика

Кинематика точек упругого тела описывается с применением метода *присоединенной системы координат* СК1, относительно которой строятся соотношения для упругих перемещений. Положение  $\mathbf{r}_k$  произвольной  $k$ -ой точки деформируемого тела в глобальной СК0 определяется следующим соотношением (рис.11.1):

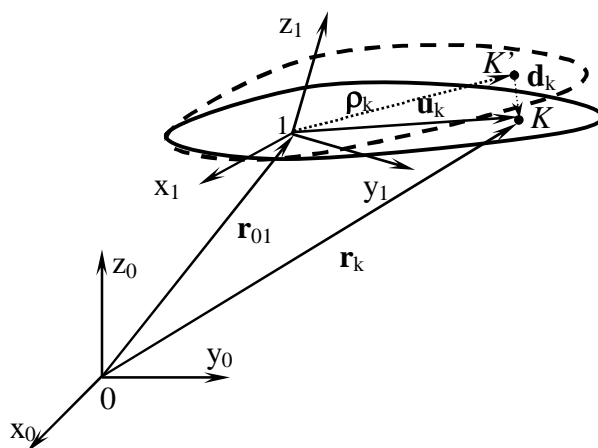


Рис.11.1. Метод присоединенной системы координат

$$\mathbf{r}_k^0 = \mathbf{r}_{01}^0 + \mathbf{A}_{01}(\boldsymbol{\rho}_k^1 + \mathbf{d}_k^1), \tag{11.1}$$

где  $\mathbf{r}_{01}$  – радиус-вектор начала отсчета СК1,  $\mathbf{A}_{01}$  – матрица поворота,  $\boldsymbol{\rho}_k$  – радиус-вектор точки  $K$  недеформированного тела в СК1, вектор  $\mathbf{d}_k$  представляет перемещения за счет упругих деформаций, верхний индекс означает систему координат, в которой представлены векторы.

Упругие свойства в СК1 описываются методом конечных элементов. На этом этапе используются внешние программы конечно-элементного анализа.

Малые упругие перемещения представляются в виде суммы  $N$  допустимых форм упругого тела:

$$\mathbf{u} = \sum_{j=1}^N \mathbf{h}_j w_j = \mathbf{H} \mathbf{w}, \tag{11.2}$$

где  $\mathbf{u}$  – узловые степени свободы упругого тела,  $\mathbf{h}_j$  – допустимая форма,  $w_j$  – модальная координата, определяющая упругие перемещения, соответствующие  $j$ -ой форме. Матрица  $\mathbf{H}$  называется *модальной матрицей*.

Для построения модальной матрицы используется комбинация статических и собственных форм упругого тела, рассчитанных в соответствии с методом связанных подструктур (Крэйга-Бэмптона). Метод включает четыре этапа:

- 1) выбор *интерфейсных (внешних)* узлов конечно-элементной схемы;
- 2) последовательный расчет набора *статических* форм, представляющих собой формы деформации от единичного смещения в направлении одной из степеней свободы в интерфейсных узлах при закрепленных остальных;
- 3) расчета набора *собственных* форм при закрепленных интерфейсных узлах;
- 4) расчет обобщенных матриц масс и жесткости, ортонормализация статических и собственных форм.

Кратко поясним суть каждого из перечисленных этапов.

**Выбор интерфейсных узлов.** Упругая подсистема может взаимодействовать с другими подсистемами объекта исследований посредством шарниров и силовых элементов. При этом желательно, чтобы каждой шарнирной точке или точке присоединения силового элемента (в случае, когда точка приложения силы неизменна) соответствовал узел конечно-элементной сетки подсистемы (в противном случае производится поиск ближайшего к заданной точке узла). В качестве интерфейсных узлов обычно выбираются узлы, соответствующие шарнирным точкам, либо точкам присоединения силовых элементов. Такой подход позволяет корректно строить уравнения связей в шарнирах и достаточно точно описать упругие перемещения, влияющие на величину силы в силовом элементе.

Интерфейсные узлы необходимо выбирать так, чтобы при расчете каждой из статических форм обеспечивалась неподвижность подсистемы.

**Расчет статических форм.** Количество статических форм равно числу интерфейсных степеней свободы. Упругая подсистема закрепляется в интерфейсных узлах. В ходе процедуры расчета каждой степени свободы в интерфейсных узлах последовательно сообщается единичное смещение

(единичный поворот), при этом остальные интерфейсные степени свободы остаются закрепленными.

**Расчет собственных форм.** Собственные формы упругой подсистемы являются результатом решения обобщенной проблемы собственных значений:

$$(\mathbf{C} - \lambda \mathbf{M})\mathbf{y} = 0, \tag{11.3}$$

где  $\mathbf{C}$  – матрица жесткости,  $\mathbf{M}$  – матрица масс,  $\lambda$  – собственное значение,  $\mathbf{y}$  – собственный вектор. Если матрицы имеют полный ранг, уравнение (11.3) имеет  $N$  решений, где  $N$  – число строк матриц, соответствующее числу незакрепленных узловых степеней свободы. Матрица масс упругой подсистемы может формироваться на основе функций форм конечных элементов, либо иметь диагональную форму, как следствие разнесения массы по узлам конечно-элементной сетки. Набор (число и вид) используемых собственных форм определяет пользователь программы. Как правило, набор включает собственные формы, соответствующие низшим собственным частотам.

**Расчет обобщенных матриц, ортогонализация форм.** Используя модальную матрицу  $\mathbf{H}$ , строятся обобщенные матрицы масс и жесткости упругой подсистемы:

$$\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{H}^T \mathbf{M} \mathbf{H}, \quad \bar{\mathbf{C}} = \mathbf{H}^T \mathbf{C} \mathbf{H}$$

где  $\bar{\mathbf{M}}$  – обобщенная матрица масс,  $\bar{\mathbf{C}}$  – обобщенная матрица жесткости.

Заключительным этапом подготовки набора форм является ортогонализация столбцов модальной матрицы на основе решения обобщенной проблемы собственных значений с обобщенными матрицами масс и жесткости:

$$(\bar{\mathbf{C}} - \lambda \bar{\mathbf{M}})\bar{\mathbf{y}} = 0 \tag{11.4}$$

Преобразованный набор форм строится на основе соотношения:

$$\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{H} \bar{\mathbf{Y}} \tag{11.5}$$

Основным преимуществом такого подхода является диагональная форма обобщенных матриц задачи, что позволяет сократить до минимума затраты на интегрирование уравнений движения упругой подсистемы. Другой целью преобразований является исключение форм, соответствующих движению упругой подсистемы как твердого тела. Выполнение этого условия необходимо, поскольку движение подсистемы как твердого тела описывается присоединенной СК1. Твердотельным формам соответствуют нулевые собственные значения в спектре задачи (11.4).

### 11.1.2. Расчет напряжений и деформаций

Рассмотрим дискретный вариант соотношений теории упругости, используемых в методе конечных элементов:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i^e = \mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e)\mathbf{u}_i^e, \tag{11.6}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_i^e = \mathbf{D}_i^e \boldsymbol{\varepsilon}_i^e = \mathbf{D}_i^e \mathbf{B}_i^e \mathbf{u}_i^e,$$

где  $\mathbf{u}_i^e, \boldsymbol{\varepsilon}_i^e, \boldsymbol{\sigma}_i^e$  – матрицы-столбцы соответственно узловых степеней свободы, деформаций и напряжений  $i$ -го конечного элемента,  $\mathbf{B}_i^e$  – матрица, связывающая поле деформаций конечного элемента с узловыми перемещениями,  $\mathbf{D}_i^e$  – матрица упругости конечного элемента, построенная на основе закона Гука,  $\mathbf{x}_i^e$  – матрица-столбец координат узлов конечного элемента. Размер матриц зависит от типа конечного элемента.

Представив узловые перемещения в виде суммы (11.2), деформации и напряжения конечного элемента можно представить следующими соотношениями:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i^e = \mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e)\mathbf{H}_i^e \mathbf{w} = \mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e) \sum_{j=1}^H \mathbf{h}_{ji}^e w_j = \sum_{j=1}^H \mathbf{h}_{ji}^{e\varepsilon} w_j = \mathbf{H}_i^{e\varepsilon} \mathbf{w}, \tag{11.7}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_i^e = \mathbf{D}_i^e \mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e)\mathbf{H}_i^e \mathbf{w} = \mathbf{D}_i^e \mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e) \sum_{j=1}^H \mathbf{h}_{ji}^e w_j = \sum_{j=1}^H \mathbf{h}_{ji}^{e\sigma} w_j = \mathbf{H}_i^{e\sigma} \mathbf{w},$$

где  $\mathbf{h}_{ji}^e$  – часть  $j$ -ой формы, соответствующая узловым степеням свободы  $i$ -го конечного элемента. Векторы-столбцы  $\mathbf{h}_{ji}^{e\varepsilon}$  и  $\mathbf{h}_{ji}^{e\sigma}$  представляют напряжения и деформации от узловых перемещений конечного элемента, соответствующих форме  $\mathbf{h}_{ji}^e$ , при значении модальной координаты  $w_j=1$ . Назовем их *элементными решениями* или решениями для элементов.

Поскольку  $\mathbf{D}_i^e, \mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e)$  – постоянные матрицы, они не участвуют в процессе моделирования после расчета  $\mathbf{h}_{ji}^{e\varepsilon}$  и  $\mathbf{h}_{ji}^{e\sigma}$ . Следовательно, построив модальные матрицы деформаций и напряжений по соотношениям (11.7), можно выполнить расчет соответствующих величин непосредственно в процессе интегрирования уравнений движения упругого тела.

Векторы-столбцы  $\mathbf{h}_{ji}^{e\varepsilon}$  и  $\mathbf{h}_{ji}^{e\sigma}$ , соответствующие форме  $\mathbf{h}_j$  упругого тела, рассчитываются программой МКЭ. Перед использованием в программе **UM** они преобразуются аналогично векторам-столбцам  $\mathbf{h}_j$  на основе соотношений (11.4, 11.5).

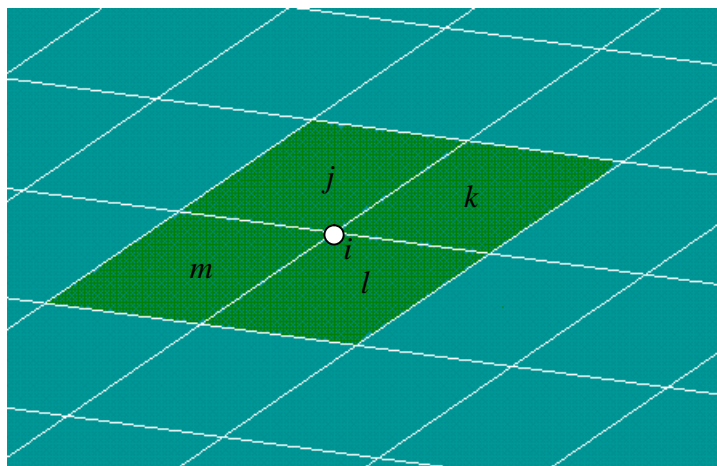


Рис.11.2. К примеру расчета узловых напряжений

Узловые напряжения или деформации рассчитываются программами МКЭ на основе значений соответствующих величин, рассчитанных для элементов, включающих данный узел. При этом часто используется простое осреднение значений. Например, если узел  $i$  принадлежит четырем конечным элементам с номерами  $j, k, l, m$  (рис.11.2), то узловое напряжение рассчитывается по формуле

$$\sigma_i^n = (\sigma_{ji}^e + \sigma_{ki}^e + \sigma_{li}^e + \sigma_{mi}^e) / 4 = \frac{\sum_{b \in M_i} \sigma_{bi}^e}{N_i},$$

где  $\sigma_i^n$  – узловое напряжение,  $\sigma_{ji}^e$  – компоненты напряжений в узле  $i$  конечного элемента номер  $j$ ,  $M_i$  – множество номеров конечных элементов, содержащих узел  $i$ ,  $N_i$  – число конечных элементов, содержащих узел  $i$ .

**UM** импортирует решения для элементов. Узловые решения рассчитываются как средние значения решений в элементах, содержащих данный узел.

## 11.2. Комплектация, указания по установке, последовательность подготовки данных

Комплект поставки включает следующее программное обеспечение:

- программное обеспечение для импорта данных из **ANSYS**:
  - макрос **um.mac** на языке APDL (*ANSYS Parametric Design Language*);
  - программу преобразования данных **ansys\_um.exe**;
- программное обеспечение для импорта данных из **MSC.NASTRAN**:
  - файл **umfum.alt** с процедурами на языке DMAP (*Direct Matrix Abstraction Program*);
  - программу преобразования данных **nastran\_um.exe**;
- мастер подготовки данных упругих тел, встроенный в модуль **UMInput.exe**;
- модуль ввода исходных данных упругих подсистем, встроенный в модуль **UMInput.exe**;
- модуль моделирования динамики упругих подсистем, встроенный в модуль **UMSimul.exe**.

Моделирование динамики упругих тел в составе объекта исследований с использованием перечисленных программ включает следующие основные этапы:

- 1) описание упругого тела в программе конечно-элементного анализа;
- 2) выбор интерфейсных узлов, расчет статических и собственных форм упругого тела в соответствии с методом связанных подструктур (Крэйга-Бэмптона);
- 3) импорт и преобразование данных, необходимое для построения упругой подсистемы;
- 4) включение упругой подсистемы в состав модели объекта исследований;
- 5) моделирование (интегрирование, линейный анализ).

Первый и второй этапы выполняются с использованием программ МКЭ, последующие этапы реализуются в **UM**.

Далее последовательно рассмотрим каждый этап. Подготовка данных в программе **ANSYS** описана в пункте 11.2.1, работе с **MSC.NASTRAN** посвящен пункт 11.3.1.

### 11.2.1. Создание модели в среде ANSYS и обмен данными

#### 11.2.1.1. Порядок подготовки данных в ANSYS

На рис.11.3. представлен полный цикл подготовки исходных данных с использованием программы **ANSYS** и анализа модели в **UM**.

В соответствии с правилами **ANSYS** вначале выбирается рабочий каталог, а также задается имя `JobName`, которое будут иметь файлы задачи.

После создания конечно-элементной модели и выбора интерфейсных узлов запускается макрос **um.mac**. Макрос содержит команды для расчета статических и собственных форм, а также матриц масс и жесткости упругого тела. В результате выполнения макроса создаются: стандартный файл результатов **ANSYS** с расширением `rst`, файл с расширением `full`, содержащий матрицы упругого тела, соответствующие закреплению в интерфейсных узлах, файл с расширением `free` содержащий матрицы свободного тела, файл с расширением `mlmp` диагональной матрицы масс свободного тела. В зависимости от аргументов макроса последний из перечисленных файлов может отсутствовать. Например, если имя задачи `Beam`, то после расчета в рабочем каталоге появятся файлы `Beam.rst`, `Beam.full`, `Beam.free`.

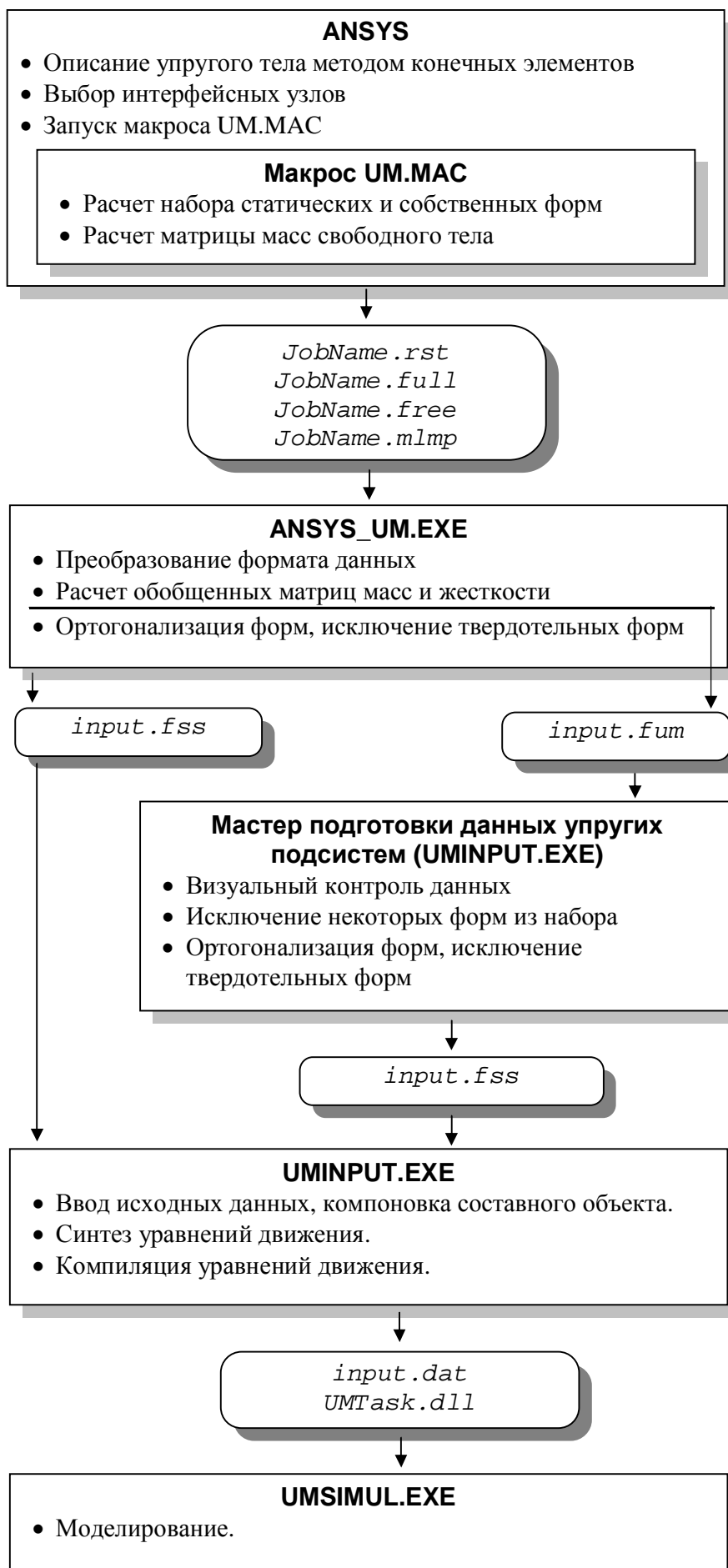


Рис.11.3. Цикл подготовки данных объекта с упругими подсистемами

После инсталляции программы макрос **um.mac** располагается в подкаталоге `.\bin` каталога **UM**. Поместите файл **um.mac** в каталог, выбранный в среде **ANSYS** по умолчанию для хранения макросов. Например, для версии **5.5** это подкаталог `.\dосu` каталога программы **ANSYS**, для версии **9.0** - `.\apdl`.

В противном случае перед запуском макроса необходимо задать путь к нему посредством команды **ANSYS**:

```
/PSEARCH, Путь_к_макросу.
```

Следующий этап подготовки данных выполняется программой **ansys\_um.exe**, расположенной в каталоге `.\bin` программы **UM**. В зависимости от установок программы результатом ее работы может быть готовый файл исходных данных `input.fss`, либо файл `input.fum`, содержащий промежуточные данные, которые преобразуются на последующем этапе. Во многих случаях второй подход бывает удобнее.

Программа **ansys\_um.exe** может запускаться автоматически из макроса **UM**, либо автономно после его выполнения. Для автоматического запуска необходимо отредактировать параметр команды `/sys` в последней строке макроса **um.mac**, используя любой текстовый редактор. Например,

```
/sys,c:\um\bin\ANSYS_UM.exe
```

Укажите в качестве параметра полный путь к программе **ansys\_um.exe**.

**Примечание.** Команда `/sys` не выполняется, если в пути к программе присутствуют пробелы. В этом случае скопируйте файлы `ansys_um.exe` и `um.rsc` в каталог, путь к которому не содержит пробелов, либо запускайте программу автономно.

**Мастер упругих подсистем**, встроенный в модуль **UMInput.exe**, предоставляет дополнительные возможности при подготовке данных. Используя данные файла `input.fum`, он позволяет визуально проконтролировать рассчитанные формы, исключить часть из них и выполнить необходимые преобразования для формирования файла `input.fss`.

Дальнейший порядок работы с упругой подсистемой мало отличается от моделирования с использованием внешних подсистем. Последнее имя каталога в пути к файлу `input.fss` является именем упругой подсистемы, а сам файл является стандартным файлом исходных данных, подобно `input.dat` для системы (либо подсистемы) абсолютно твердых тел.

Включение упругой подсистемы в состав объекта исследований выполняется в модуле ввода данных **UMInput.exe**. Модуль генерирует файл данных составного объекта `input.dat`.

Рассмотрим далее каждый из упомянутых этапов более подробно.

Подготовку данных в среде **ANSYS** условно можно разделить на 3 этапа.

1. Описание упругого тела с использованием средств и приемов, описанных в руководстве пользователя программы. При описании модели необходимо выбрать систему СИ единиц измерения посредством команды

```
/UNITS,SI
```

При создании конечно-элементной сетки нужно позаботиться о том, чтобы в шарнирных точках и точках приложения сил будущей модели составного объекта имелись узлы (причем они могут быть не интерфейсными). Удовлетворить этому требованию можно посредством размещения в соответствующих местах ключевых точек (команда *K*), жестко фиксированных (*hard*) точек (команда *НPTCREATE*), либо подбором параметров разбивки. Некоторые особенности создания конечно-элементной модели описаны в п. 11.3.1.

2. Выбор *интерфейсных узлов* конечно-элементной схемы упругого тела посредством последовательности команд NSEL, либо последовательности комбинации команд KSEL, NSLK. Например, интерфейсные узлы можно выбрать следующими способами:

- NSEL,s,,,1,10,1 !выбор нового набора узлов начиная с номера 1  
!до номера 10 с шагом 1
- NSEL,s,,,1 !выбор нового набора узлов состоящего из одного  
!узла с номером 1  
NSEL,a,,,385 !добавить к набору выбранных узлов узел с номером  
!385
- KSEL,s,,,1 !выбор нового набора ключевых точек состоящего из  
!одной точки с номером 1  
KSEL,a,,,23 !добавить к набору выбранных ключевых точек точку  
!с номером 23  
NSLK,s !выбор нового набора узлов, ассоциированных с  
!выбранными контрольными точками

Формально подобную операцию можно выполнить для линии, области, объема. То есть выбрать линию, затем выбрать все узлы, ассоциированные с линией. Однако, на практике такой выбор нецелесообразен.

3. Выполнение макроса из командной строки ANSYS:

```
UM,NEForms,WayM, StressInclude,StrainInclude
```

- NEForms – требуемое число собственных форм, соответствующих низшим частотам упругого тела
- WayM – способ формирования матрицы масс  
0 – матрица масс, построенная на основе функций форм конечных элементов  
1 – диагональная матрица масс
- StressInclude – признак расчета напряжений, соответствующих собственным и статическим формам упругого тела:  
1 – рассчитывать;  
0 – не рассчитывать.
- StrainInclude – признак расчета деформаций, соответствующих собственным и статическим формам упругого тела:  
1 – рассчитывать;  
0 – не рассчитывать.

**Примечания.** 1. Если предполагается проведение серии расчетов с использованием различного числа собственных форм, укажите в качестве значения NEForms максимальное число форм из всех планируемых вариантов и воспользуйтесь мастером подготовки данных упругих подсистем на последующем этапе.

2. При выполнении макроса ANSYS может выдаваться сообщение об ошибке «6 RIGID modes defined but only 5 total modes requested. Solution not interesting» («6 твердотельных форм определено, но только 5 форм требуется. Решение не интересно»). При этом выполнение макроса не прерывается. Это нормальная ситуация, связанная с необходимостью расчета матрицы масс свободного тела. Закройте сообщение об ошибке и продолжите работу.

### 11.2.1.2. Создание датчиков напряжений и деформаций

Действия при подготовке данных для расчета напряжений и деформаций, описанные в данном пункте, одинаковы. Поэтому для краткости будем говорить только о напряжениях.

В соответствии с МКЭ напряжения рассчитываются в узлах конечных элементов. Говоря о напряжениях в узле без указания конкретного конечного элемента, которому узел принадлежит, обычно имеют в виду осредненное значение по всем элементам, содержащим узел. При анализе конструкций исследователя чаще всего интересуют именно средние узловые значения напряжений. Чтобы иметь возможность рассчитать напряжения в узле, файл данных `input.fem` должен содержать матрицы-столбцы  $\mathbf{h}_{ji}^{e\sigma}$  хотя бы для одного элемента, содержащего этот узел (см. п.11.1.3). Узлы, для которых доступен расчет напряжений в программе **UM**, будем называть *датчиками*.

Подготовка данных, необходимых для расчета напряжений в программе **UM**, может потребовать много ресурсов компьютера. Для некоторых задач с большим числом узлов и конечных элементов такой расчет может быть вообще невозможен, если пытаться подготовить данные для расчета напряжений во *всех* узлах конечно-элементной модели. Это связано с ограничением 2 Гб на размер файла, доступный для чтения программам **ANSYS\_UM** и **UMInpit**. Между тем, во многих случаях исследователя интересуют напряжения только в некоторых узлах модели, число которых невелико.

В этом пункте рассмотрим два приема, позволяющих рассчитать данные только для интересующих узлов, тем самым резко сократить потребности в ресурсах ЭВМ.

#### 11.2.1.2.1 Выбор датчиков в программе ANSYS

Первый прием позволяет задать набор узлов, для которых будут рассчитаны напряжения программой **ANSYS** и записаны в файл результатов `JobName.rst`. Перед запуском макроса **um.mac** из программы **ANSYS** необходимо создать компонент **ESTRS**, используя команду **CM**.

**Пример.** Создать компонент для расчета напряжений или деформаций в узлах 17, 24, 138, 1235. Используется следующая последовательность команд **APDL**.

```
NSEL,s,,,17      !создать новый набор узлов, состоящий из одного узла
                  номер 17
NSEL,a,,,24      !добавить в набор узел 24
NSEL,a,,,138     !добавить в набор узел 138
NSEL,a,,,1235    !добавить в набор узел 1235
ESLN,s,0,all     !выбрать конечные элементы, содержащие выбранные
                  узлы
CM,ESTRS,ELEM    !создать компонент с именем ESTRS, содержащий вы-
                  бранные конечные элементы
ESEL,all         !выбрать все элементы
```

После выполнения макроса **um.mac** файл результатов будет содержать данные для расчета напряжений только в узлах элементов, принадлежащих компоненту **ESTRS**. Таким образом, размер файла `JobName.rst` может быть резко уменьшен, а время расчета сокращено по сравнению с полной моделью. Однако заметим, что расчет в **ANSYS** на этапе подготовки данных выполняется однократно, и размер файла `JobName.rst` критичен, только, когда он превосходит 2 Гб или при дефиците пространства на диске. В противном случае можно воспользоваться вторым приемом.

**Примечание.** При выполнении **um.mac** строится компонент, содержащий множество конечных элементов, выбранных на момент его запуска (вызова). Данные для остальных элементов не рассчитываются и не включаются в файл `input.fem`. Последняя строка примера, приведенного выше, выбирает все элементы. Если планируется использовать часть элементов, эта строка должна быть модифицирована. Но, в любом случае, создание компонента **ESTRS** должно предшествовать выбору множества элементов, включаемых в файл `input.fem`.

### 11.2.1.2.2 Выбор датчиков в программе ANSYS\_UM

Пользователь может сформировать список узлов, данные для которых отбираются программой ANSYS\_UM из файла JobName.rst и включаются в файл данных input.fum (input.fss). Набор узлов-датчиков описывается в текстовом файле umensors.lst, который должен располагаться в рабочем каталоге задачи. Файл имеет следующую структуру. Первая строка содержит обязательный комментарий, начинающийся знаком «\$»:

```
$ UM SENSORS NODES LIST
```

Вторая и последующие строки содержат номера узлов – по одному номеру в каждой строке. Файл может содержать произвольные комментарии, начинающиеся знаком «\$», которые располагаются в отдельных строках. Например,

```
$ второе сечение
365
464
```

Если необходимо выбрать все узлы, вторая строка файла должна иметь значение «ALL».

Комплект поставки UM содержит макрос umensors.mac, который позволяет автоматизировать создание файла umensors.lst. Поместите его в каталог ANSYS, выбранный по умолчанию для хранения макросов. Формат командной строки:

```
umensors,newfile,startnum,finishnum,stepnum
```

- Newfile      0 – создать новый список узлов;  
                  1 – дополнить существующий список.
- startnum     – начальный номер набора узлов,  
                  startnum=-1 – включить в набор все узлы конечно-элементной модели,  
                  остальные параметры игнорируются, ранее созданный список удаляется.
- finishnum    – конечный номер набора узлов.
- Stepnum      – шаг приращения номера узла, по умолчанию 1;  
                  при отсутствии параметров finishnum и stepnum в список добавляется один  
                  узел с номером startnum.

Отсутствие файла umensors.lst в каталоге задачи означает, что выбираются все узлы, в которых могут быть рассчитаны напряжения (деформации).

Очевидно, что если файл результатов не содержит данных для расчета напряжений в конечных элементах, содержащих узел с номер N, то включение этого номера в список файла umensors.lst не будет иметь эффекта. То есть, файл input.fum будет содержать данные для расчета напряжений в узлах, принадлежащих пересечению множеств узлов компонента ESTRS и umensors.lst. В таблице 1 приведено содержание файла input.fum в зависимости от вариантов подготовительных действий, при значении параметра StressInclude макроса um.mac равном 1.

Таблица 1.

№	Компонент ESTRS сформирован	JobName.rst	umensors.lst	input.fum (input.fss)
1.	нет	все узлы	отсутствует или выбраны все узлы	все узлы
2.	нет	все узлы	umensors	umensors
3.	да	ESTRS	отсутствует или выбраны все узлы	ESTRS
4.	да	ESTRS	umensors	ESTRS ∩ umensors

Эффективность моделирования в UM непосредственно зависит от размера файла input.fss, что особенно заметно при многовариантных расчетах (см. п.6.2. «Сканирование»). Поэтому, если нет необходимости расчета напряжений во всех узлах модели, как, например, при оценке усталостной

прочности элементов конструкций, то рекомендуется заранее подготовить список датчиков и описать его в файле `umsensors.lst`.

### 11.2.1.3. Обмен данными с программой ANSYS

Для обмена данными с программой **ANSYS** используется программа **ansys\_um.exe**. Она преобразует данные, полученные в результате расчетов, из формата **ANSYS** в формат *fum* (*flex UM*) и создает файл, содержание и расширение которого определяется настройками.

Файл, содержащий набор преобразованных форм без твердотельных форм подсистемы, имеет имя `input.fss`. Данный файл готов для использования в программе ввода исходных данных **UMInput.exe**.

Файл `input.fum` содержит промежуточные данные, которые преобразуются на последующем этапе с помощью мастера подготовки данных упругих подсистем. Он содержит исходные статические и собственные формы и обобщенные матрицы подсистемы.

Файлы с расширениями `fum` и `fss` имеют одинаковую структуру и кроме форм и матриц содержат информацию о конечно-элементной разбивке подсистемы, типах используемых элементов, имя задачи, комментарии. Совокупность этих данных будем называть *решением*.

Экранная форма программы содержит три закладки: **Файл**, **Настройки** и **Датчики**; индикатор, информирующий о ходе выполнения процесса преобразований, и две кнопки: **Создать** и **Закреть** (рис.11.4).

**Примечание.** Индикатор состояния процесса невидим до начала выполнения преобразований.

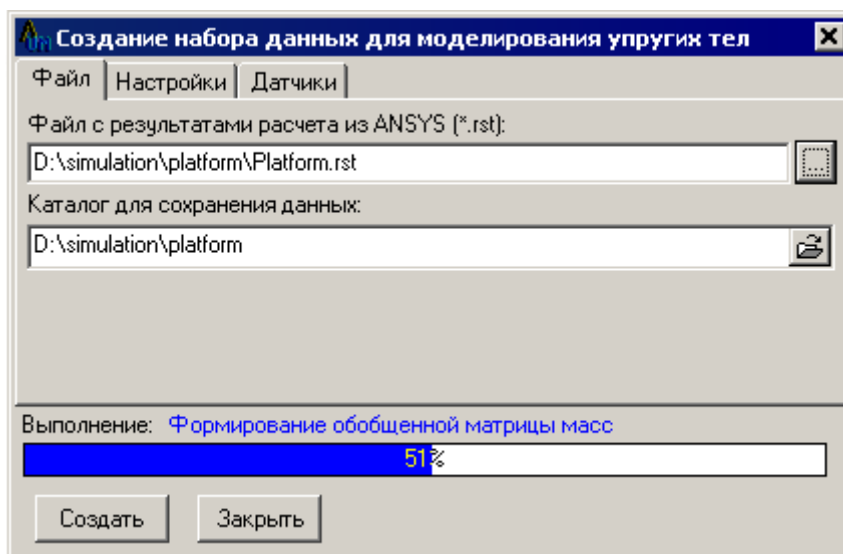


Рис.11.4.

Закладка **Файл** (рис.11.4.) содержит элементы управления, позволяющие выбрать файл с результатами расчета **ANSYS** (расширение `rst`), каталог для сохранения файла `input.fum` или `input.fss`. Рекомендуется заранее выбрать имя упругой подсистемы и создать каталог с выбранным именем. Укажите имя этого каталога в поле **Каталог для сохранения данных**.

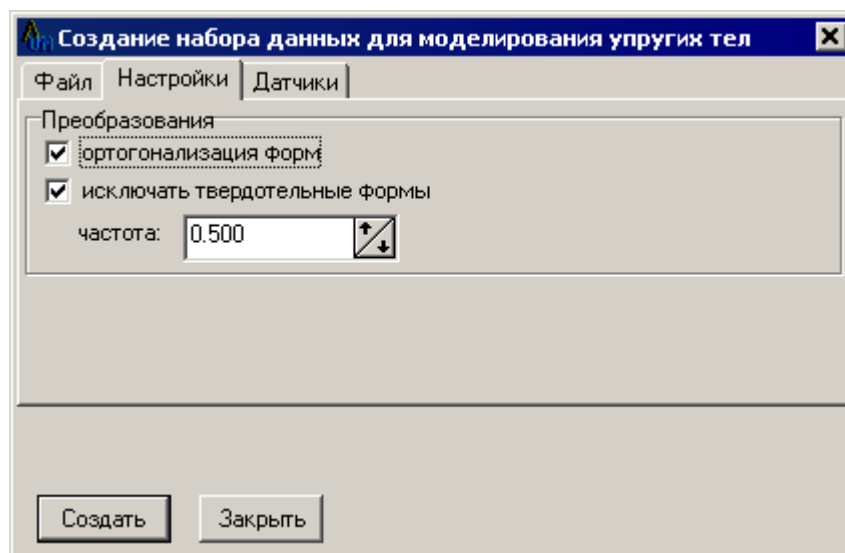


Рис.11.5.

Закладка **Настройки** (рис.11.5.) содержит элементы управления, с помощью которых задаются вид и состав сохраняемых данных. Возможны следующие варианты.

- Набор статических и собственных форм упругой подсистемы, обобщенные матрицы масс и жесткости плотные, то есть преобразования (11.4, 11.5) не выполняются. Для получения такого набора данных флажок **ортогонализация форм** должен быть выключен (при этом остальные элементы закладки недоступны для редактирования).
- Набор преобразованных форм, содержащий формы колебаний подсистемы как твердого тела – флажок **ортогонализация форм** включен, флажок **исключать твердотельные формы** выключен. В этом случае для завершения подготовки данных необходимо исключить твердотельные формы с помощью мастера подготовки данных упругих подсистем.
- Набор преобразованных форм, без форм колебаний подсистемы как твердого тела – флажок **ортогонализация форм** включен, флажок **исключать твердотельные формы** включен. В этом случае в поле **Модуль собственного значения** задается допустимая погрешность при расчете собственных значений, соответствующих формам колебаний упругой подсистемы как абсолютно твердого тела. Данный вариант настройки приводит к формированию набора данных, готового к непосредственному использованию в программах ввода и моделирования.

**Примечания.** 1. Движению подсистемы как абсолютно твердого тела в точной постановке соответствуют нулевые собственные значения. Однако ошибки округлений приводят к появлению в спектре задачи (11.4) малых по модулю значений. В настоящей версии программы пользователю предлагается задать модуль собственного значения, для которого соответствующая собственная форма считается твердотельной.

2. При выполнении расчета с матрицей масс, построенной по функциям формы конечных элементов, данный вариант настройки является обязательным, поскольку на последующих этапах доступна только диагональная матрица масс.

3. При выполнении расчета с диагональной матрицей масс рекомендуется выбрать вариант настройки с выключенным флажком **ортогонализация форм**, и воспользоваться **Мастером подготовки данных упругих подсистем** на следующем этапе подготовки данных.

Закладка **Датчики** содержит элементы управления записью данных для расчета напряжений и деформаций в файл данных `input.fum` (`input.fss`). Вид правой части закладки определяется способом выбора узлов-датчиков, левая часть неизменна.

Если каталог задачи содержит файл `umsensors.lst` (см. п.11.3.2.2.), закладка примет вид подобный рис. 11.6.

Флажки группы **Включить решения для элементов** позволяют включить/исключить данные для расчета напряжений и деформаций в файл `input.fum`. При установке флажка **удалить список после преобр.** файл `umsensors.lst` удаляется после формирования файла `input.fum`. В большинстве случаев этот флажок рекомендуется выключать (не устанавливать), что позволяет многократно использовать сформированный список датчиков, то есть не формировать его перед каждым новым расчетом.

Набор узлов датчиков можно корректировать, выключая/включая флажки в левой части каждого элемента списка. При работе со списком можно пользоваться контекстным меню (рис. 11.7.), которое вызывается правой кнопкой мыши.

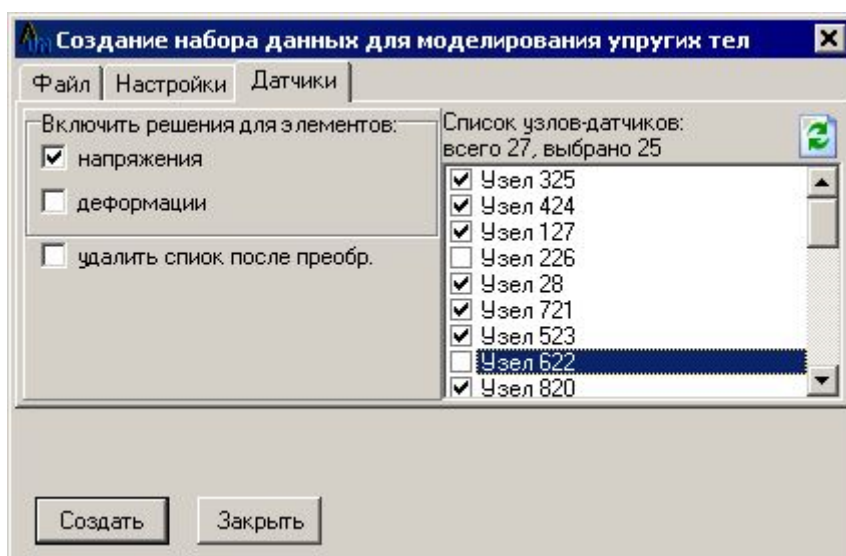


Рис. 11.6. Закладка **Датчики** при выборе узлов-датчиков из файла `umsensors.lst`.

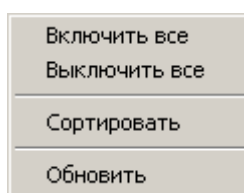



Рис. 11.7.

Файл `umsensors.lst` может быть создан, удален или отредактирован после запуска программы `ansys_um`. Информация на форме после этого обновляется с помощью кнопки  или пункта **Обновить** контекстного меню.

Если файл `umsensors.lst` отсутствует в каталоге задачи или возникли ошибки чтения, после запуска `ansys_um` пользователю предлагается выбрать в диалоге все датчики, определенные в программе `ANSYS`, или не включать данные для расчета напряжений (деформаций) в файл `input.fum` (рис. 11.8.). Вид формы после выбора всех датчиков изображен на рис.11.9.

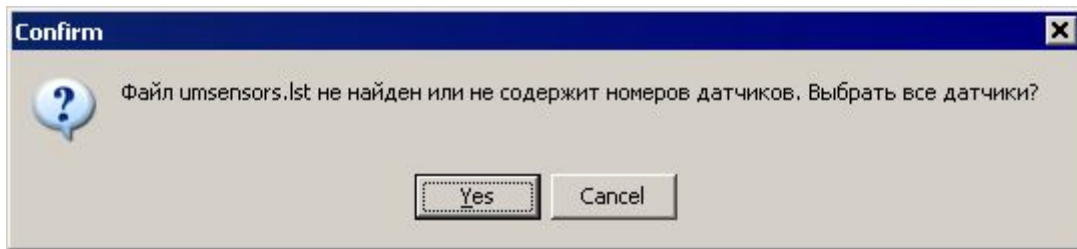


Рис. 11.8.

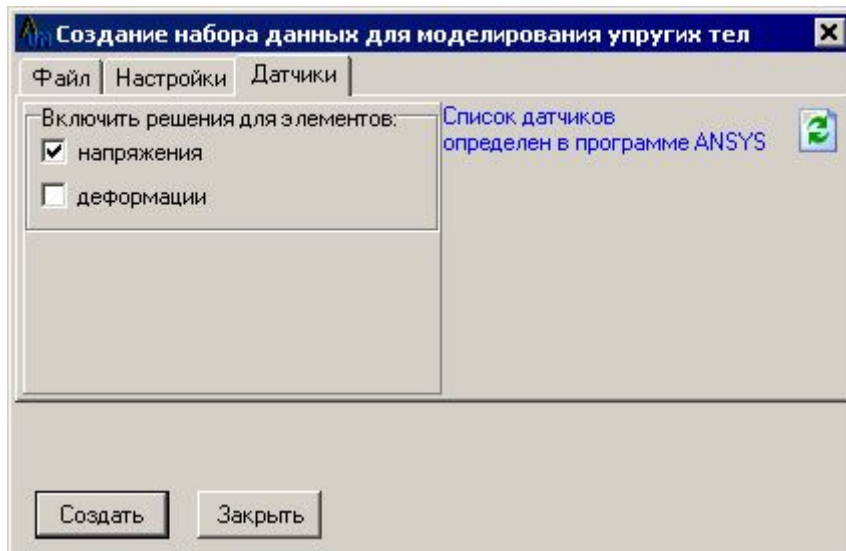


Рис.11.9. Закладка **Датчики** при выборе узлов-датчиков в программе **ANSYS**

Файл `input.fem` формируется кнопкой **Создать**. Время подготовки данных зависит от размера задачи (числа узлов, числа рассчитанных статических и собственных форм) мощности компьютера и может занимать от нескольких секунд до нескольких минут. При успешном окончании процесса появляется соответствующее сообщение.

## 11.2.2. Создание модели MSC.NASTRAN и обмен данными

### 11.2.2.1. Общие сведения

Анализ конечно-элементной модели в **MSC.NASTRAN** реализован посредством процедур, написанных на языке **MSC.NASTRAN DMAP**(Direct Matrix Abstraction Program). **DMAP** это язык высокого уровня со своим компилятором и грамматическими правилами.

Для решения типовых задач **MSC.NASTRAN** предоставляет процедуры, называемые в руководстве пользователя **NASTRAN** последовательностями решений. Типовыми задачами, являются, например, линейный и нелинейный статический анализ, модальный анализ, расчет частотного отклика и т.д. Тип анализа выбирается посредством оператора **SOL**. Параметром оператора **SOL** является предопределенный номер последовательности. Например,

**SOL 101** – линейный статический анализ,

**SOL 103** – модальный анализ.

**MSC.NASTRAN** позволяет пользователю изменять эти последовательности или писать его собственные решения, используя **DMAP**. Предопределенную последовательность операторов можно изменить посредством оператора **ALTER**, который добавляет или удаляет операторы существующих процедур. Эта возможность **DMAP** использована для разработки процедур, импортирующих данные в программу **Универсальный механизм**.

Упругая подсистема создается на основе метода суперэлементов. После разработки конечно-элементной модели пользователь должен выбрать интерфейсные узлы и создать суперэлемент. Необходимые данные импортируются в ходе модального анализа суперэлемента.

Далее опишем правила подготовки исходных данных **MSC.NASTRAN**, а также состав и последовательность использования программного обеспечения для импорта данных в **Универсальный механизм**. Пошаговое описание разработки и анализа модели, включающей упругую подсистему, импортированную из **MSC.NASTRAN**, приводится в руководстве *«Начинаем работать в программном комплексе «Универсальный механизм»: модуль моделирования упругих тел»*.

**MSC.NASTRAN** не имеет собственной визуальной среды разработки конечно-элементных моделей. Как правило, для этой цели используется программа **MSC.PATRAN**. Поэтому при описании необходимых действий пользователя будем указывать соответствующие операции в программе **MSC.PATRAN**. Входной файл **MSC.NASTRAN** создается программой **MSC.PATRAN** автоматически при выполнении анализа модели. Ниже, в п. 11.2.2.3 представлены копии экрана с элементами управления программы **MSC.PATRAN 2005**. Экранные формы для других версий программы могут отличаться.

### 11.2.2.2. Состав программного обеспечения, схема импорта

**ПК UM** предоставляет следующее программное обеспечение для импорта данных из **MSC.NASTRAN**.

1. Модуль **umfumYYYY.alt**, включающий операторы и процедуры на языке **DMAP**, которые записывают данные в промежуточные файлы **geoms.op2** и **matrix.op4** в формате **DMAP**. **YYYY** в наименовании модуля это номер версии **MSC.NASTRAN**, для которой он используется. Например, **umfum2005.alt** предназначен для импорта данных из **MSC.NASTRAN 2005**.

Файл **geoms.op2** содержит конечно-элементную модель (узлы, конечные элементы), упругие формы и данные для расчета напряжений и деформаций в заданных узлах; файл **matrix.op4** содержит обобщенные матрицы модели.

2. Программу-конвертер **NASTRAN\_UM.EXE**, которая читает файлы **geoms.op2** и **matrix.op4** и формирует файл **input.fum**, то есть, сохраняет данные в формате **UM**.

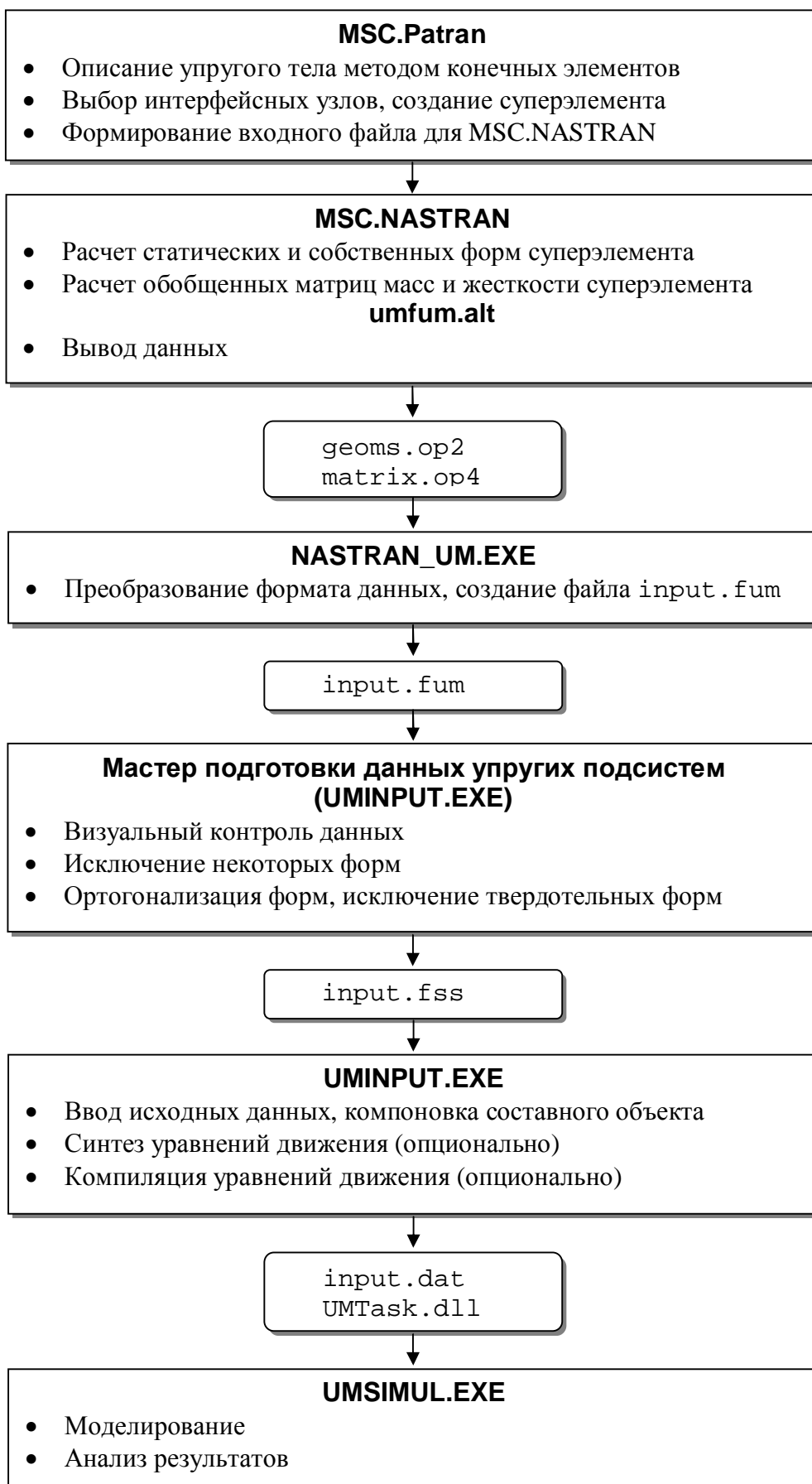


Рис.11.10. Создание упругой подсистемы с использованием MSC.PATRAN/NASTRAN

Основные этапы создания упругой подсистемы на основе импорта из **MSC.NASTRAN** и ее анализа в **UM** изображены на рис.11.10.

Файлы `umfumYYYY.alt` и `NASTRAN_UM.EXE` после установки программы **Универсальный механизм** располагаются в каталоге `.\bin`.

Далее опишем подробно подготовку данных.

**Примечание.** **UM 6.0** поддерживает импорт данных только из **MSC.NASTRAN 2005**. Импорт из других версий данной программы не тестировался.

### 11.2.2.3. Подготовка данных в среде **MSC.PATRAN/NASTRAN**

#### Основные этапы создания упругой подсистемы

1. Создание конечно-элементной модели исследуемого объекта в программе **MSC.PATRAN**. Модель описывается в системе СИ единиц измерения. Конечно-элементная сетка должна содержать узлы в шарнирных точках и точках прикрепления силовых элементов. Некоторые особенности создания конечно-элементной модели описаны в п.11.3.1.
2. Выбор интерфейсных узлов в соответствии с шарнирными точками и точками крепления силовых элементов в модели **UM** и создание суперэлемента. В программе **PATRAN** этот этап выполняется посредством следующих действий.

2.1. Нажать кнопку **Elements** панели инструментов (рис.11.11).

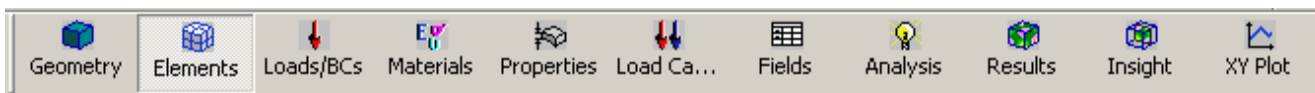


Рис.11.11. Панель инструментов программы **MSC.PATRAN**

2.2. На появившейся справа форме (рис.11.12) выполнить следующие действия.

- Выбрать **Action**: Create.
- Выбрать **Object**: Superelement.
- Задать имя суперэлемента в поле **Superelement Name**.
- Нажать кнопку **Select Boundary Nodes**.

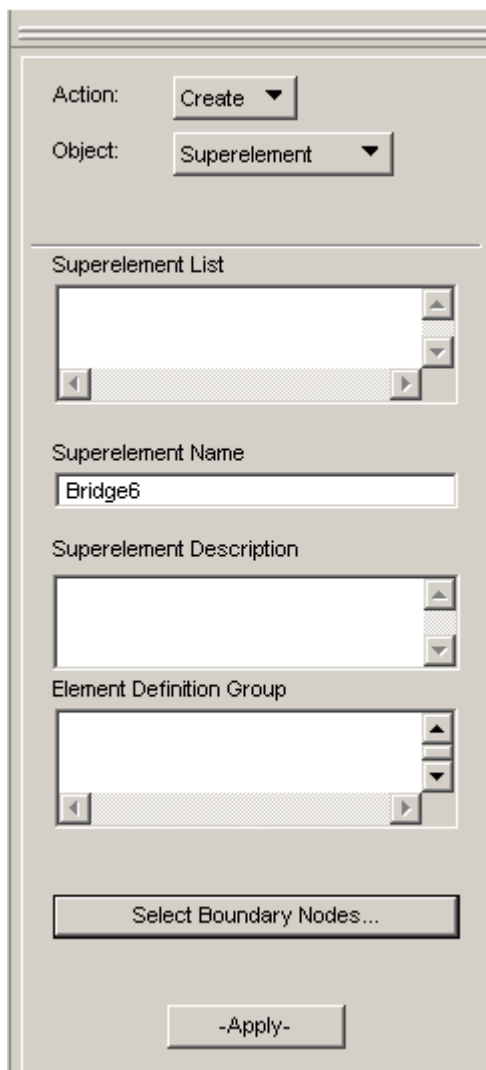


Рис.11.12. Создание суперэлемента в программе MSC.PATRAN

- Выбрать интерфейсные узлы мышью в окне, отображающем конечно-элементную модель или задав их номера непосредственно в форме Рис.11.13. Нажать кнопку **ОК**

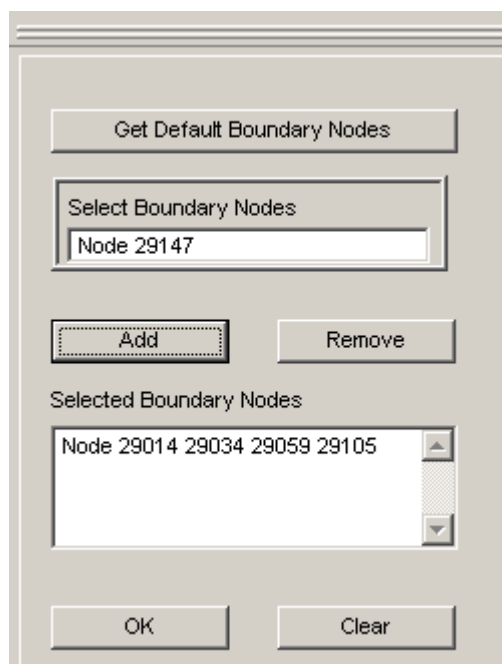


Рис.11.13. Выбор интерфейсных узлов в программе MSC.PATRAN

- Нажать кнопку **Apply** на форме рис.11.12.

При отсутствии ошибок будет создан суперэлемент с именем, заданном в поле **Superelement Name**.

Далее выполняется модальный анализ суперэлемента. Опишем операторы, включаемые во входной файл для импорта данных, и соответствующие действия в среде программы **MSC.PATRAN**.

3. Модальный анализ созданного суперэлемента. В разделе контроля выполнения (**Executive Control Section**) файла исходных данных **MSC.NASTRAN** необходимо указать тип анализа 103 (Normal modes).

```
SOL 103
```

В программе **MSC.PATRAN** параметры расчета задаются посредством последовательности действий, которая кратко описана ниже.

Формируется задание на расчет.

Перед выбором типа решения выполняются следующие действия.

- 3.1. Нажать кнопку **Analysis** панели инструментов.
- 3.2. На появившейся справа форме (рис.11.14) выполнить следующие действия.
  - Выбрать **Action**: Analyze.
  - Выбрать **Object**: Entire model.
  - Выбрать **Method**: Full Run.
  - Ввести имя задания в поле **Job Name**.

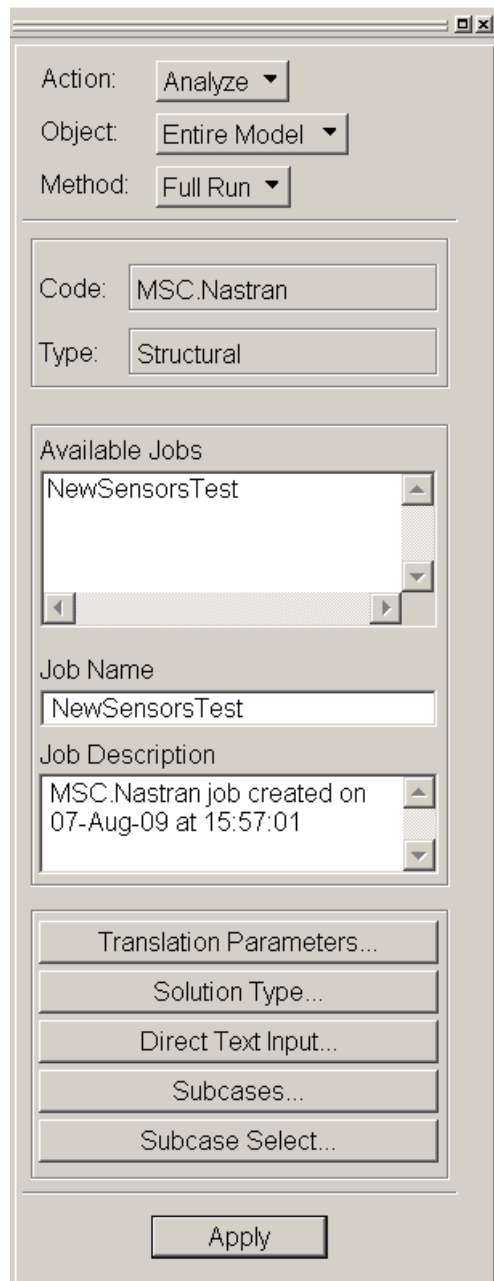


Рис.11.14. Форма анализа модели в программе **MSC.PATRAN**

Тип решения выбирается на форме, которая вызывается кнопкой **Solution Type...**(рис.11.15).

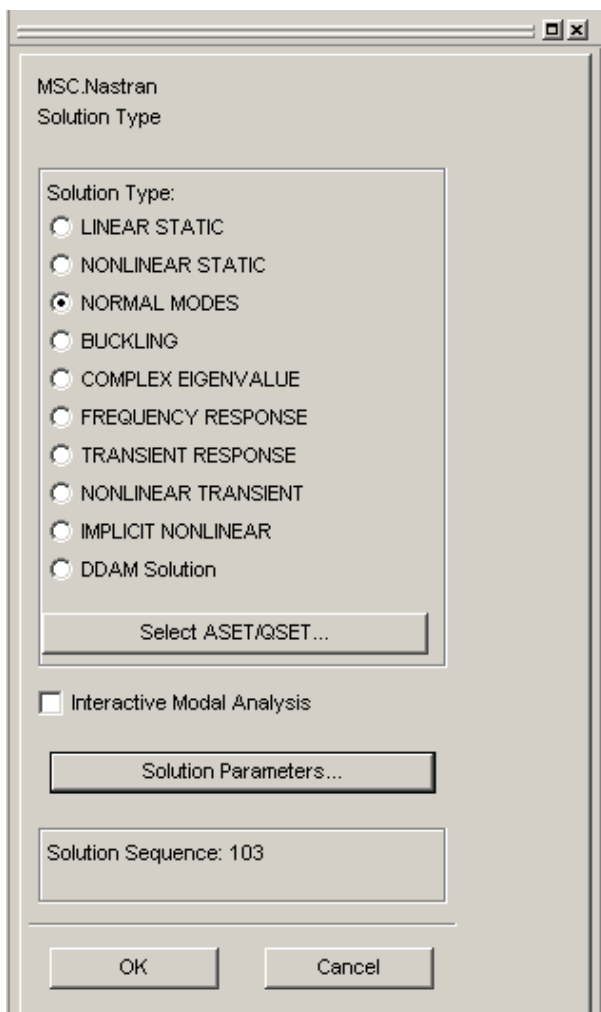


Рис.11.15. Выбор типа решения в программе MSC.PATRAN

4. Объявление выходных файлов geoms.op2 и matrix.op4 в разделе «File management» входного файла \*.bdf по следующему образцу

```
ASSIGN OUTPUT2='geoms.op2' UNIT=13 FORM=UNFORMATTED
ASSIGN OUTPUT4='matrix.op4' UNIT=15 FORM=UNFORMATTED
```

В программе MSC.PATRAN текст вносится в поле Analysis | Direct Text input... | File management (рис.11.16).

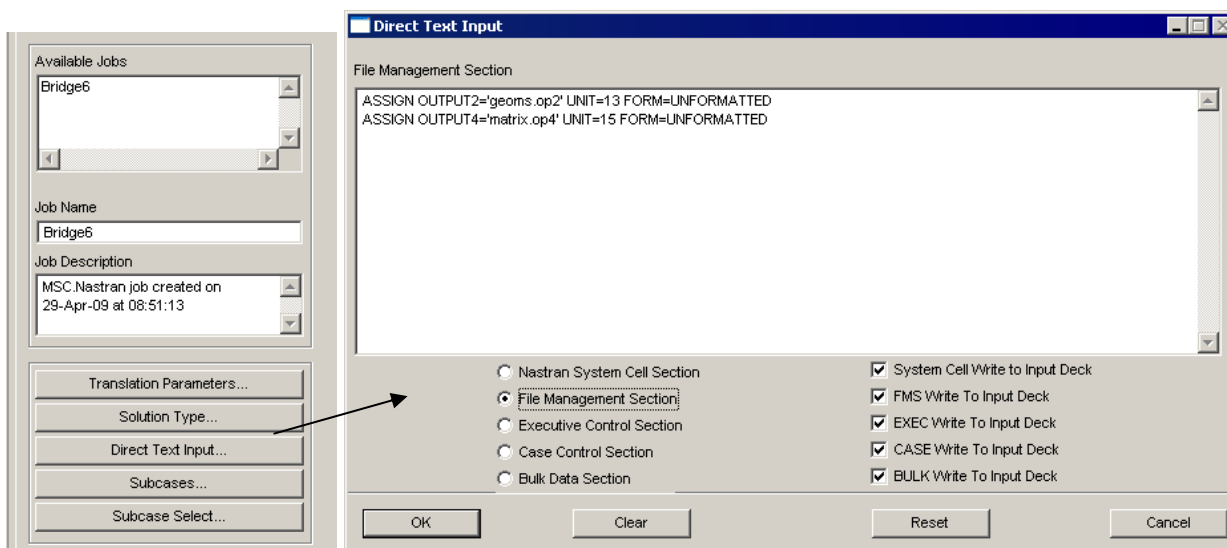


Рис.11.16. Объявление выходных файлов в программе MSC.PATRAN

5. Подключить модуль `umfumYYYY.alt`, добавив следующую строку в раздел **Executive Control Section**.

```
include umfum2005.alt
```

Это пример для **MSC.NASTRAN 2005**. Для других версий программы следует указать соответствующие файлы `umfumYYYY.alt`.

В программе **MSC.PATRAN** текст вносится в поле **Analysis | Direct Text input... | Executive Control Section**.

Файл `umfumYYYY.dat` должен быть помещен в каталог, в котором он будет найден программой **MSC.NASTRAN**. Например, рабочий каталог программы **MSC.PATRAN 2005**, указанный в параметрах ярлыка по умолчанию – подкаталог `Temp` системного каталога `Windows`. Файл `umfum2005.dat` может быть помещен в этот каталог. Он может быть также расположен в каталоге `bin` **MSC.NASTRAN**.

6. Задание единиц СИ измерения в разделе **Bulk Data Section**:

```
DTI, UNITS, 1, KG, NEWTON, METER, SECOND
```

В программе **MSC.PATRAN** текст вносится в поле **Analysis | Direct Text input... | Bulk Data Section**.

7. В разделе **Bulk Data Section** следует задать число требуемых собственных форм. Для этого используется команды, подобные следующим.

```
SPOINT, 300001, THRU, 300030  
SEQSET1, 10, 0, 300001, THRU, 300030
```

В данном примере требуется рассчитать тридцать собственных форм суперэлемента. Как правило, рассчитываются формы, соответствующие низшим собственным частотам. Задание параметров расчета описано ниже в п.9.

Оператор `SPOINT` определяет скалярные параметры, называемые *скалярными точками* в руководстве пользователя **MSC.NASTRAN**. В данном случае эти параметры выбираются в качестве модальных координат суперэлемента, соответствующих собственным формам модели, закрепленной в интерфейсных узлах. В примере задано тридцать скалярных точек, которые нумеруются с 300001 по 300030. Как правило, эти номера выбираются больше, чем максимальный номер узла модели. То есть они могут быть заданы, например, с 500001 по 500030. Совпадение номеров скалярных точек и номеров внутренних узлов суперэлемента не допускается.

Оператор `SEQSET1` определяет обобщенные координаты суперэлемента. Поясним значения параметров в приведенном примере: 10 – номер суперэлемента; 0 – объявить скалярные точки в качестве обобщенных координат суперэлемента; 300001, THRU, 300030 – номера скалярных точек, объявляемых обобщенными координатами, с 300001 по 300030.

8. Остальные параметры расчета задаются с помощью формы **Analysis | Subcases....**

Введите имя нового набора параметров в поле **Subcase Name**.

9. Нажмите кнопку **Subcase Parameters...** и введите параметры модального анализа в поля появившейся формы (рис.11.17).

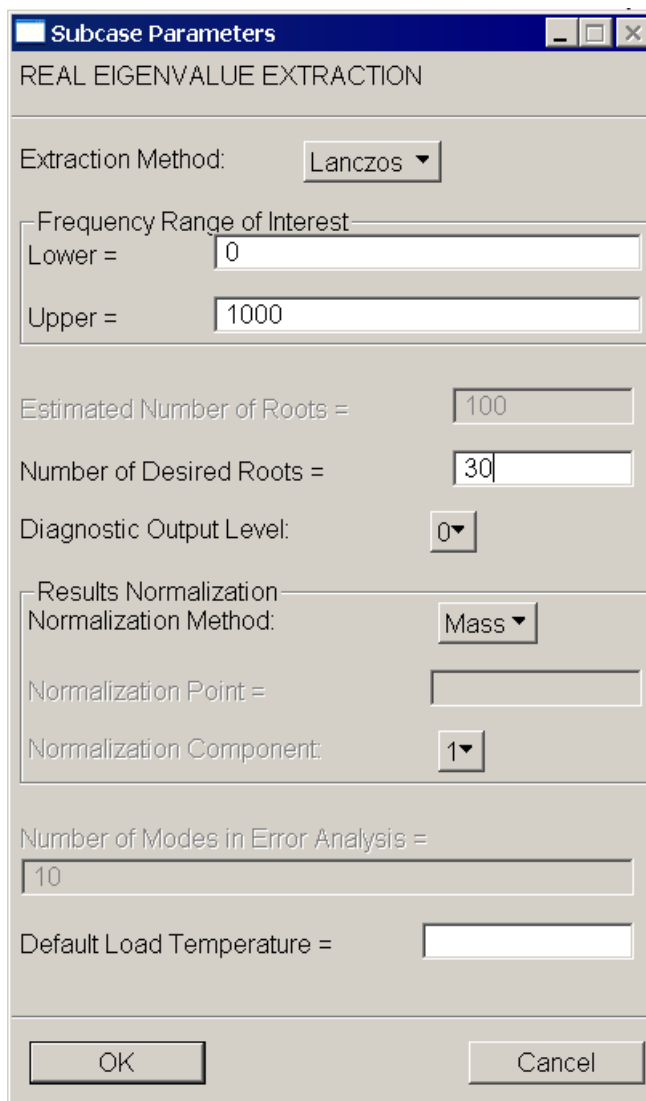


Рис.11.17. Параметры модального анализа программе **MSC.PATRAN**

В приведенном примере требуется рассчитать методом Ланцоша тридцать собственных форм, соответствующих собственным частотам в диапазоне от 0 до 1000 герц. Число собственных форм должно соответствовать числу скалярных точек, указанному в п.7 командой **SPOINT**. Рассчитанные формы нормализуются относительно матрицы масс (М-норма). Данный метод нормализации должен всегда выбираться при подготовке данных для экспорта в **UM**.

10. Вызовите форму **Output Requests...**. В списке **Output Requests** этой формы должен быть один элемент:

```
VECTOR ( SORT1 , REAL ) =ALL
```

Добавьте этот элемент из списка **Select Result Type**, если он не добавлен по умолчанию и удалите остальные элементы списка, если они есть.

11. Чтобы создать датчики напряжений (деформаций) нужно в секцию **Subcase** поместить перечень команд, пример которого представлен ниже.

```
SET 501 = ALL
STRESS(CORNER)=501
SET 502 = 101,111,120 THRU 136, 170
STRAIN(CORNER) = 502
OUTPUT(POST)
SET 101 = ALL
SURFACE 11 SET 101
```

Кратко поясним используемые команды.

**SET** – определяет множество номеров конечных элементов, для которых рассчитываются напряжения или деформации. 501 – номер множества. Он может выбираться произвольно среди номеров, не назначенных ранее. Повторное использование номера переопределяет множество номеров.

**STRESS** – рассчитать напряжения в элементах. После знака равенства указывается номер множества, для которого проводится расчет. Параметр **CORNER** в скобках указывается в случае, когда среди элементов множества присутствуют элементы типа **SQUAD4**. Если данный параметр не указан, напряжения рассчитываются только в центре элемента.

**STRAIN** – рассчитать деформации в элементах.

**OUTPUT** – разделитель команд различного типа. Параметр **POST** – начало вывода напряжений и деформаций.

**SURFACE** – определяет поверхность для расчета напряжений и деформаций. Команда используется для множества элементов типа оболочка (**shell**). Если требуется рассчитать напряжения в объемных элементах (типа **solid**), используется команда **VOLUME**. Например,

```
VOLUME 11 SET 101
```

В приведенном примере множество 501 включает все конечные элементы, множество 502 содержит конечные элементы 101, 111, со 120 по 136 включительно и 170.

Чтобы сделать узел датчиком напряжений или деформаций в программе **UM**, нужно включить все элементы, содержащие этот узел, в состав множества, номер которого является параметром команды **STRESS** или **STRAIN** соответственно.

В **MSC.PATRAN** команды для создания датчиков вводятся в поле **Analysis | Subcases | Direct text input**.

12. Выберите суперэлемент, созданный на этапе 2.2, в форме, которая вызывается кнопкой **Select Superelements...**; поле со списком: **Aviable Superelements**. Нажмите **OK**.
13. Нажмите кнопку **Apply** формы **Subcases**. В результате будет подготовлен новый набор параметров для расчета суперэлемента. При последующих расчетах его следует выбирать с помощью формы **Subcase Select**, которая вызывается одноименной кнопкой на форме **Analysis**.
14. Выберите созданный набор параметров.
15. Запустить расчет модели в **MSC.NASTRAN** кнопкой **Apply** на форме **Analysis**. При успешном завершении расчета в рабочем каталоге будут созданы файлы **geoms.op2** и **matrix.op4**. Диагностика расчета выводится в файл **JobName.f06**. Эта информация может помочь в тех случаях, когда расчет закончился с ошибками. Она может быть полезна и при успешном расчете. Например, в этот файл выводятся рассчитанные частоты и формы в текстовом виде.
16. Созданное задание на расчет сохраняется в базе данных модели (файл с расширением **db**). В дальнейшем, после возможных корректировок модели задание выбирается из списка заданий на форме **Analysis**.

#### 11.2.2.4. Обмен данными с программой **MSC.NSATRAN**

Запустите программу конвертер **NASTRAN\_UM.EXE** для создания файла **input.fum**. Выберите файл **geoms.op2** в каталоге расчета **MSC.NASTRAN** и укажите каталог сохранения **input.fum**. Назначение всех полей понятно по их названиям. Галочками **Напряжения** и **Деформации** включается/отключается вывод соответствующих данных в

файл `input.fum` (рис.11.18). Конечно, эти данные должны быть рассчитаны **MSC.NASTRAN** с помощью команд, указанных в п.11.2.2.3 (п. 11 списка).

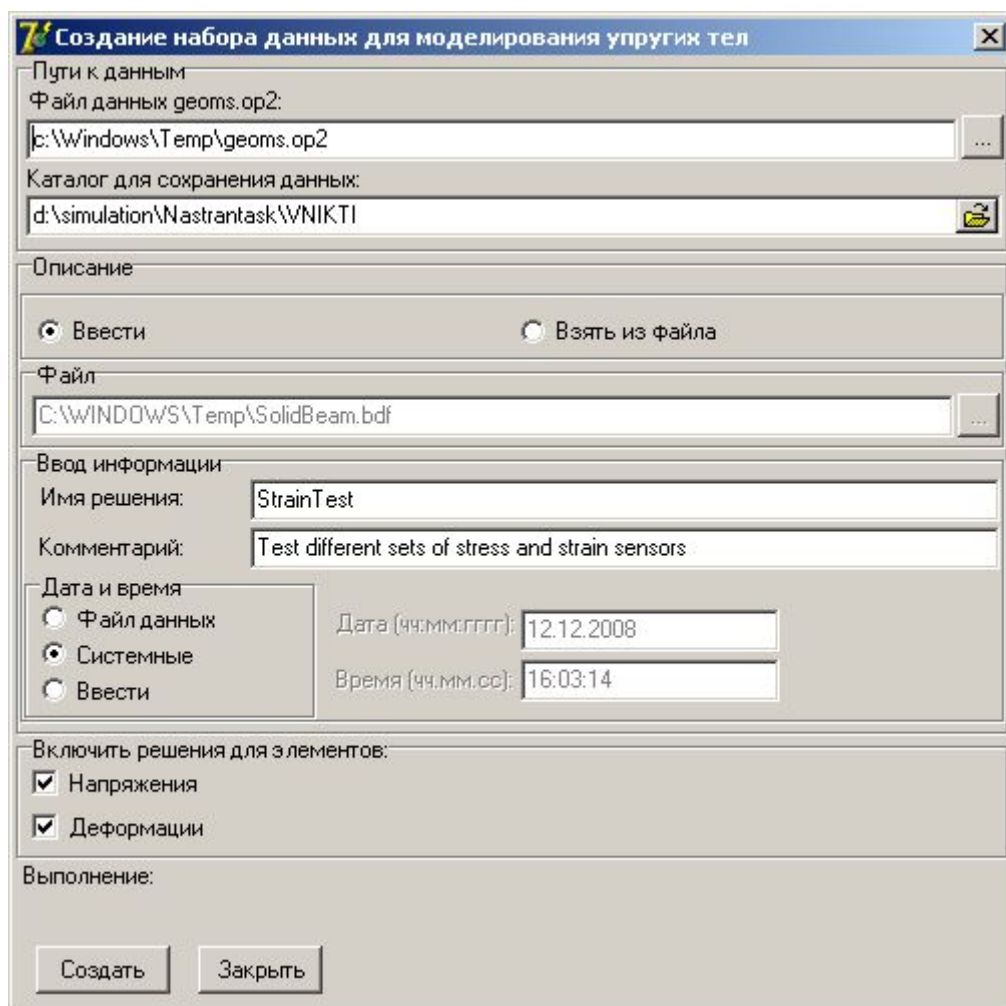


Рис.11.18. Окно программы **NASTRAN\_UM.exe**

Имя решения, комментарий и дату расчета можно ввести в соответствующие поля формы или прочитать из файла задания `JobName.bdf` или файла диагностики `JobName.f06`. Эти данные являются атрибутами модели **UM**, которые записываются в файл `input.fum`.

Выполните преобразование данных кнопкой **Создать**. При успешном выполнении файл `input.fum` будет создан в каталоге, указанном в поле **Каталог для сохранения данных**. Дальнейшая работа с этим файлом описана ниже в п.11.3.

### 11.2.3. Особенности подготовки данных в программе МКЭ

Рассмотрим некоторые особенности, которые следует учитывать при разработке конечно-элементных моделей упругих подсистем.

#### 11.2.3.1. Выбор интерфейсных узлов

При выборе интерфейсных узлов нужно руководствоваться следующими правилами.

1. Интерфейсные узлы нужно выбирать так, чтобы исключить движения подсистемы как абсолютно твердого тела при расчете статических форм. В противном случае модель *математически некорректна*, то есть вообще не может быть построена с использованием данного подхода. На рис.11.19 приведены примеры некорректного (а) и корректного (б) выбора интерфейсных узлов.

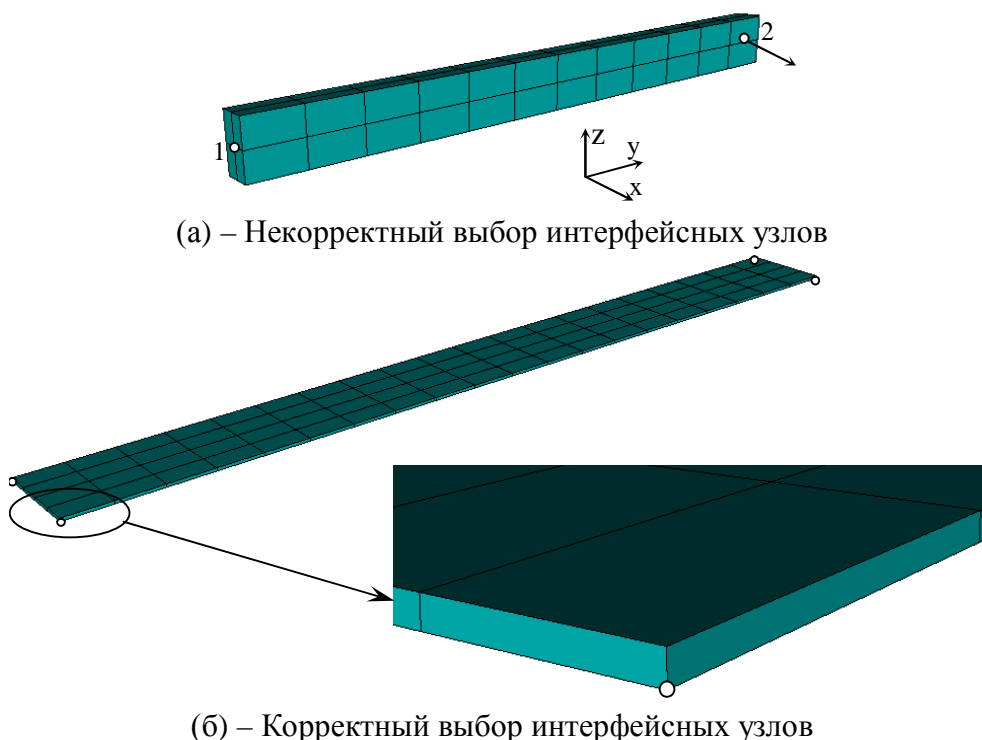


Рис.11.19. Примеры выбора интерфейсных узлов.

○ – интерфейсные узлы.

Обе модели набраны восьмиузловыми объемными элементами, имеющими по 3 поступательных степени свободы в узле. В программе ANSYS соответствующий тип элемента – SOLID45, в MSC.NASTRAN – HEXA.

Два интерфейсных узла (рис. .11.19, а) не обеспечивают неподвижность модели как абсолютно твердого тела при расчете статических форм от поперечных единичных смещений (x или z). Например, при единичном смещении интерфейсного узла 2 вдоль x тело может вращаться вокруг оси z. Вращательные степени свободы в узлах отсутствуют, поэтому фиксация узла 1 не препятствует такому вращению.

При выборе четырех интерфейсных узлов для модели пластины (рис. .11.19, б) все статические формы могут быть корректно рассчитаны.

2. При моделировании в УМ все силы, кроме контактных сил, могут быть приложены только в узлах конечно-элементной сетки. Для повышения точности моделирования желательно, чтобы каждый узел, в котором приложена сила, был интерфейсным. При этом влияние силового фактора на состояние упругого тела зависит от наличия соответствующей степени свободы в узле. Рассмотрим модель УМ, изображенную на рис.11.20. Пластина, состоящая из объемных конечных

элементов, взаимодействует с базой посредством четырех линейных силовых элементов, прикрепленных в интерфейсных узлах. Реальные условия прикрепления силового элемента почти всегда таковы, что при перемещениях пластины в силовом элементе возникают моменты. Отсутствие вращательных степеней свободы в узлах объемных элементов приведет к тому, что действие моментов не будет учтено при моделировании. То есть угловая жесткость силового элемента никак не влияет на результаты исследований. Если в реальности влияние моментов сопоставимо с действием сил со стороны силовых элементов, модель *физически некорректна*.

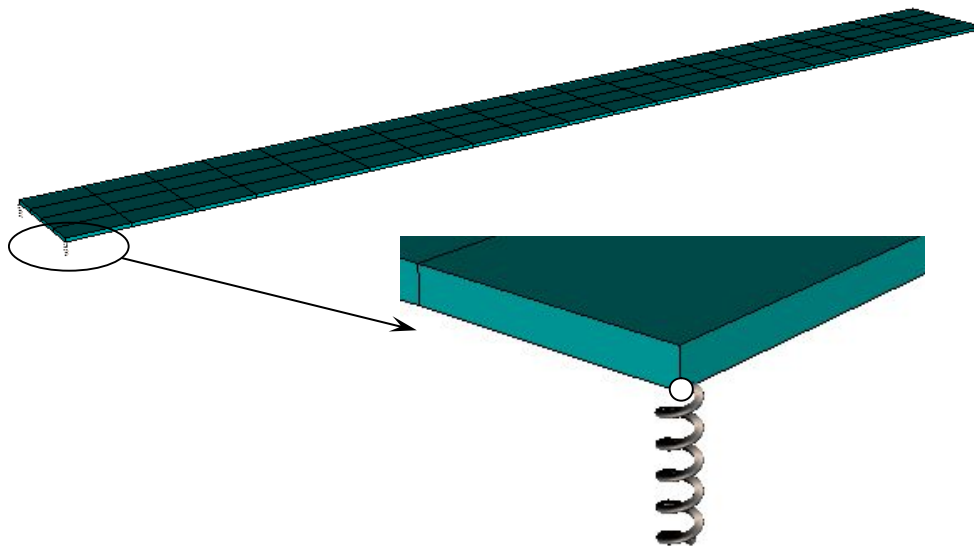


Рис.11.20. Примеры модели **UM** с упругой подсистемой.

Необходимо ввести дополнительные элементы в конечно-элементную модель, чтобы обеспечить шесть степеней свободы в интерфейсном узле. Далее об этом будет сказано подробнее.

4. Все, сказанное выше о силовых элементах, касается также сил реакций в шарнирах. Если, например, попытаться жестко закрепить пластину в двух узлах на любом краю, она может вращаться вокруг оси, проходящей через выбранные узлы, поскольку моментов реакций не возникает.

5. В реальности сила, действующая на подсистему, приложена на некоторой площади в зоне прикрепления силового элемента. Поэтому, если силу распределить среди узлов, окружающих узел, в котором она приложена, модель будет более адекватной по сравнению с сосредоточенной нагрузкой.

6. Если интерфейсный узел имеет менее шести степеней свободы, то во многих случаях уравнения связей строятся некорректно или вообще не могут быть построены.

7. Выбор близко расположенных узлов приводит к высоким частотам в преобразованном наборе данных.

Итак, при подготовке модели необходимо обеспечить шесть степеней свободы в интерфейсном узле и распределение сил по площадке в его окрестности.

Рассмотрим некоторые приемы моделирования, позволяющие эффективно учесть все упомянутые выше особенности.

#### 1. Добавление узловой массы и уравнений связей.

Шесть степеней свободы в интерфейсном узле вводятся посредством добавления одноузлового элемента типа «сосредоточенная масса», включающего этот узел. В программе **ANSYS** используется тип конечного элемента **MASS21** с моментами инерции ( $keyopt(3)=0$ ), в **MSC.NASTRAN** – тип **CONM2**.

Для данного элемента задаются очень малые инерционные параметры по сравнению с инерционными параметрами подсистемы.

После добавления элемента сосредоточенной массы вращательные степени свободы в интерфейсном узле не связаны с другими степенями свободы модели, то есть их изменение никак не повлияет на состояние упругой подсистемы.

Чтобы связать вращательные степени свободы в интерфейсном узле с поступательными степенями свободы других узлов добавляются уравнения связей.

В программе **ANSYS** для этого можно использовать пункт меню

Preprocessor > Coupling/Seqn > Rigid Region

или команду

**CERIG**, *MASTER*, *SLAVE*, UXYZ,

где *MASTER* – номер интерфейсного узла, *SLAVE* – номер узла, степени свободы которого исключаются, UXYZ – исключаются поступательные степени свободы. Если значение *SLAVE=ALL*, исключаются степени свободы всех выбранных узлов. Правила построения уравнений связей подробно описаны в документации программы **ANSYS**. Для их задания можно также использовать команду **CE**.

В программе **MSC.NASTRAN** уравнения связей вводятся посредством элемента типа RBE2

**RBE2** EID GN CM GM1 GM2 GM3 ...,

где EID – номер элемента, GN – номер узла с независимыми степенями свободы, CM – номера исключаемых (зависимых) степеней свободы, задаются от 1 до 6 без пробелов, GM<sub>i</sub> – номера связанных узлов, степени свободы которых исключаются. Например, следующая строка в файле задания **NASTRAN**

RBE2        163        62        123456    61        103        185

вводит уравнения связей с номером 163, 62 – номер узла с независимыми степенями свободы, с ним связаны узлы с номерами 61, 103, 185, уравнения связей строятся для всех шести степеней свободы в узлах.

Чтобы ввести элемент указанного типа в среде **MSC.PATRAN** используется форма, вызываемая кнопкой **Elements** панели инструментов. На форме выбираются следующие значения элементов управления (рис.11.21):

**Action:** Create

**Object:** MPC (Multipoint Constraints)

**Type:** RBE2

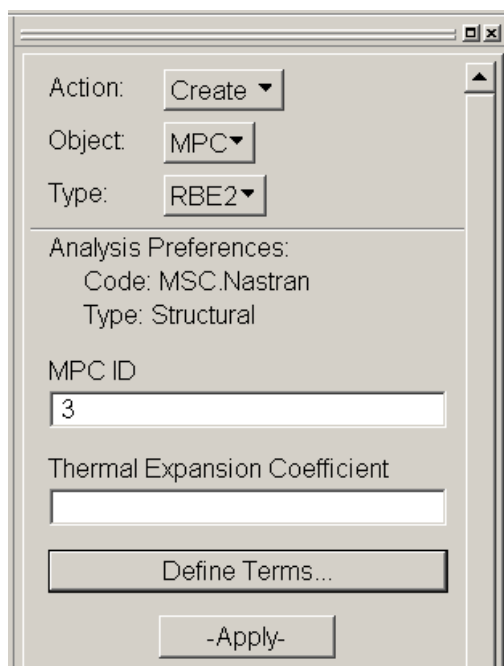


Рис.11.21. Ввод уравнений связей в MSC.PATRAN

Узлы, входящие в уравнения связей, задаются на форме, вызываемой кнопкой **Define Terms....**

Таким образом, создается абсолютно жесткая площадка, имеющая шесть степеней свободы. Узлы для ее создания выбираются пользователем, исходя из условий взаимодействия данной упругой подсистемы с другими подсистемами и телами объекта исследований.

Рассмотрим использование уравнений связей на примере моделирования кривошипно-ползунного механизма (рис.11.22) с упругим шатуном (рис.11.23).

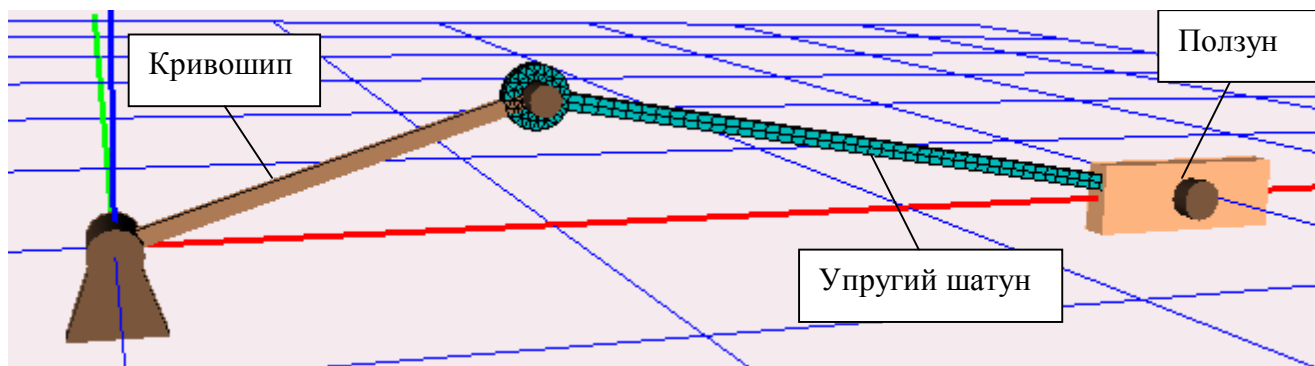


Рис.11.22. Кривошипно-ползунный механизм с упругим шатуном

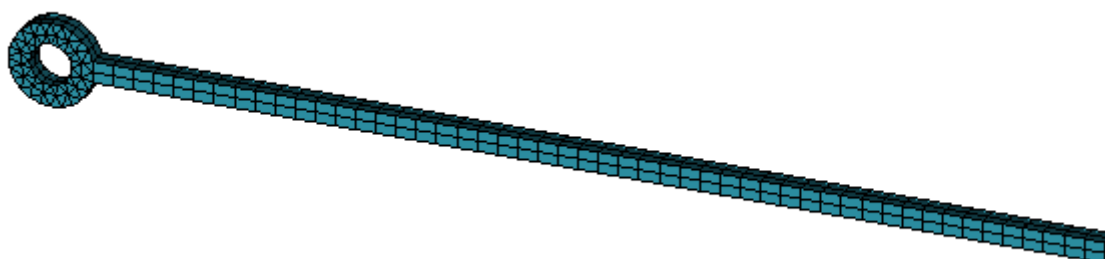


Рис.11.23. Конечно-элементная модель шатуна

Упругий шатун имеет два интерфейсных узла: в центре торцевого сечения, где он присоединяется к ползуну вращательным шарниром и на оси вращения шатуна вокруг кривошипа, в середине по глубине цилиндрического отверстия.

Согласно подходу добавим сосредоточенную массу в интерфейсный узел на торце шатуна и уравнения связей (рис.11.24).

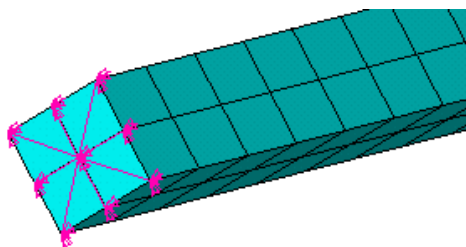


Рис.11.24. Уравнения связей на торце шатуна

На другом конце шатуна нужно выполнить следующие действия:

- добавить узел на оси вращения шатуна;
- добавить сосредоточенную массу в этот узел;
- связать добавленный узел с набором узлов на поверхности цилиндрического отверстия уравнениями связей.

Результат изображен на рис. .11.25.

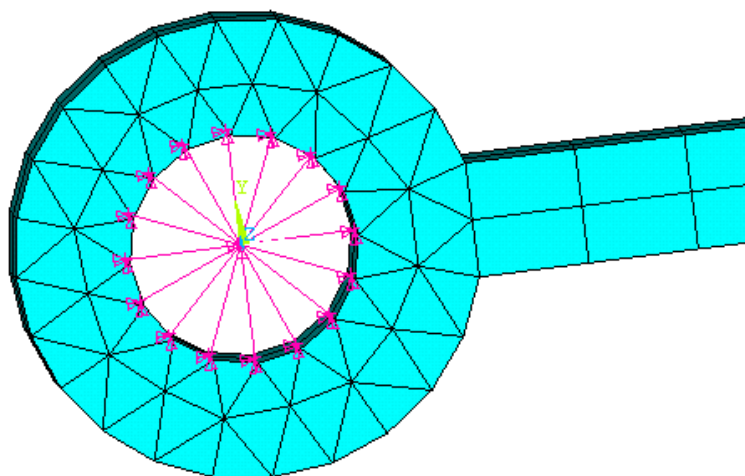


Рис.11.25. Уравнения связей в цилиндрическом отверстии шатуна

### 2. Добавление набора стержней.

Альтернативным подходом, который применяется для распределения нагрузки, приложенной в узле, является использование набора балочных элементов, например, BEAM4 в среде ANSYS. Необходимо использовать балки очень малой массы и высокой жесткости. В противном случае собственные частоты и формы модели, а также ее статические формы могут измениться существенно.

Необходимые параметры балок задаются посредством подбора характеристик материала и параметров сечения.

При использовании балок сосредоточенные массы в интерфейсном узле создавать не нужно, поскольку каждый узел балочного элемента имеет шесть степеней свободы.

Пример использования элементов данного типа при моделировании упругого шатуна изображен на рис.11.26, 11.27.

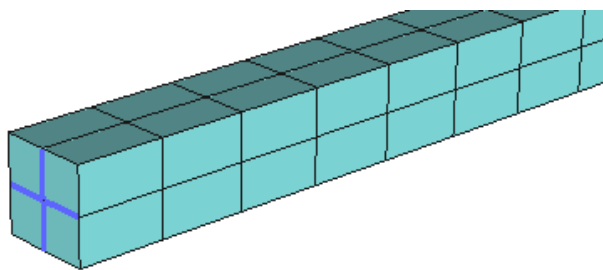


Рис.11.26. Балочные элементы на торце шатуна

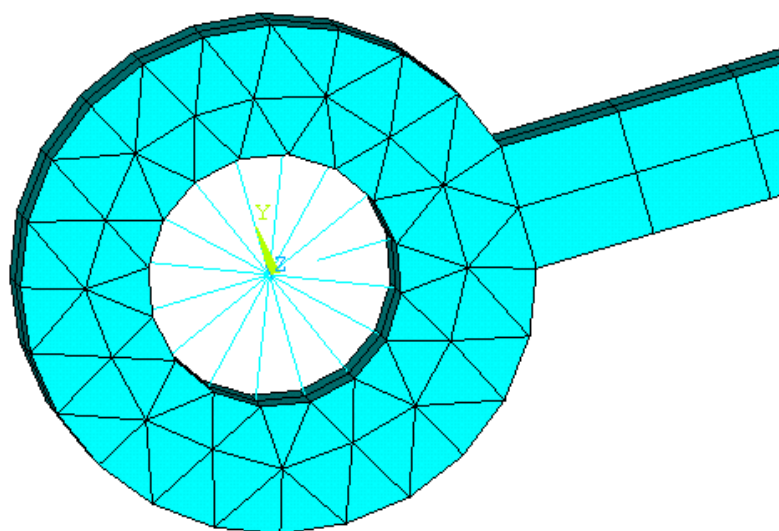


Рис.11.27. Балочные элементы в цилиндрическом отверстии шатуна

### 11.2.3.2. Контроль нормалей к поверхностям оболочек и пластин

Программа МКЭ может рассчитать и сохранить в файле результатов компоненты напряжений и деформаций в узлах элементов, после чего программа-конвертер преобразует их и записывает в файл `input.fum` или `input.fss` (см. п.п.11.2.1, 11.2.2). Число компонент напряжений в узле определяется типом элемента. Для некоторых типов число рассчитываемых компонент зависит от настроек. Например, для элемента оболочки `SHELL63` в **ANSYS** при значении `keyopt(11)=0` сохраняются компоненты напряжений на верхней и нижней поверхностях; при `keyopt(11)=2` – на верхней, нижней и срединной поверхностях.

Для расчета напряжений в **UM** используются переменные (п.11.5.3.3). **UM** предоставляет возможность рассчитать средние напряжения в узле по всем однотипным элементам, содержащим этот узел. Однако **UM** не контролирует нормали к плоскостям элементов. Поэтому для корректного расчета средних напряжений пользователь должен контролировать нормали к элементам оболочек и пластин при подготовке модели в программе МКЭ.

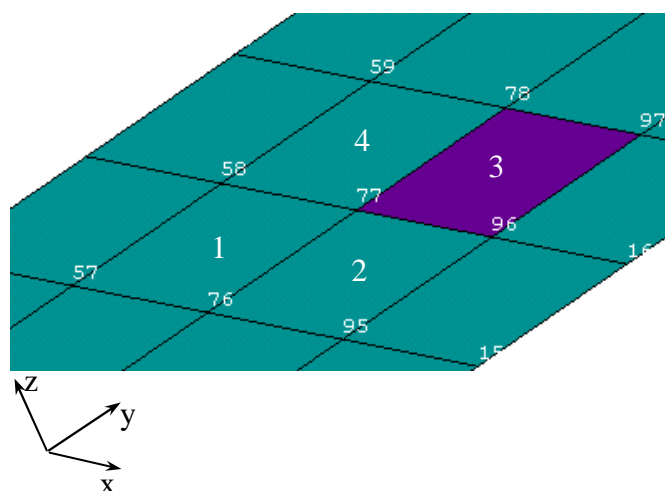


Рис.11.28. К расчету средних напряжений на поверхностях пластины

Рассмотрим пример расчета средних напряжений в узле на верхней поверхности пластины (рис.11.28), набранной в **ANSYS** элементами **SHELL63**. Как известно, верх определяется направлением вектора нормали. Нормаль к плоскости выделенного конечного элемента – (0.0,0.0, -1.0); векторы нормалей к плоскостям остальных элементов – (0.0,0.0,1.0). Корректный расчет средних напряжений в узле 77, например, предполагает осреднение значений на верхней поверхности элементов 1,2,4 и нижней поверхности элемента 3.

Для расчета напряжений на нижней поверхности пластины в узле 77 нужно рассмотреть нижнюю поверхность элементов 1,2,4 и верхнюю – элемента 3.

Рассмотренная ситуация не анализируется программой **UM**. Для правильного расчета напряжений в **UM** пользователь должен проконтролировать описание соответствующих конечных элементов на этапе подготовки данных в программе **ANSYS**.

Изменить направление нормали к плоскости элемента на противоположное можно с помощью пункта меню **ANSYS Preprocessor > Modeling > Move / Modify > Reverse Normals > of Shell Elements** или использовать команду **ENSYM**.

Использование переменных для расчета напряжений в программе **UMSimul** подробно рассмотрено в п.11.5.3.3.

### 11.3. Мастер упругих подсистем

Мастер подготовки данных упругих подсистем реализован в рамках модуля описания объекта моделирования **UMInput** и предназначен для контроля данных, подготовленных с помощью программ конечно-элементного анализа (в первую очередь визуального контроля рассчитанных собственных и статических форм) и преобразования данных. Программа также предоставляет возможность формирования новых наборов данных на базе множества рассчитанных форм путем исключения некоторых из них. В рамках мастера реализованы функции ортогонализации форм с исключением форм колебаний подсистемы как абсолютно твердого тела аналогично функциям программы **ANSYS\_UM**.

Для вызова мастера подготовки данных используется пункт **Инструменты | Мастер упругих подсистем...** основного меню модуля ввода данных **UMInput**. Экранная форма мастера содержит анимационное окно и управляющую форму (рис.11.29).

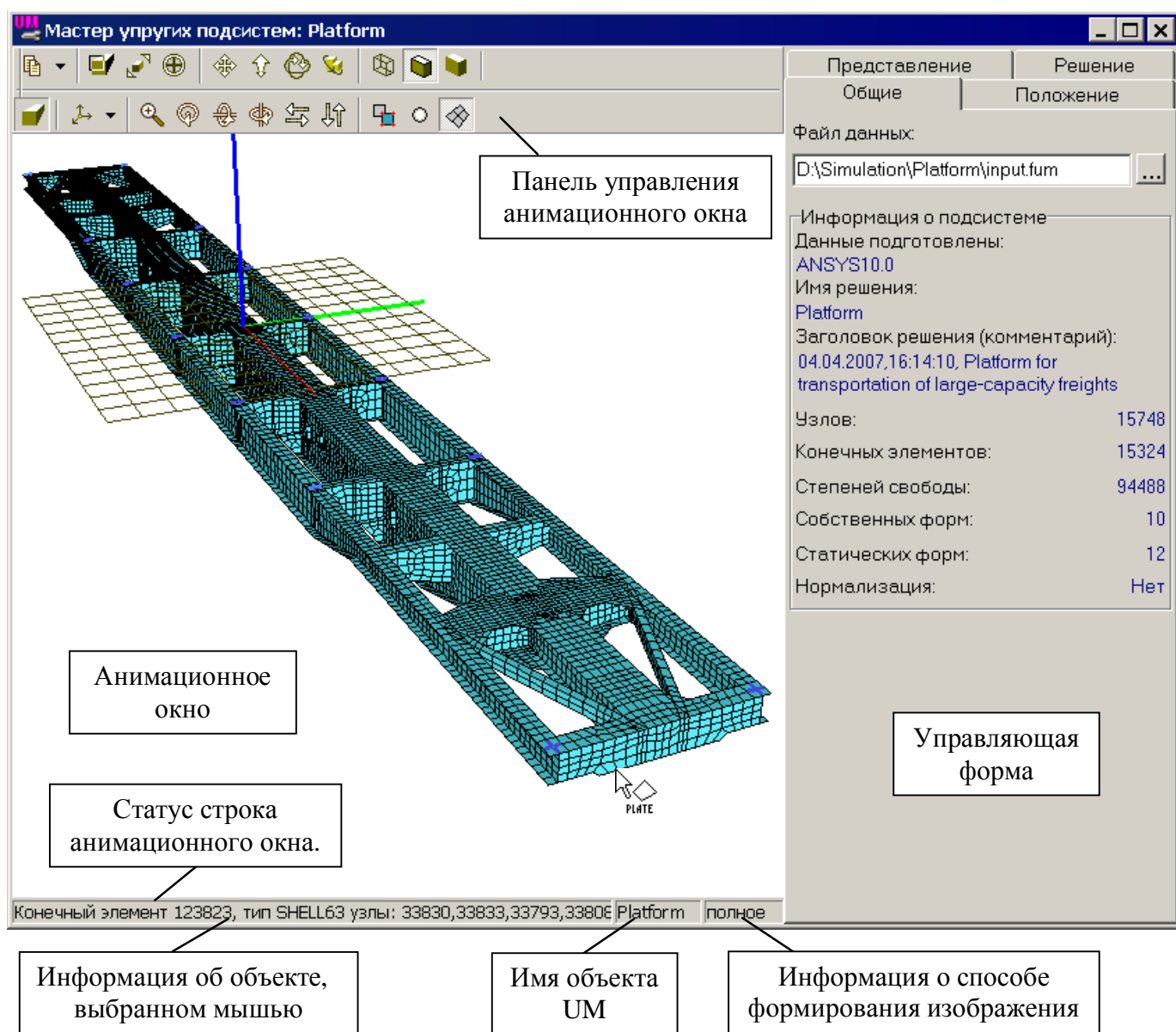




Рис.11.29. Экранная форма мастера подготовки данных упругой подсистемы


### 11.3.1. Анимационное окно


Анимационное окно предназначено для отображения конечно-элементной сетки упругого тела, а также визуализации форм упругого тела в режиме анимации. Правила работы с анимационным окном, функции кнопок панели инструментов и пунктов всплывающего меню анимационного окна описаны в п.3.3.1.2. Отметим дополнительные функции, связанные с отображением конечно-элементной сетки:

- изменение вида курсора мыши в соответствии с объектом, на который указывает курсор:

 – узел конечно-элементной сетки;




 – одномерный конечный элемент: стержневой (балочный), элемент типа «связь», труба (тонкостенный стержень);

 – конечный элемент оболочки (пластины);

 – конечный элемент объема (трехмерной области);





- отображение информации об объектах конечно-элементной сетки в строке статуса анимационного окна при наведении на них курсора мыши;

- дополнительные кнопки на панели управления, позволяющие задать некоторые параметры отображения конечно-элементной модели:

-  – переключение между упрощенным (кнопка нажата) и полным (кнопка не нажата) изображением конечно-элементной сетки;
-  – рисовать узлы;
-  – рисовать конечные элементы;

Особенности упрощенного и полного изображения модели будут описаны ниже.

Кроме того, панель содержит дополнительные кнопки управления положением и размером изображения объекта в анимационном окне:

-  – увеличение (левая кнопка мыши) или уменьшение (правая кнопка мыши);
-  – поворот вокруг оси X/Y/Z по часовой стрелке (левая кнопка мыши) или против часовой стрелки (правая кнопка мыши):
  - простое нажатие кнопки мыши – вращение вокруг перпендикулярной / горизонтальной / вертикальной экранной оси, быстро;
  - +Ctrl – вращение вокруг перпендикулярной / горизонтальной / вертикальной экранной оси, медленно;
  - +Shift – вращение вокруг оси X/Y/Z СК0, быстро;
  - +Ctrl+Shift – вращение вокруг оси X/Y/Z СК0, медленно;
-  – смещение влево (левая кнопка мыши) или вправо (правая кнопка мыши);
-  – смещение вверх (левая кнопка мыши) или вниз (правая кнопка мыши).

Описанные группы кнопок можно спрятать/показать с помощью всплывающего меню (рис.11.30).

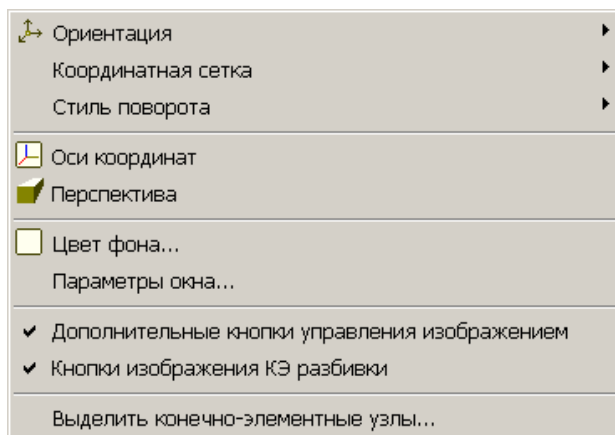


Рис .11.30.

### 11.3.2. Управляющая форма

Управляющая форма содержит четыре вкладки.

- **Общие** – отражает общую информацию об упругой подсистеме.
- **Решение** – содержит информацию о решении, которая отображается на четырех вложенных вкладках:
  - **Формы** - содержит информацию о рассчитанных формах, а так же элементы управления, позволяющие просмотреть формы в режиме анимации, исключить некоторые формы из набора данных, выполнить ортогонализацию форм;
  - **Твердое тело** – отображает инерционные параметры упругой подсистемы как абсолютно твердого тела;
  - **Интерфейсные узлы** – отображает список интерфейсных узлов и содержит элементы, управляющие их отображением в анимационном окне;

- **Датчики** – отображает список узлов-датчиков, а также информацию о конечных элементах, содержащих датчики. При отсутствии датчиков закладка невидима.
  - **Представление** – содержит элементы управления формированием графического отображения упругой подсистемы.
  - **Положение** – содержит элементы управления, позволяющие изменить положение и ориентацию подсистемы относительно СК0.
- Далее опишем правила работы с управляющей формой.

### 11.3.2.1. Вкладка «Общие»

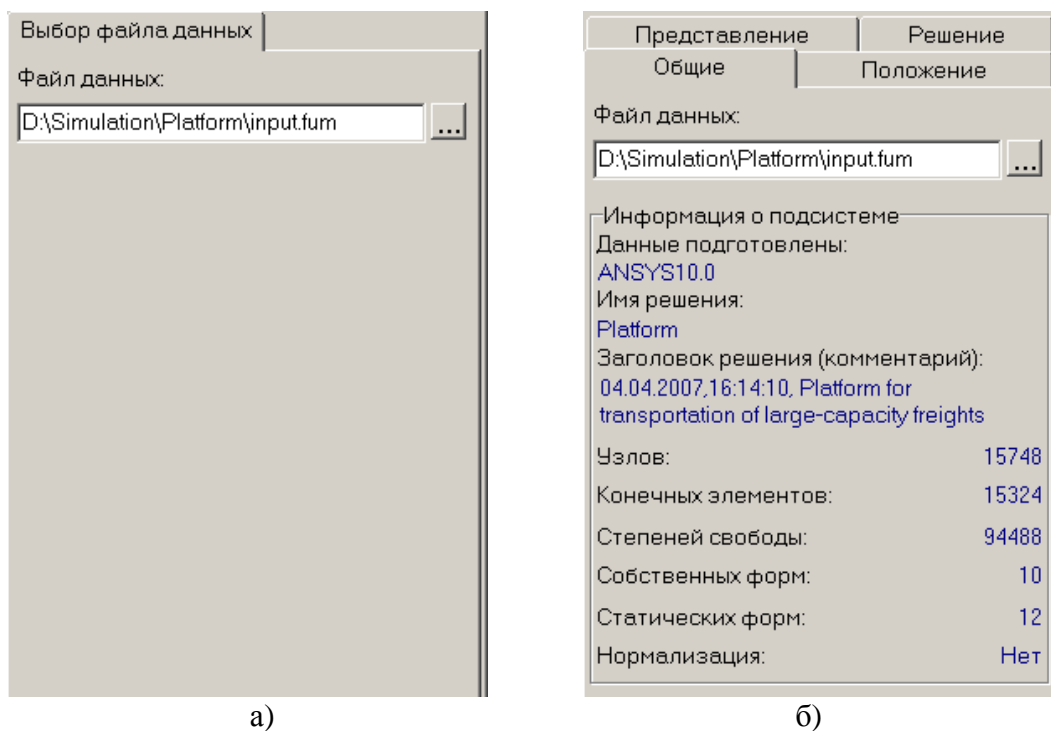


Рис.11.31. Состояния вкладки **Общие**

После запуска мастера, до выбора файла с данными упругой подсистемы вкладка имеет заголовок **Выбор файла данных** (рис.11.31.а). Поле **Файл данных** содержит имя файла данных упругой подсистемы, который открывался при последнем сеансе работы с мастером. Если мастер запускается впервые данное поле пустое. Для выбора файла воспользуйтесь кнопкой **...**, при нажатии которой откроется окно выбора файла данных упругой подсистемы (рис.11.32).

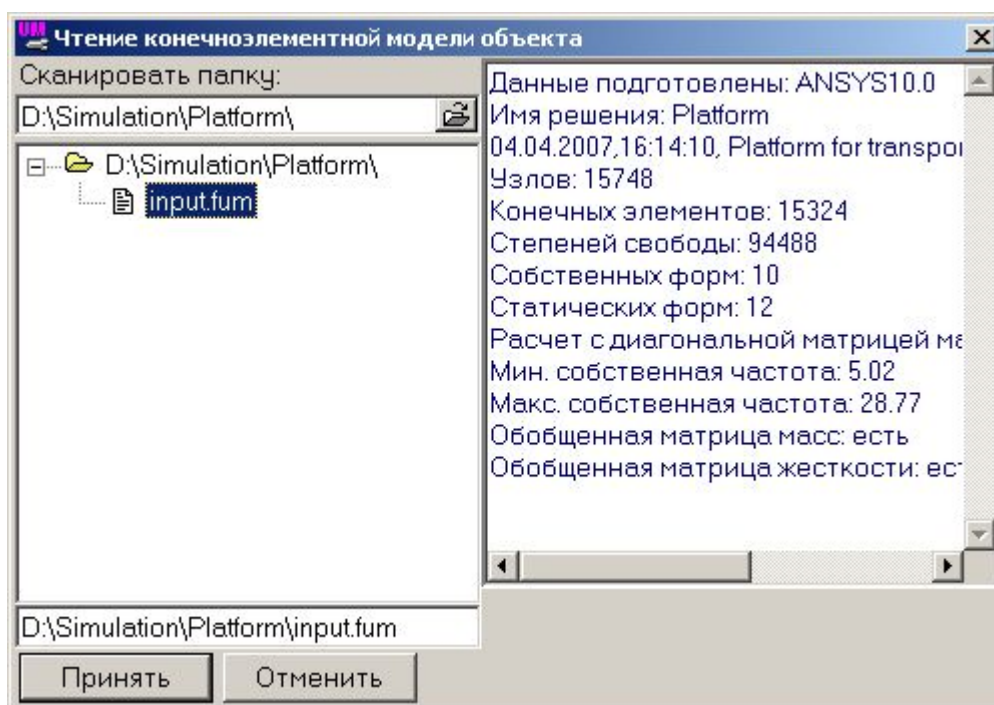


Рис.11.32.

Функционально эта форма схожа с формой выбора объекта п.3.2.1. Она имеет следующие основные отличия:

- выбирается файл данных с расширением `fum`, а не каталог объекта;
- на правой панели отображается текстовая информация об упругой подсистеме, а не ее графическое изображение;

После чтения файла данных вкладка приобретает вид, представленный на рис.11.31.б.

### 11.3.2.2. Вкладка «Решение»

Опишем состав и назначение элементов управления, расположенных на вкладке **Решение** (рис.11.33).

- Переключатель **Наборы данных** позволяет сделать текущим исходный, либо преобразованный набор форм. Данный элемент управления недоступен, если преобразованный набор форм не построен.

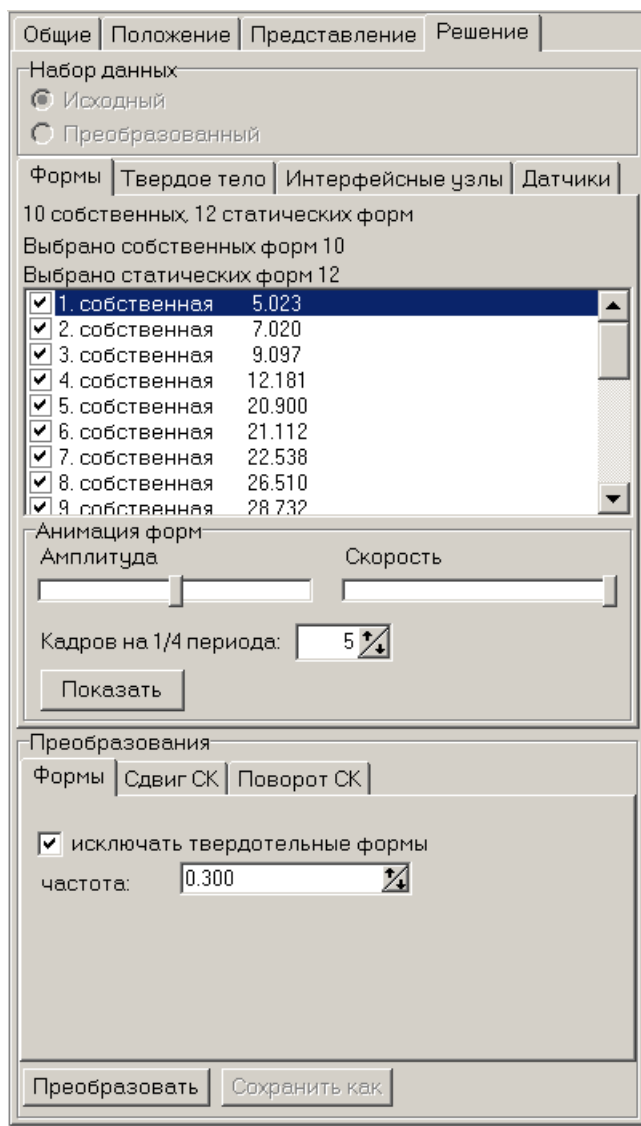


Рис.11.33.

В средней части формы расположены четыре вкладки: **Формы**, **Твердое тело**, **Интерфейсные узлы** и **Датчики**.

- Вкладка **Формы** (рис.11.33) содержит следующие элементы.
  - Текстовые строки, информирующие об общем количестве собственных и статических форм в исходном наборе данных, а также количество выбранных форм каждого вида в списке.
  - Список форм. Каждому элементу списка соответствует форма упругой подсистемы. Элемент списка содержит следующую информацию:
    - порядковый номер формы в наборе;
    - вид формы: собственная либо статическая;
    - собственную частоту соответствующую собственной форме;
    - признак выбора формы для включения в преобразованный набор данных.

Список заполняется в следующем порядке:

- собственные формы по возрастанию значений соответствующих собственных частот;
- статические формы в соответствии с порядком расчета в программе конечно-элементного анализа.

Назначение списка форм.

- Информировать о составе набора форм.
- Позволяет сформировать новый набор форм как подмножество исходного набора. Новый набор содержит формы, соответствующие элементам списка с установленными

флажками. Включить/выключить флажок можно с помощью мышки, либо клавишей «пробел» клавиатуры. Для выбора либо отмены выбора всех форм исходного набора воспользуйтесь всплывающем меню списка (рис.11.34). Оно позволяет также сохранить индексы выбранных форм в текстовый файл и загрузить их из файла.

- Позволяет выбрать упругую форму для отображения в анимационном окне.

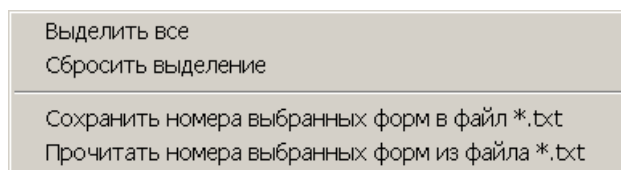


Рис .11.34. Контекстное меню списка форм исходного набора данных.

- Группа **Анимация форм** содержит следующие элементы.
  - Кнопка **Показать**, по нажатию которой стартует анимация выбранной формы.
  - Регуляторы **Амплитуда** и **Скорость** задают соответственно максимальный масштаб изображения формы и частоту смены кадров.

**Примечание.** Максимально доступная скорость анимации зависит от числа узлов, числа конечных элементов упругой подсистемы, мощности компьютера, а также режима отрисовки (см. вкладку **Представление**).

- Вкладка **Твердое тело** информирует о координатах центра масс, значениях массы и момента инерции упругой подсистемы относительно осей системы координат, в которой она описана (рис.11.35.).

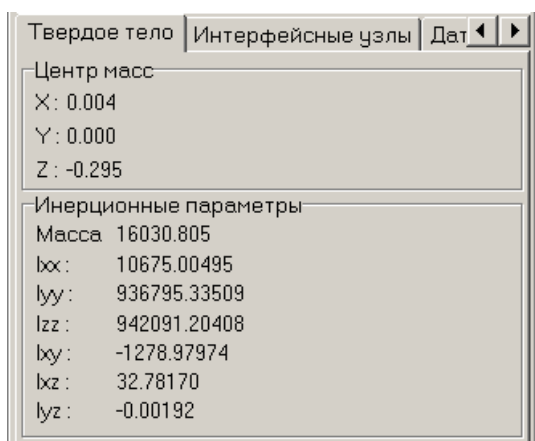


Рис.11.35. Вкладка **Твердое тело**

- Вкладка **Интерфейсные узлы** (рис.11.36) содержит список интерфейсных узлов и позволяет настроить режим их отображения в анимационном окне.

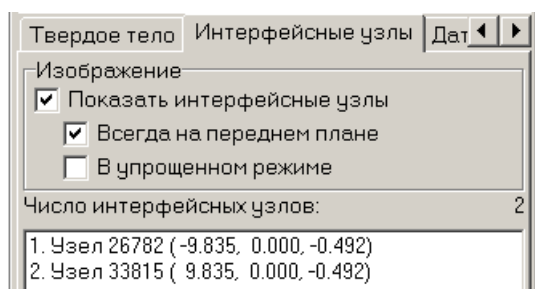


Рис.11.36. Вкладка **Интерфейсные узлы**.

- Вкладка **Датчики** (рис.11.38) содержит список узлов-датчиков и согласованный список конечных элементов, содержащих датчик, выбранный в списке. Списки датчиков напряжений и

деформаций располагаются на отдельных вкладках. Вкладка отсутствует, если список датчиков соответствующего типа пуст. Датчик можно не включать в преобразованный набор данных, для этого нужно выключить флажок в левой части элемента списка. При выборе датчиков можно воспользоваться контекстным меню (рис.11.37).

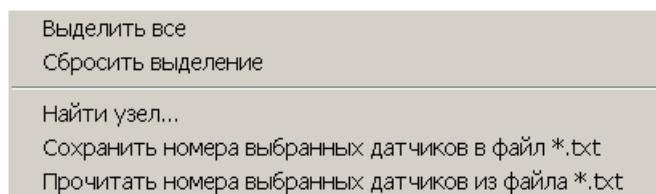


Рис .11.37. Контекстное меню списка датчиков.

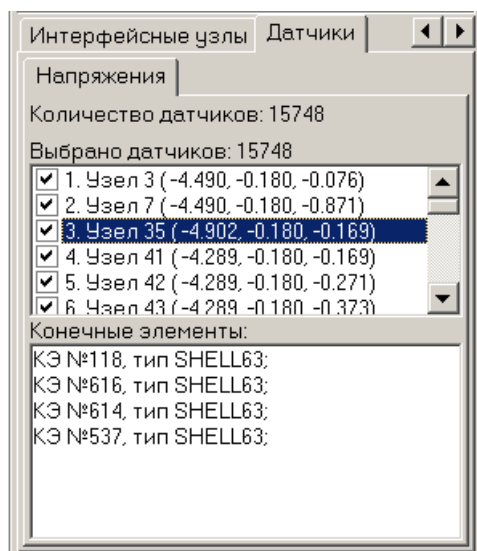


Рис.11.38. Вкладка Датчики

- Группа элементов **Преобразования** включает три вкладки: **Формы**, **Сдвиг СК** и **Поворот СК** (рис.11.39).

Вкладка **Формы** по назначению практически совпадает с вкладкой **Настройки** главной формы программы **ansys\_um** (см. п. 11.4.).

- По нажатию кнопки **Преобразовать** выполняются ортогонализация выбранных форм упругой подсистемы (преобразования 11.4, 11.5). При этом создается новый набор форм, исходные формы не изменяются. В случае успешного завершения вычислений переключатель **Наборы форм** становится доступным и принимает значение **Преобразованные**, то есть активизируется (становится текущим) созданный набор форм, что позволяет визуально проконтролировать результаты преобразований. Кнопка **Сохранить как** становится доступной.
- Флажок **исключать твердотельные формы** в подавляющем большинстве случаев должен быть включен. Выключается он, например, в следующем случае. Редко в процессе преобразований программе UM не удастся выделить твердотельные формы. Одной из причин могут быть ошибки, допущенные пользователем при создании модели. В некоторых случаях их удастся обнаружить, просмотрев первые шесть форм, которые обычно являются твердотельными. Однако всегда окончательный расчет, формирующий корректный набор данных, должен выполняться при включенном флажке.
- В поле **Частота** задается максимальная собственная частота, для которой собственная форма рассматривается как твердотельная (см. пояснение в п. 11.4).

Вкладка **Сдвиг СК** содержит элементы, позволяющие сдвинуть систему координат конечно-элементной модели. Во многих случаях это может быть удобно и полезно.

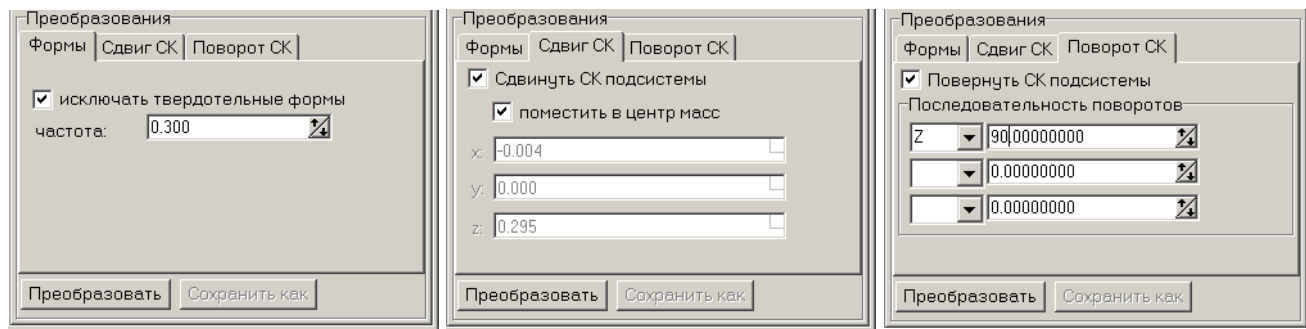


Рис.11.39. Вкладки, расположенные на панели **Преобразования**.

Параметры абсолютно твердых тел в **УМ** удобно задавать относительно СК, начало отсчета которой совпадает с центром масс. Чаще всего так и поступают. Чтобы сохранить подобное правило в отношении упругих тел можно установить флажки **Сдвинуть СК подсистемы** и **Поместить в центр масс**. Координаты узлов преобразованного набора данных будут заданы в СК, оси которой параллельны локальной СК исходной модели, а начало отсчета совпадает с центром масс. При этом координаты центра масс в исходной СК будут подставлены в поля **x,y,z**. Кроме того, если локальная СК помещается в центр масс, уменьшаются значения моментов инерции относительно ее осей, а также уменьшается связь между движением подсистемы как абсолютно твердого тела и упругими перемещениями. Это благоприятно сказывается на эффективности моделирования динамики упругой подсистемы.

Однако заметим, что смещение локальной СК затрудняет идентификацию узлов по координатам. То есть узел модели в программе МКЭ (**ANSYS** или **NASTRAN**) и **УМ** будет иметь разные координаты.

Если не устанавливать флажок **Поместить в центр масс**, можно задать любой сдвиг локальной СК в полях **x,y,z**.

С помощью элементов вкладки **Поворот СК** можно изменить ориентацию системы координат конечно-элементной модели. При этом замечание об идентификации координат узлов также следует иметь в виду.

Преобразование набора данных выполняется кнопкой **Преобразовать**. При успешном завершении появляется соответствующее сообщение и кнопка **Сохранить как** становится доступной.

Она предназначена для сохранения данных с набором ортогонализированных форм. Полный путь к данным подсистемы задается в диалоге (рис.11.40).

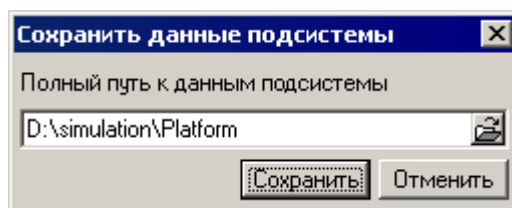


Рис.11.40.

В результате будет сформирован файл данных `input.fss` и помещен в указанный каталог. Для создания другого набора данных сделайте текущим исходный набор форм с помощью переключателя **Наборы форм** и повторно воспользуйтесь элементами управления, описанными в настоящем пункте.

### 11.3.2.3. Вкладка «Представление»

Элементы управления, расположенные на вкладке **Представление** (рис.11.41) предназначены для настройки графического вида конечно-элементной схемы упругой подсистемы.

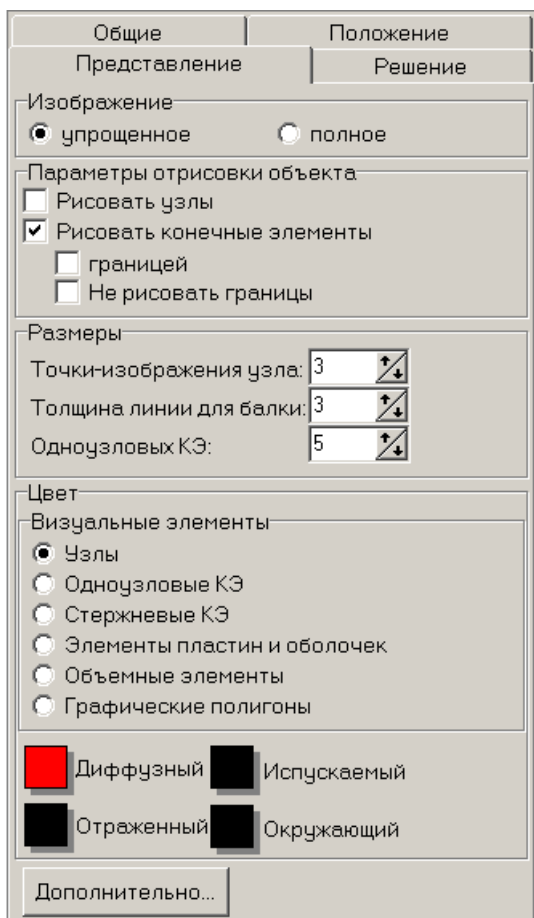


Рис.11.41. Вкладка **Представление**

- Переключатель **Изображение** позволяет выбрать способ формирования графического изображения.  
При выборе варианта **упрощенное** подсистема отображается как один графический элемент, содержащий набор полигонов, соответствующий конечно-элементной сетке. При этом недоступен режим получения информации о конечных элементах при наведении на них курсора мыши. Объект имеет цвет графических полигонов (см. группа элементов **Цвет**). Режим **упрощенное** предназначен для конечно-элементных схем большого размера и позволяет ускорить формирование изображения примерно в два-три раза по сравнению с полным, в том числе при анимации форм упругой подсистемы.  
В режиме **полное** каждому узлу и конечному элементу подсистемы соответствует графический элемент. При наведении на него курсора мыши в анимационном окне можно получить информацию о соответствующем объекте, которая отображается на первой панели строки статуса.
- Флажок **Рисовать узлы** включает/выключает изображение узлов в анимационном окне.
- Флажок **Рисовать конечные элементы** включает/выключает изображение конечных элементов окне.
- Флажок **границей** управляет режимом заполнения (закрашивания) полигонов, соответствующих конечным элементам. Флажок доступен при включенном флажке **Рисовать конечные элементы**.
- Включенный флажок **Не рисовать границы** скрывает контуры конечных элементов.

Функции элементов группы **Параметры отрисовки объекта** и переключателя **Изображение** могут выполняться также кнопками панели анимационного окна. Состояния кнопок и указанных элементов управления изменяются согласованно.

- Группа элементов управления **Размеры**. Поля **Точки-изображения узла**, **Толщина линии для балки** и **Одноузловых КЭ** (конечных элементов) предназначены для задания значений в пикселях соответствующих параметров.
- Группа элементов управления **Цвет** служит для назначения цвета графическим элементам в соответствии с типом отображаемого объекта. Она содержит переключатель **Визуальные элементы**, и набор цветowych квадратиков, посредством которых вызывается стандартный диалог выбора соответствующего цвета. Выберите тип объекта, для которого устанавливается цвет с помощью переключателя, и задайте цвета, выбрав мышкой соответствующий квадратик. Типы цветов:
  - диффузный (собственный цвет графического элемента);
  - отраженный (цвет отраженного блика), черный цвет соответствует отсутствию блика;
  - испускаемый (объект «светится» заданным цветом), черный цвет соответствует отсутствию свечения;
  - окружающий (обычно не используется).
- Другие характеристики изображения конечно-элементной модели можно настроить с помощью формы, которая вызывается кнопкой **Дополнительно...** (рис.11.42)

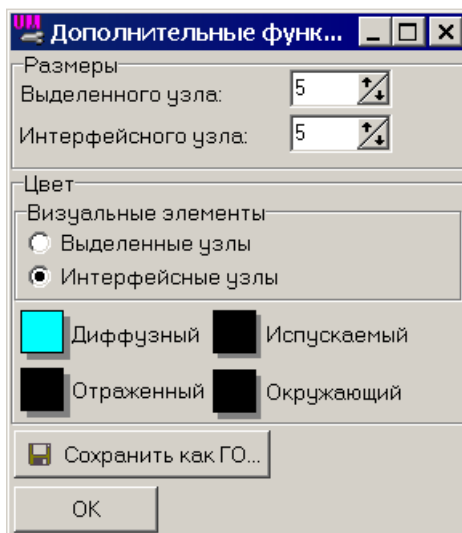


Рис.11.42. Форма дополнительных настроек изображения КЭ модели

Кнопка **Сохранить как ГО...** позволяет сформировать графический объект типа полиэдр из полигонов поверхности конечно-элементной модели и сохранить его в файл с расширением `img`. Затем этот файл можно прочесть в программе ввода и назначить графический объект любому телу модели или сцене.

### 11.3.2.4. Вкладка «Положение»

Вкладка содержит элементы управления, позволяющие изменить положение и ориентацию упругой подсистемы относительно базовой системы координат (рис.11.43). Используется последовательность преобразований: сдвиг, последовательность трех поворотов, сдвиг. Указанные преобразования влияют только на отображение конечно-элементной схемы в анимационном окне.

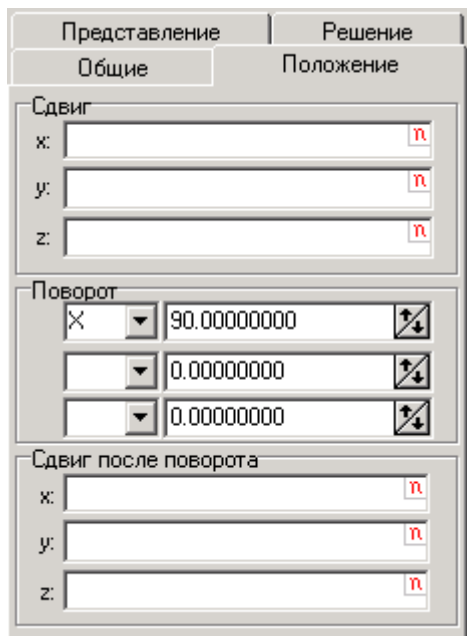


Рис.11.43.

Следующим этапом построения модели объекта, содержащего упругую подсистему, является описание взаимодействий данной подсистемы с другими подсистемами и телами составного объекта. Этот этап выполняется с помощью конструктора объектов, реализованного в рамках модуля **UMInput** (см. раздел 3 руководства).

### 11.3.3. Форма выбора узлов

Форма выбора узлов (рис.11.44) используется несколькими компонентами **UM** при моделировании упругих тел: при выборе контактных узлов силового элемента типа «Контакт Упругое тело – Упругое тело», при выборе групп узлов в модуле расчета долговечности, который вызывается из **UMSimul** и пр. Она может быть использована для пометки некоторых узлов (например, узлов датчиков напряжений), чтобы контролировать их положение при сборке объекта.

Опишем форму выбора узлов в рамках описания мастера упругих подсистем, поскольку здесь мы сталкиваемся с ней впервые.

Если в анимационном окне отображается хотя бы одна упругая подсистема, форма может быть вызвана с помощью контекстного меню, пункт **Выделить конечно-элементные узлы...** (рис.11.30.).

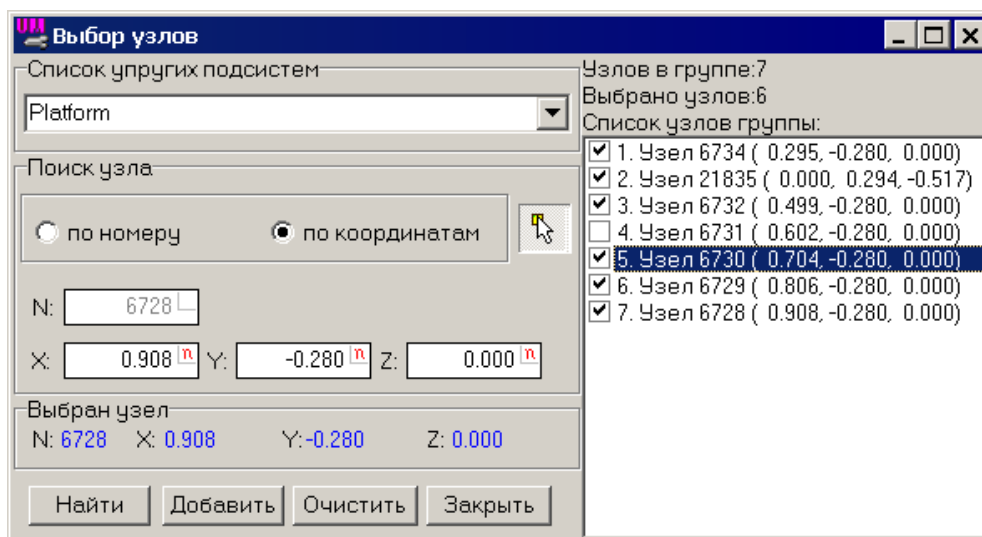



Рис.11.44.

Если объект, отображаемый в окне, содержит более одной упругой подсистемы, текущая подсистема выбирается из списка **Список упругих подсистем**.


В правой части формы отображается группа выбранных узлов, элементы списка могут быть активными (флажок элемента включен) или неактивными (флажок выключен). Выключение флажка означает, по сути, исключение узла из группы. Однако он остается в списке и его можно быстро включить, не выполняя повторный поиск.

В левой части формы расположены элементы, позволяющие найти узел по номеру, координатам или выбрать его в окне с помощью мыши. Режим выбора узлов в окне включается кнопкой .

Активные узлы после закрытия формы отображаются на переднем плане, независимо от ориентации подсистемы.

## 11.4. Включение упругой подсистемы в составной объект

### 11.4.1. Добавление упругой подсистемы

Добавление упругой подсистемы в состав модели производится в среде конструктора объекта (программа **UMInput.exe**). Выберите элемент **Подсистемы** в списке элементов и воспользуйтесь кнопкой  на панели инспектора данных для добавления новой подсистемы. При этом будет добавлен пустой элемент списка. Задайте тип подсистемы **Линейная подсистема МКЭ** в поле **Тип** (рис.11.45) и выберите упругую подсистему с помощью появившейся формы (рис.11.46). Элементами списка данной формы являются каталоги, содержащие файлы `input.fss`. Выбрав каталог, задайте имя подсистемы в поле **Имя**.

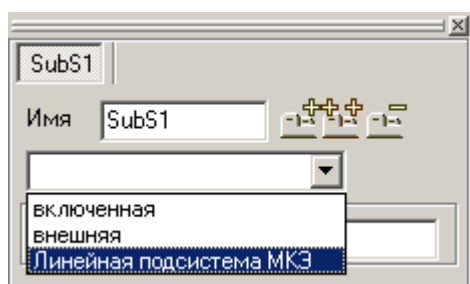


Рис.11.45.

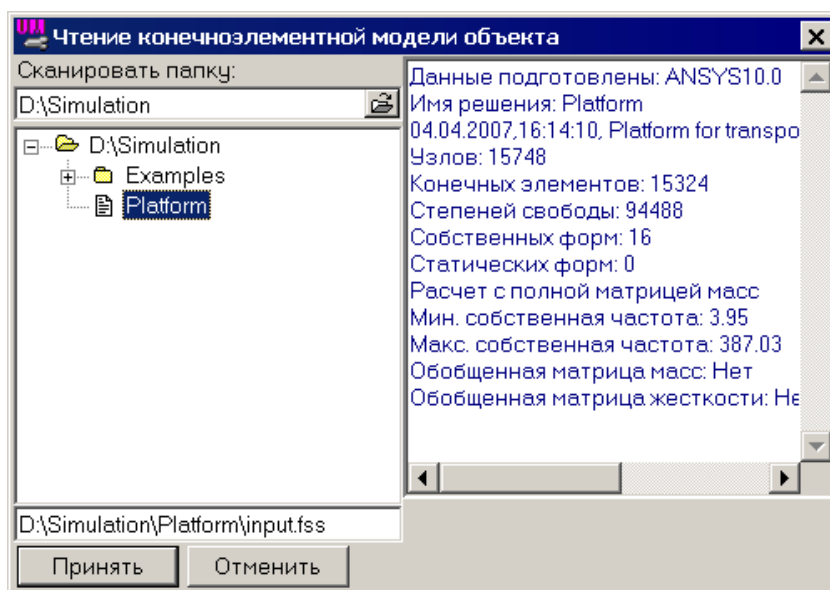


Рис.11.46.

**Примечание.** При добавлении упругой подсистемы автоматически создается подчиненное фиктивное тело с именем решения (см. вкладка **Общие**, поле **Имя решения**) и шарнир **6 степеней свободы**, связывающий базу с единственным телом подсистемы. Этот шарнир не отражается в списке элементов **Шарниры**. Начальные значения координат в шарнире равны нулю. Фиктивное тело создается для единообразия в описании шарниров и силовых элементов, посредством которых подсистема взаимодействует с другими частями объекта.

## 11.4.2. Экранная форма упругой подсистемы

После выбора файла упругой подсистемы из списка на панели инспектора появляется форма, подобная форме мастера подготовки данных упругих подсистем (п. 11.3.2). Она содержит дополнительную вкладку **Системы координат**, остальные вкладки обеих форм имеют одинаковые названия. Опишем отличительные особенности каждой вкладки формы конструктора объектов.

### 11.4.2.1. Вкладка «Общие»

Вкладка **Общие** содержит следующие дополнительные поля (рис.11.47).

- **Идентификатор** для присвоения подсистеме идентификатора, который используется при программировании в среде **УМ**. Правила задания идентификаторов описаны в п.3.3.2.3.2.
- Недоступное для редактирования поле **Предок** содержит путь к файлу данных подсистемы.
- Поле с выпадающим списком **Углы ориентации** позволяет выбрать последовательность углов поворотов в шарнире для расчета матрицы ориентации подсистемы.

**Примечание.** Выбор углов ориентации для шарнира с шестью степенями свободы описан в п. 2.3.3. главы 2 руководства пользователя **УМ**. Напомним, что при любой последовательности поворотов существуют вырожденные положения СК2 относительно СК1, в данном случае – локальной СК упругой подсистемы относительно базовой СК0. Поэтому при выборе последовательности следует учитывать возможные изменения ориентации упругой подсистемы при движении. Например, выбор углов Кардано (последовательность 1,2,3) для моделирования физического маятника (рис.11.48) приведет к вырождению при вертикальном положении ( $\alpha_2 = \pi/2$ ); при выборе углов Эйлера (3,1,3) вырожденное положение – горизонтальное ( $\alpha_1 = 0, \pi$ ). Рекомендуется выбрать последовательность (1,3,2)

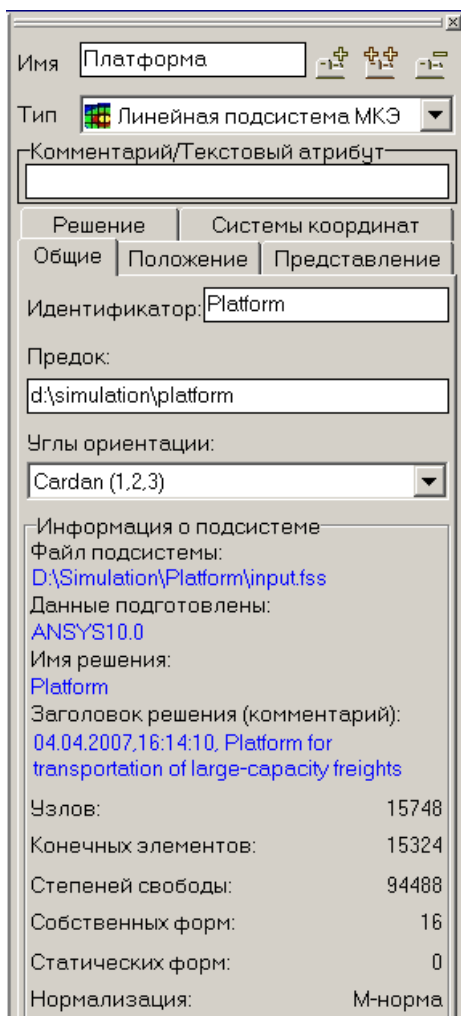


Рис.11.47.

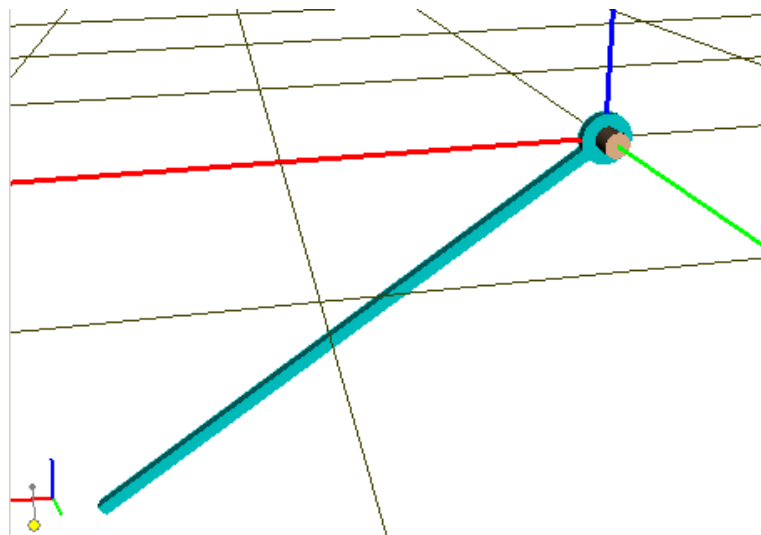


Рис.11.48. Модель физического маятника

### 11.4.2.2. Вкладка «Положение»

С помощью элементов управления этой вкладки задается начальное положение упругой подсистемы в глобальной системе координат в соответствии с конструкцией моделируемого объекта.

### 11.4.2.3. Вкладка «Решение»

В отличие от мастера подготовки данных, на данной вкладке отсутствуют элементы управления для преобразования набора форм, однако сохранена возможность анимации.

### 11.4.2.4. Вкладка «Представление»

Вкладка **Представление** идентична по содержанию и назначению одноименной вкладке формы **Мастера подготовки данных**.

**Примечание.** Настройка изображения конечно-элементной модели с помощью кнопок на панели анимационного окна конструктора объекта доступна только при упрощенном формировании изображения. Полное изображение настраивается с помощью элементов на вкладке **Представление** формы упругой подсистемы.

### 11.4.2.5. Вкладка «Системы координат»

На данной вкладке можно задать системы координат (СК), связанные с упругой подсистемой. При этом фактически создаются ориентированные точки, описанные в пункте 3.4.8.4.2. главы 3 руководства пользователя. Однако они не используются как точки связи, а служат для преобразования напряжений и деформаций, вычисляемых относительно локальной СК упругой подсистемы. Поясним использование вкладки **Системы координат** на примере. Предположим, что требуется рассчитать продольные напряжения наклонной балки железнодорожного моста, ось которой не совпадает ни с одной из осей локальной системы координат (рис.11.49).

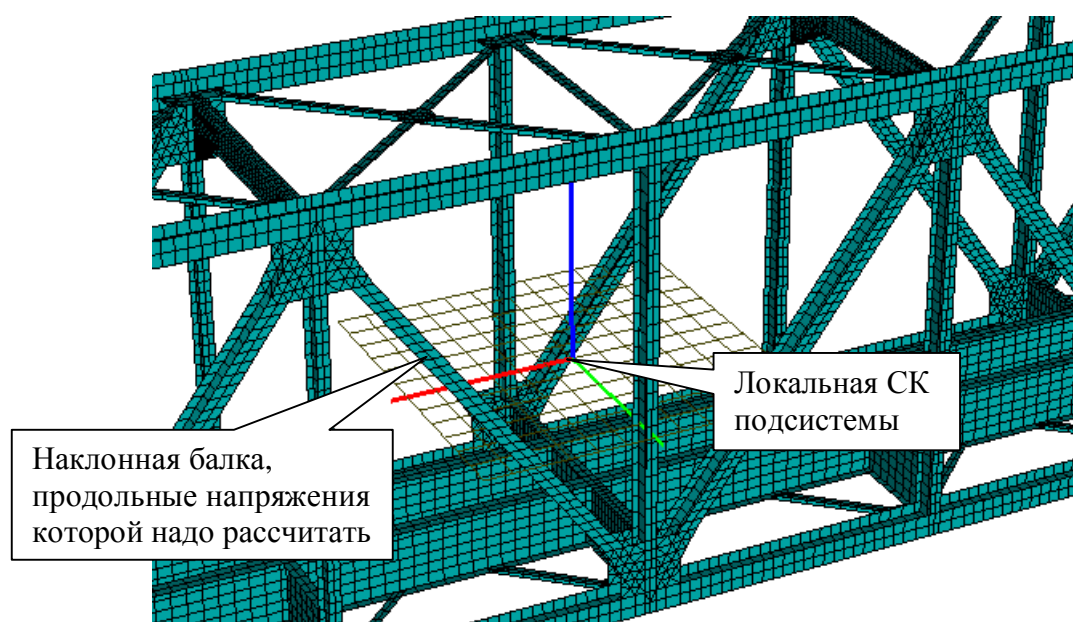




Рис.11.49. К примеру использования систем координат. Фрагмент модели железнодорожного моста.

Для решения данной задачи создадим систему координат, связанную с подсистемой. При этом одну из осей, например ось  $x$ , направим вдоль оси балки. Новую систему координат можно добавить кнопкой . Начало отсчета и ориентация системы координат задается в соответствующих полях формы подсистемы (рис.11.51). Другой способ задания СК, «Получить по трем узлам», активизируется кнопкой . После ее нажатия в окне нужно последовательно указать конечно-элементные узлы соответствующие началу отсчета, направлению оси  $X$  и узел определяющий плоскость  $xy$ . Процесс задания СК в анимационном окне показан на рис.11.51 слева, результат – справа. Направление оси  $x$  созданной системы координат совпадает с осью балки.

Теперь в **Мастере переменных** программы **UMSimul.exe** СК наклонной балки моста можно указать как систему координат, относительно которой рассчитываются напряжения, и выбрать

расчет осевых напряжений вдоль оси  $x$ . Создание переменных для расчета напряжений и деформаций упругой подсистемы подробно описано в п.11.5.3.3

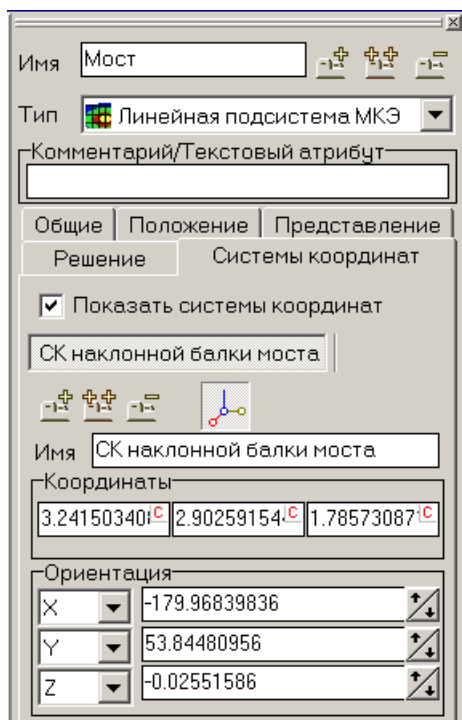


Рис.11.50. Вкладка **Системы координат** на форме упругой подсистемы.

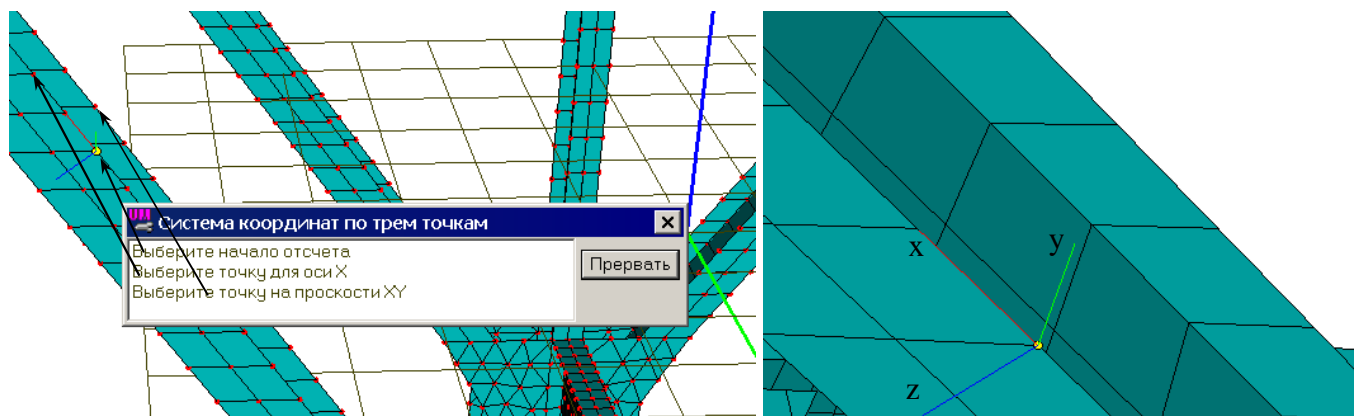


Рис.11.51. Задание системы координат по трем точкам: слева показан выбор точек, справа – созданная система координат.

### 11.4.3. Особенности описания взаимодействий с упругой подсистемой

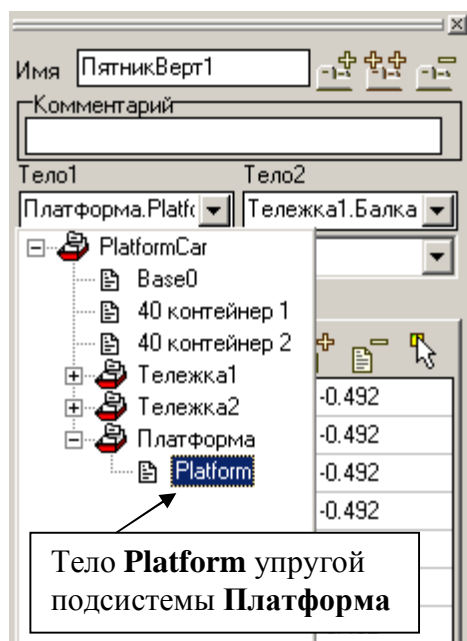


Рис.11.52.


После добавления упругой подсистемы необходимо описать условия ее взаимодействия посредством шарниров и силовых элементов с телами и другими подсистемами составного объекта. Поддерживаются следующие типы шарниров для упругих подсистем:


- вращательный;
- поступательный;
- 6 степеней свободы;
- обобщенный;
- стержень.

Поддерживаются следующие типы силовых элементов для упругих подсистем:

- биполярные силы всех типов;
- линейные силы всех типов;
- контактные силы типов **Точки-Плоскость** (с ограничениями, описано ниже) и **Упругое тело-Упругое тело**;
- Т-силы.

Правила описания взаимодействий в целом соответствуют п.3.4.6. Отметим следующие особенности.

- При описании шарнира, либо силового элемента одним из пары взаимодействующих тел выбирается фиктивное тело упругой подсистемы, которое имеет имя решения (рис.11.52).
- При назначении координат точки прикрепления элемента следует иметь в виду тот факт, что силовой элемент, либо шарнир может прикрепляться только в узле упругой подсистемы. Вообще говоря, это ограничение следует иметь в виду еще на стадии описания упругого тела конечно-элементной схемой и задавать ее таким образом, чтобы в местах крепления подсистемы располагались узлы. При отсутствии узла в указанном месте производится поиск ближайшего к заданным координатам узла и с ним связывается силовой элемент, либо шарнир. Однако это приводит к погрешностям моделирования, которые могут быть весьма существенными.
- Шарнирный узел или узел, в котором будет приложена сила, можно выбрать в анимационном окне после нажатия кнопки , которая присутствует на формах всех шарниров и силовых элементов. Если взаимодействующее тело не выбрано ранее, то оно автоматически выбирается после выбора узла.

- Если упругое тело уже выбрано в качестве одного из взаимодействующих тел, при нажатии кнопки  появляется контекстное меню, предоставляющее дополнительные возможности выбора узлов (рис.11.53).

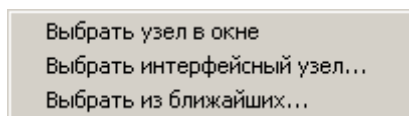


Рис.11.53.

На рис.11.54. изображена форма, с помощью которой можно выбрать узел, ближайший к точке, координаты которой заданы в форме шарнира или силового элемента. Форма вызывается из пункта **Выбрать из ближайших...** контекстного меню. Она содержит список пяти ближайших узлов. Каждый элемент списка включает номер узла, его координаты и расстояние до указанной точки (параметр **d**).

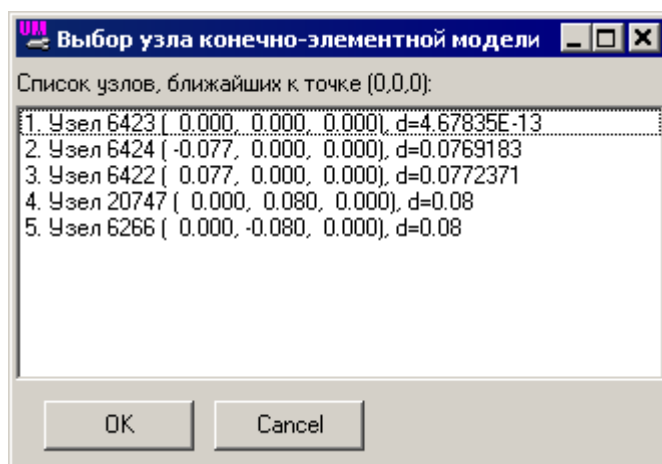


Рис.11.54. Форма выбора узлов КЭ модели

- В настоящей версии **УМ** координаты точки приложения силы, задаваемые для подсистемы в недеформированном состоянии, должны быть постоянны в локальной системе координат. Другими словами, отсутствует возможность моделирования сил, точка приложения которых перемещается по поверхности упругой подсистемы; исключением является контактная сила, она описана ниже.

#### 11.4.3.1. Особенности описания контактной силы

Упругая подсистема может взаимодействовать с другими частями составного объекта посредством контактных сил двух типов.

1. Контакт типа **Точки-Плоскость**. Правила задания этого типа контакта описаны в п. 3.4.9.3.1 главы 3 руководства пользователя **УМ**. В соответствии с ними для одного из контактирующих тел (первого) указывается набор контактных точек, со вторым телом связывается контактная плоскость. Упругое тело может быть только первым в контактирующей паре тел, то есть, с ним могут быть связаны контактные точки (узлы), и с ним не может быть связана контактная плоскость.
2. Контакт типа **Упругое тело-Упругое тело** (рис.11.55). Математическая модель контакта построена на основе модели контакта типа точки-плоскость, описанной в п. 2.4.6.1 главы 2 руководства пользователя **УМ**, с учетом особенностей моделирования упругих тел. Основное отличие при задании силовых элементов обоих типов заключается в том, что в случае упругих тел просто указывается второе тело в контакте. При моделировании рассматривается вся поверхность второго тела. Она представляется как совокупность треугольных полигонов, вершинами которых являются узлы на поверхности упругого тела. Если грань конечного элемента, лежащая на поверхности, имеет треугольную форму, то полигон совпадает с гранью,

в противном случае она неявно разбивается на треугольники. При наличии контакта контактная точка в каждый момент времени взаимодействует с одним треугольным полигоном. Для пары точка-полигон реализован алгоритм, в точности совпадающий с моделью **Точки-Плоскость**. Контактная сила действует на первое тело в контактном узле. На второе тело действуют параллельно направленные силы в узлах контактного полигона (рис.11.56). Их значения рассчитываются по алгоритму, схема которого представлена на рисунке .11.57. Момент силы в контакте отсутствует.

**Примечание.** Успешное моделирование контактного взаимодействия данного вида во многом определяется гладкостью поверхности второго тела, заданной конечно-элементной сеткой. Границы конечных элементов на поверхности являются, по сути, линиями пересечения плоскостей. При крупной разбивке может наблюдаться скачкообразное изменение контактных сил при переходе контактного узла первого тела через границы элементов на поверхности второго тела. Поэтому их размер следует подбирать таким образом, чтобы обеспечить достаточную гладкость поверхности.

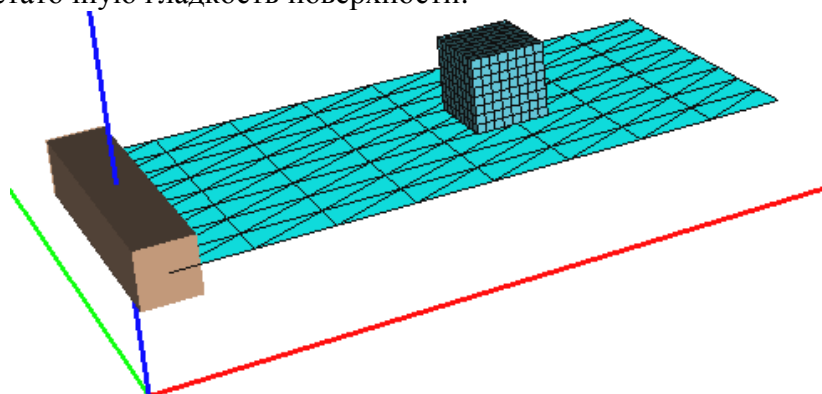


Рис.11.55. Пример контакта двух упругих тел.

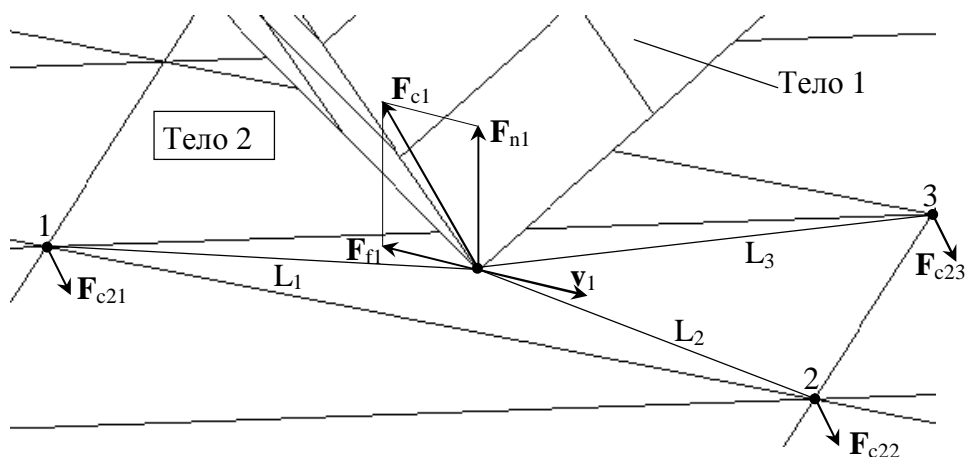


Рис.11.56. К алгоритму расчета контактных сил.

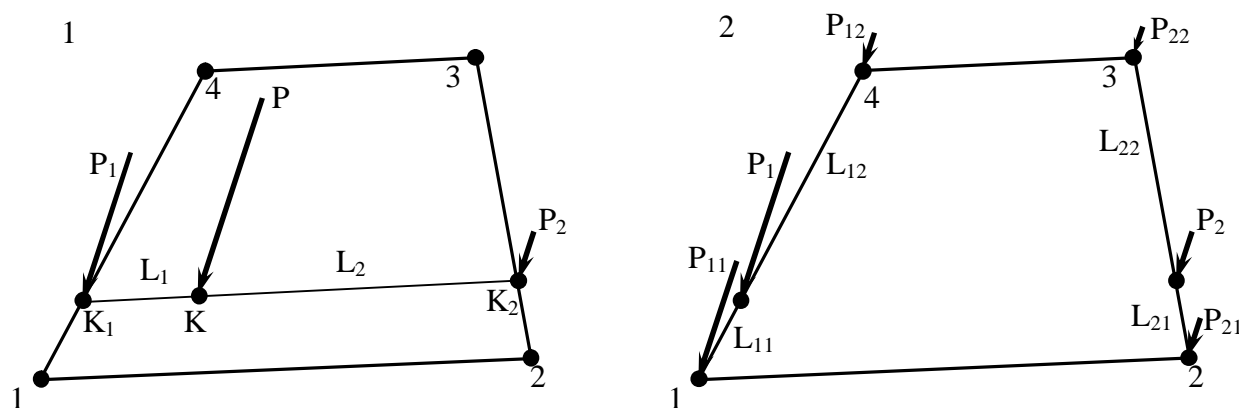


Рис.11.57. Преобразование силы, приложенной в произвольной точке, к узловым силам.

Алгоритм преобразования силы, приложенной в произвольной точке поверхности, к узловым силам включает два этапа. На первом этапе сила  $P$ , приложенная в точке  $K$ , заменяется эквивалентной парой сил, приложенных в точках пересечения  $K_1$  и  $K_2$ ; прямая  $K_1K_2$  параллельна стороне 1-2 полигона. На втором этапе сила  $P_1$  заменяется эквивалентной парой сил  $P_{11}, P_{12}$ ; сила  $P_2$  – парой сил  $P_{21}, P_{22}$ . При этом выполняются следующие соотношения:

$$P_1 L_1 = P_2 L_2, P_{11} L_{11} = P_{12} L_{12}, P_{21} L_{21} = P_{22} L_{22}.$$

Для треугольного полигона силы  $P_{12}$  и  $P_{22}$  суммируются.

Форма контактного силового элемента типа **Упругое тело – Упругое тело** изображена на рис.11.58.

Вкладка **Параметры**, одинаковая для всех типов контактных сил, описана в п.3.4.8.3.

Вкладка **Геометрия** содержит список контактных узлов первого тела и флажок, позволяющий скрыть второе тело для удобства их выбора в анимационном окне.

Для добавления узлов в список используется форма выбора узлов (рис.11.44), которая вызывается кнопкой . Эта форма может вызываться многократно, при этом узлы, выбранные ранее и узлы, выбранные в текущем сеансе, имеют различную маркировку (рис.11.59).

Контактный узел может быть активным – флажок соответствующего элемента списка включен, или не активным – флажок выключен. При моделировании выключенный узел «не работает», то есть выключение равносильно удалению контактного узла из списка. Инструмент включения/выключения флажков позволяет быстро изменять набор контактных узлов

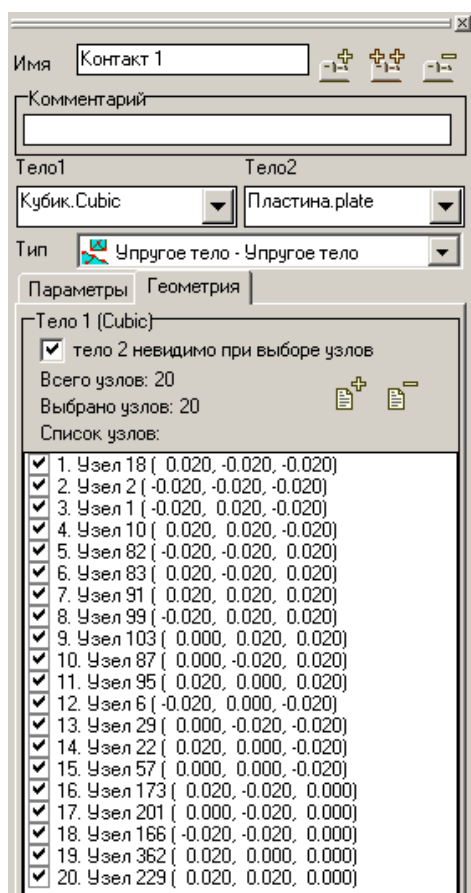


Рис .11.58. Форма контактного силового элемента типа Упругое тело – Упругое тело.

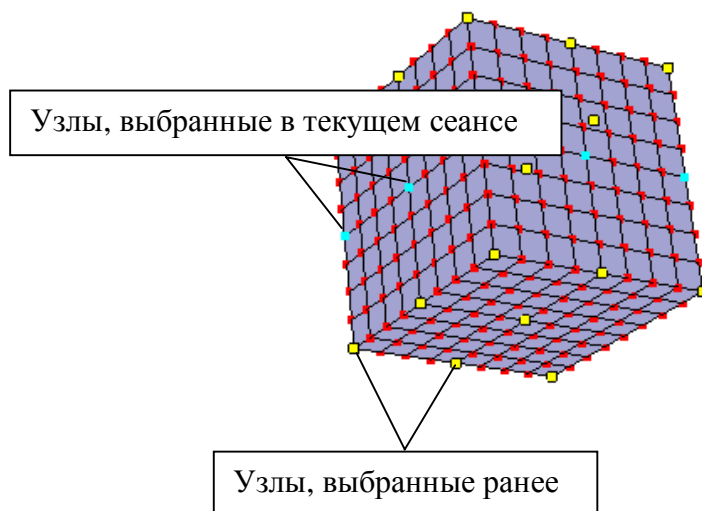


Рис.11.59. Маркировка при выборе контактных узлов упругого тела

Рассмотрим пример моделирования взаимодействия упругого кубика (тело 1) с упругой консольно-закрепленной пластиной (тело 2) (рис.11.55). С увеличением числа контактных узлов на нижней грани кубика точность моделирования растет, а скорость – падает. Инструмент включения/выключения флажков позволяет быстро изменять набор контактных узлов

Однако практически во всех случаях существует набор узлов, расширение которого не приводит к существенному уточнению результатов.

Выбрав все узлы нижней грани, используя затем инструмент включения/выключения контактных узлов, можно быстро подобрать их оптимальное число.

Описание взаимодействий подсистемы завершает ее включение в состав модели. Сохраните объект (п. 3.5). При формировании уравнений движения в символьной форме выполните синтез и компиляцию уравнений (п.3.6), при численно-итерационном синтезе уравнений эти действия пропускаются. При отсутствии ошибок можно переходить к моделированию.

## 11.5. Исследование динамики упругой подсистемы в составе модели

Практически все инструменты анализа, доступные в **UM** для твердотельного моделирования, можно использовать и для упругих тел. Правила работы в среде программы **UMSimul.exe** описаны в главе 4.

Имеются также следующие специальные инструменты.

- Экспорт упругих перемещений тела в **ANSYS**.
- Подготовка данных для анализа усталостной долговечности в модуле **UM Durability** (см. гл. 13 руководства пользователя **UM**).

Рассмотрим назначение данных инструментов.

### 11.5.1. Специальные инструменты

#### 11.5.1.1. Экспорт упругих перемещений в ANSYS

Для анализа напряженно-деформированного состояния упругой подсистемы в **UM** используется модальный подход, представленный соотношениями 11.6. Используя переменные, графики напряжений и деформаций могут быть построены в процессе интегрирования уравнений движения аналогично графикам перемещений, скоростей и т.д.

Напряжения и деформации упругой подсистемы в заданный момент времени можно исследовать также в программе **ANSYS**. Используется полная конечно-элементная модель. Расчет выполняется после интегрирования уравнений движения. Он может потребоваться для проверки и уточнения результатов, полученных с применением модального подхода, или быть независимым этапом исследований.

Граничные условия передаются посредством файла нагрузки **ANSYS**, который формируется программой **UMSimul**. Расширение файла по умолчанию – **.ald** (**ANSYS Load**). Термин *нагрузка* в программе **ANSYS** означает заданные перемещения узлов, внешние силы, гравитацию, давление, температурные условия и т.д. (подробнее см. документацию к программе **ANSYS**). Файлы **\*.ald** задают перемещения степеней свободы в узлах упругой подсистемы, что является одной из категорий нагрузки. Для каждой степени свободы формируется строка, содержащая команду **D** (**DOF constraint**) языка **APDL**. Например, команда

```
D, 863, UZ, 0.0001472
```

задает смещение 0.0001472 в направлении степени свободы **Z** узла с номером 863.

Момент времени выбирается пользователем на основе анализа графиков контрольных величин. Например, необходимо рассчитать напряжения при максимальном значении силы реакции в шарнире. В данном случае сила реакции является контрольной величиной. Файл нагрузки формируется для момента времени, когда она достигает максимального значения.

**Примечание.** Для создания файла нагрузки *не требуется* импорт напряжений (деформаций). То есть, если исследование напряжений (деформаций) планируется провести только в **ANSYS**, датчики для **UM** создавать не нужно.

Последовательность действий при создании файла описана в п.11.5.3.4.

Расчеты в программе **ANSYS** с использованием файлов **\*.ald** предполагают следующую последовательность действий.

1. Создать (загрузить ранее созданную) конечно-элементную модель упругой подсистемы.

2. При наличии приложенных нагрузок, связей и других граничных условий их необходимо удалить. То есть, рассматривается свободная подсистема.

**Примечание.** Если планируется обмен данными между **ANSYS** и **UM**, рекомендуется заранее, на этапе подготовки конечно-элементной модели, сохранить свободную подсистему в отдельный файл db.

3. Прочитать файл нагрузки ald с помощью пункта меню **File | Read Input from ...**
4. Выполнить статический расчет. Команда APDL для задания типа расчета  
ANTYPE, STATIC
5. Проанализировать результаты расчета с помощью постпроцессора (пункт **General Postproc** главного меню).

### 11.5.1.2. Подготовка данных для UM Durability

Программный комплекс «Универсальный механизм» включает модуль расчета усталостной долговечности **UM Durability** (см. главу 13 «Руководства пользователя»). Необходимым этапом методики, реализованной в данном модуле, является подробное описание эксплуатационной нагруженности, в частности, истории изменения напряженного состояния упругой подсистемы в процессе работы. Модуль **UM FEM** позволяет подготовить необходимые данные.

Напряжения в узлах конечного элемента с номером  $i$  рассчитываются по формуле 11.6. (см. п. 11.1.2):

$$\sigma_i^e = \mathbf{H}_i^{e\sigma} \mathbf{w},$$

где модальная матрица напряжений  $\mathbf{H}_i^{e\sigma}$  постоянна. Следовательно, при наличии данной матрицы, графики напряжений могут быть построены на основе зависимости  $\mathbf{w} = \mathbf{w}(t)$ , где размер матрицы-столбца  $\mathbf{w}$  равен числу модальных координат.

Модуль **UM FEM** предоставляет возможность записать историю изменения модальных координат в файл. Данная возможность доступна как в режиме однократного расчета, так и при многовариантных расчетах. Результаты сеанса интегрирования записываются в пару файлов: FileName.tmc, FileName.imc. Имя файла FileName при однократном интегрировании уравнений движения задается пользователем, при многовариантных расчетах – генерируется автоматически.

Файлы \*.tmc (title of modal coordinates) содержат заголовочную информацию в текстовом формате. Она включает:

1. имя объекта **UM**;
2. имя упругой подсистемы в составе объекта;
3. путь к файлу fss подсистемы;
4. дату создания решения (файла fss) в упакованном виде;
5. время создания решения в упакованном виде;
6. число узлов конечно-элементной модели подсистемы;
7. число конечных элементов;
8. число модальных координат.

Пример файла tmc .

```
with FEMSubSystem;
  ObjectName=PlatformCar;
  name=Platform;
  path=d:\Simulation\PlatformCar\platform_fem;
  PackDateSolution=20061007;
  PackTimeSolution=155059;
  NodesCount=15748;
```

```
FECount=15324;  
MCCount=88;
```

Файлы \*.imc (**i**ntegration, **m**odal **c**oordinates) содержат набор записей в бинарном формате. Каждая запись имеет следующую структуру:

$$(t_i, w_1, w_2, \dots, w_n),$$

где  $t_i$  – время на  $i$ -ом шаге представления результатов,  $w_1, \dots, w_n$  – значения модальных координат в момент времени  $t_i$ ,  $n$  – число модальных координат упругой подсистемы. Шаг представления результатов задается в форме инспектора моделирования (см. п. 4.4.2. «Руководства пользователя UM»). Например, если время моделирования равно 10 секунд, шаг представления результатов 0.01 секунды, то файл imc, будет содержать 1000 записей.

**Примечания.** Для создания файлов imc датчики не требуются. Если исследования напряжений в модуле моделирования не планируются, можно использовать модель упругой подсистемы без датчиков. Такая модель загружается быстрее и требует меньше оперативной памяти. Это может быть актуально для объектов, включающих несколько упругих подсистем с большим числом узлов и датчиков. При исследовании усталостной долговечности рекомендуется подготовить две модели упругой подсистемы: одну без датчиков – для создания файлов imc, другую с датчиками – для расчета напряжений в модуле долговечности. Остальные параметры моделей должны быть одинаковы. Копии файлов input.fss, могут храниться в любом каталоге, выбранном пользователем.

### Пример.

Для анализа усталостной долговечности платформы используется модель PlatformCar с упругой подсистемой Platform. Файл input.fss хранится в каталоге d:\Simulation\PlatformCar\platform\_fem.

Согласно сказанному выше, подготовим два файла input.fss с помощью мастера упругих подсистем. При создании модели в модуле **UMInput** и интегрировании уравнений движения поместите в каталог подсистемы файл без датчиков. При расчете нагруженности платформы можно выбрать один из двух вариантов использования модели с датчиками, описанные ниже.

1. Замените файл в каталоге подсистемы файлом, содержащим датчики.
2. Файл input.fss с датчиками поместите в отдельный каталог и отредактируйте значение параметра path в каждом файле \*.tmc, используемом для расчета нагруженности. Например, поместим input.fss в каталог d:\Simulation\FlexibleSubSystem\PlatformWithSensors. Тогда параметр path должен быть изменен в каждом файле tmc:

```
path=d:\Simulation\FlexibleSubSystem\PlatformWithSensors.
```

Подробнее см. главу 13.

К сожалению оба способа требуют «ручного» вмешательства, при этом второй способ кажется предпочтительным.

Прибегать к приемам, описанным в примечании, следует, если подсистема имеет очень много датчиков, ее загрузка требует много времени и вызывает дискомфорт при работе с моделью. В противном случае лучше использовать одну модель упругой подсистемы.

### 11.5.2. Инспектор моделирования объекта

Если в составе модели есть упругие подсистемы, на форме инспектора моделирования появляется вкладка **Подсистемы МКЭ**, которая содержит панель и четыре подчиненные вкладки: **Общие**, **Моделирование**, **Представление** и **Решение** (рис.11.60).

Если модель содержит более одной упругой подсистемы, на панели появляется поле с выпадающим списком, из которого можно выбрать текущую подсистему для редактирования параметров.

Вкладки **Общие**, **Представление** и **Решение** описаны в п.0. Рассмотрим вкладку **Моделирование**.

#### 11.5.2.1. Вкладка «Моделирование»

Вкладка **Моделирование** содержит две подчиненные вкладки: **Настройки** и **Диссипация**.

Вкладка **Настройки** содержит следующие управляющие элементы (рис.11.60).

- Флажок **Учитывать силу тяжести** позволяет включить/отключить учет собственного веса упругой подсистемы. В основном моделирование без учета силы тяжести выполняется в случаях, когда подсистема не совершает больших перемещений.
- Флажок **Не учитывать упругость подсистемы** позволяет моделировать упругую подсистему как абсолютно твердое тело. При этом набор координат подсистемы содержит шесть шарнирных координат. В данной версии **УМ** флажок доступен, если подсистема взаимодействует с объектом только посредством силовых элементов.

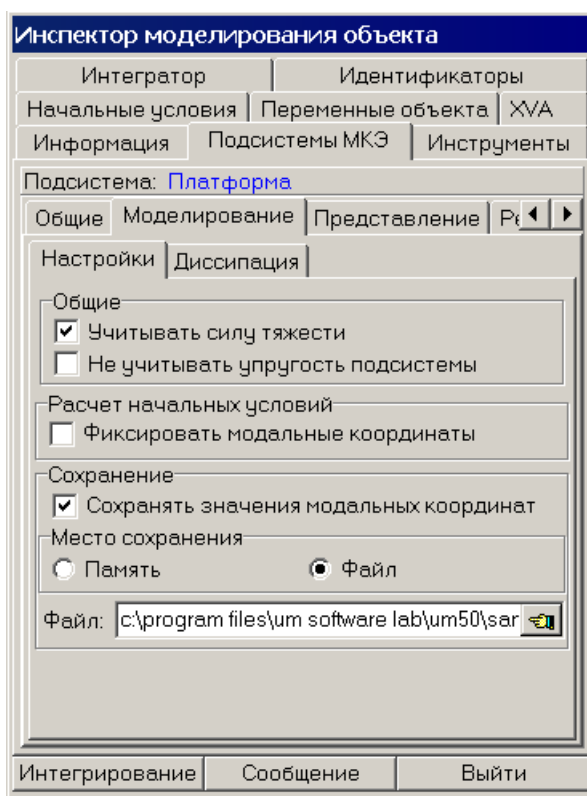



Рис.11.60. Инспектор моделирования объекта программы **UMSimul.exe**

- Флажок **Фиксировать модальные координаты** запрещает изменение модальных координат при расчете начальных условий. Поясним это подробнее. Пусть два тела, одно (или оба) из которых упругое, связаны вращательным шарниром. Для расчета начального положения исследуемого объекта решаются уравнения связей. В результате этого решения совмещаются шарнирные точки связанных тел. При этом возможны несколько способов совмещения, в том числе, путем деформации упругого тела. Чтобы избежать этой ситуации, следует установить нулевые значения всех модальных координат на закладке **Начальные условия | Координаты**

**Инспектора моделирования** и включить флажок **Фиксировать модальные координаты**. Тогда программа попытается собрать объект, перемещая упругое тело, как абсолютно твердое. То есть мы запретили упругие перемещения подсистемы в исходном положении объекта. Однако такая ситуация не обязательна. Если необходимо, можно задать начальные упругие смещения подсистемы, изменив значения ее модальных координат, и зафиксировав их. Тогда, если это возможно, объект будет собран с учетом заданных смещений.

- Флажок **Сохранять значения модальных координат**. Сохранение модальных координат необходимо для формирования файла нагрузки **ANSYS** и анализа усталостной долговечности с помощью модуля **UM Durability** (см. п.11.5.1.1,11.5.1.2). Место сохранения, память или файл, выбирается при помощи одноименной радио-группы. Для анализа усталостной долговечности модальные координаты надо сохранить в файл; для экспорта в **ANSYS** допустимы оба варианта. Имя файла задается в поле **Файл**. Имя файла по умолчанию, включая полный путь к нему, можно задать, нажав клавиши **Ctrl+ENTER** клавиатуры, либо кнопкой  на форме. Каталог хранения файла по умолчанию является каталог упругой подсистемы.

Вкладка **Диссипация** (рис.11.61) позволяет учесть внутреннюю (структурную) диссипацию, выбрать математическую модель диссипации и задать параметры модели. Она содержит следующие управляющие элементы.

Группа элементов **Диссипация** позволяет учесть внутреннюю (структурную) диссипацию, выбрать математическую модель диссипации и задать параметры модели. Поясним значения переключателя **Способ задания**.

- **Линейная модель** позволяет задать матрицу диссипации в виде суммы матриц масс и жесткости, умноженных на коэффициенты. Пользователю предоставляется возможность задать значения коэффициентов.

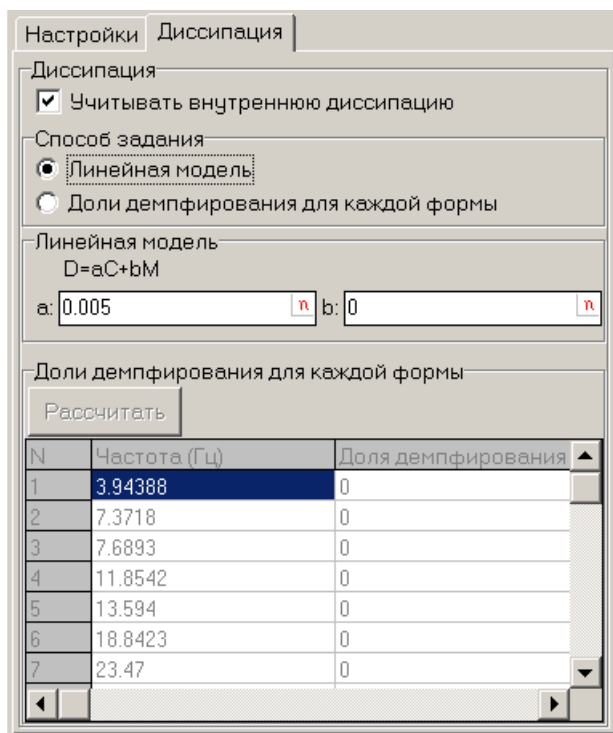


Рис.11.61. Вкладка **Диссипация** формы упругой подсистемы, расположенной на форме инспектора моделирования

- При выборе значения **Коэффициенты для каждой формы** появляется возможность задать диссипацию для каждой формы долей критического значения коэффициента демпфирования (рис.11.62). Значение равно единице соответствует переходу от затухающего колебательного процесса к апериодическому.

N	Частота (Гц)	Доля демпфирования
1	3.94388	0.3
2	7.3718	0.3
3	7.6893	0.3
4	11.8542	0.3
5	13.594	0.5
6	18.8423	0.5

Рис.11.62. Задание коэффициентов демпфирования

Значение коэффициентов демпфирования для группы упругих форм, соответствующих выбранному диапазону частот можно задать с помощью экранной формы, которая вызывается посредством всплывающего меню. При этом диапазон частот может выбираться по порядковым номерам (рис.11.63.а), либо по значениям в Гц (рис. .11.63.б).

а.

б.

Рис.11.63. Задание коэффициентов демпфирования

Поскольку упругие формы подсистемы ортонормальны, по линейной матрице диссипации можно рассчитать значения коэффициентов для каждой формы, при которых обе модели будут идентичными. Для этого нужно нажать кнопку **Рассчитать** на закладке **Моделирование** (рис.11.60). В появившейся форме (рис.11.64) задать значения коэффициентов **a** и **b** линейной модели диссипации и нажать кнопку **Рассчитать**. Рассчитанные коэффициенты отобразятся в правой колонке формы. При этом доступен режим редактирования значений коэффициентов.

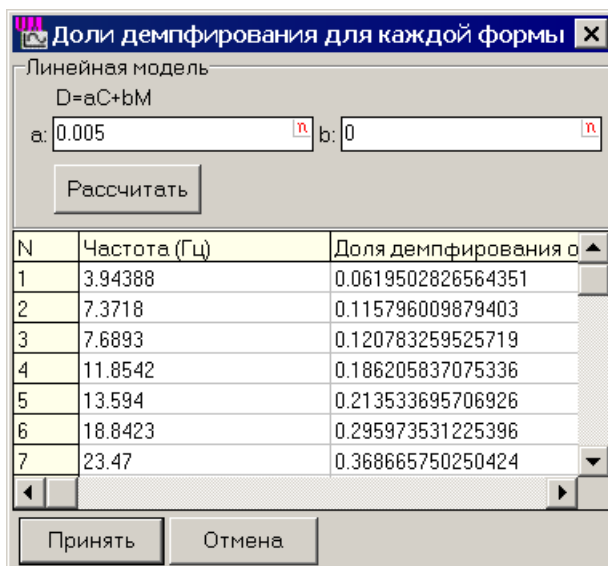


Рис.11.64. Расчет коэффициентов демпфирования, соответствующих линейной модели диссипации.

Чтобы установить рассчитанные значения в качестве текущих для подсистемы нажмите кнопку **Принять**. Кнопка **Отмена** закрывает форму без изменений в параметрах модели.

### 11.5.2.2. Вкладка «Представление»

Вкладка **Представление** идентична по назначению и составу управляющих элементов, соответствующим вкладкам мастера подготовки данных упругих подсистем и экранной формы конструктора объекта (программа **UMInput.exe**) и подробно описана в п.11.3.2.3.

### 11.5.2.3. Вкладка «Решение»

Вкладка **Решение** аналогична одноименной вкладке конструктора объекта, описание которой приводится в (п.11.4.2.3).

### 11.5.3. Работа с переменными

Для создания переменных используется мастер переменных (пункт главного меню **Инструменты | Мастер переменных**). Правила работы с ним описаны в п.4.3.2. Здесь рассмотрим особенности, связанные с наличием упругих тел в составе объекта исследований.

#### 11.5.3.1. Координаты

В списке координат мастера переменных присутствует два элемента, соответствующих упругой подсистеме (рис.11.65). Первый элемент отображает шесть шарнирных координат, второй – содержит полный набор обобщенных координат упругой подсистемы. Начало списка модальных координат соответствует элементу с номером семь, то есть седьмой элемент списка – модальная координата, соответствующая первой упругой форме, восьмой – вторая и т.д.

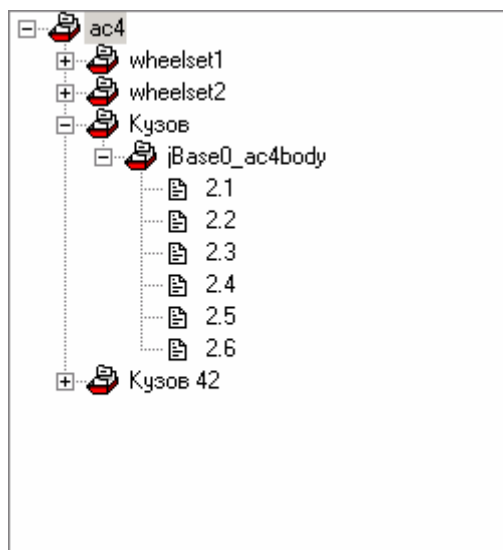


Рис.11.65. Список элементов вкладки **Координаты** мастера переменных модуля **UMSimul.exe**

**Примечание.** Модальная координата является безразмерной величиной. Поэтому, выбор ее в качестве переменной не позволяет получить информацию о перемещениях, скоростях и ускорениях, которую можно оценить непосредственно.

### 11.5.3.2. Линейные переменные

При определении линейных переменных следует помнить о том, что кинематические характеристики движения: координаты, скорости и ускорения рассчитываются только для узлов конечно-элементной схемы. Если в точке с заданными координатами отсутствует узел, выполняется поиск ближайшего узла, после чего пользователь должен подтвердить его выбор в диалоге, пример которого изображен на рис.11.66. Если выбор подтвержден, выдается запрос на изменения комментария переменной: «Изменить комментарий в соответствии с координатами узла?».

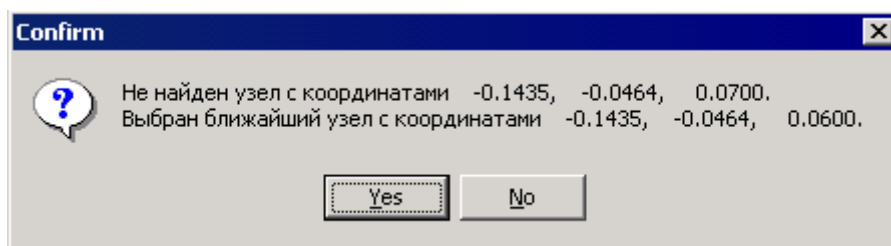


Рис.11.66.

**Примечание.** Стандартный комментарий линейной переменной содержит координаты точки, в которой рассчитываются значения характеристики движения подсистемы. Если пользователь его не редактировал, рекомендуется подтвердить изменение комментария.

### 11.5.3.3. Напряжения и деформации

Переменные, используемые для исследования напряженно-деформированного состояния упругой подсистемы, создаются с помощью вкладки **Датчики МКЭ** мастера переменных (рис.11.67).

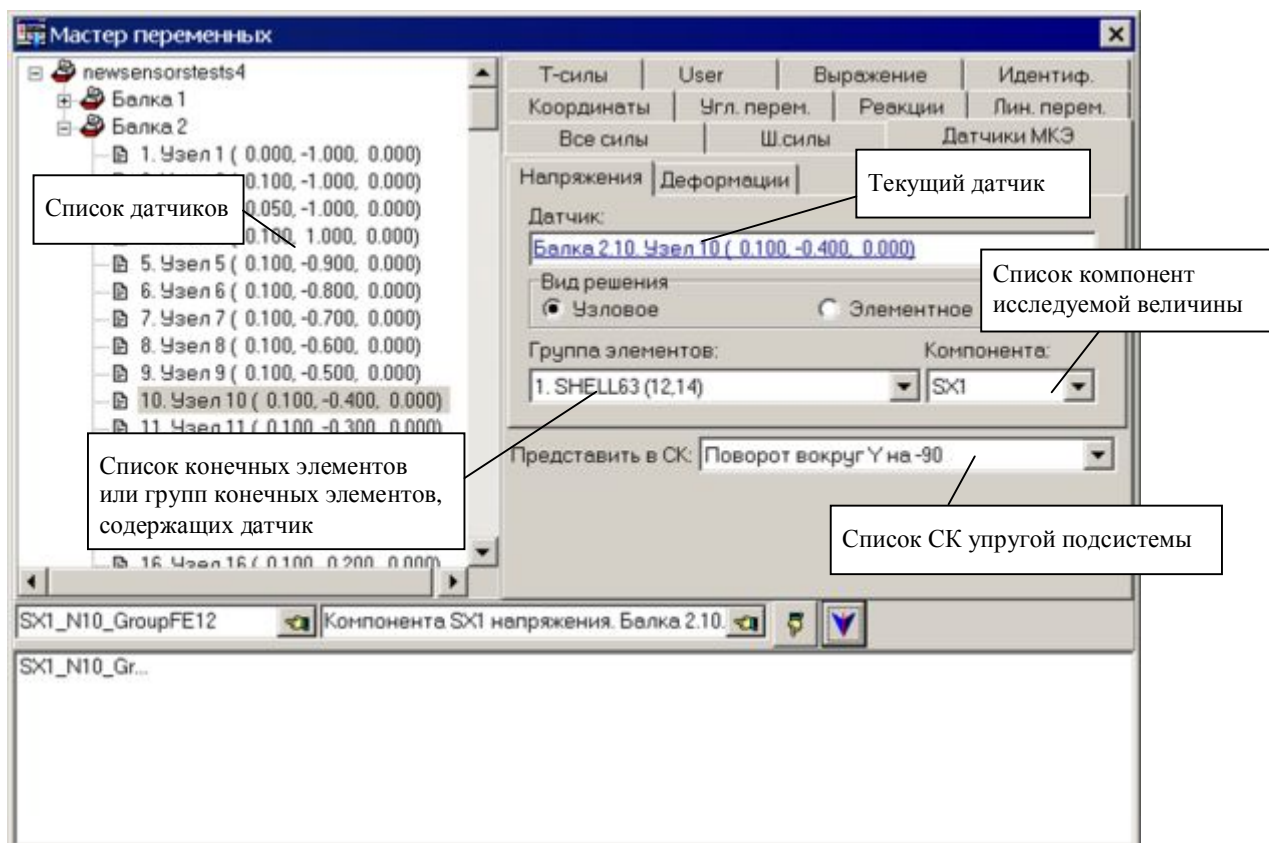


Рис.11.67. Вкладка **Датчики** мастера переменных

Она содержит подчиненные вкладки **Напряжения** и **Деформации** для работы с датчиками соответствующих типов. Набор управляющих элементов, расположенных на этих вкладках, одинаков. Порядок формирования переменных для исследования напряжений и деформаций также одинаков. Поэтому в настоящем параграфе опишем только создание переменной типа «датчик напряжений».

**Примечание.** Если файл данных `input.fss` упругой подсистемы не содержит датчиков напряжений или деформаций, соответствующая вкладка отсутствует. Если в файле нет датчиков обоих типов, отсутствует вкладка **Датчики МКЭ**. Порядок подготовки данных для расчета напряжений и деформаций изложен в пп.11.2.1.2,11.2.2.3.

Для формирования переменной необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Выбрать вкладку, соответствующую типу переменной: **Напряжения** или **Деформации**. Заметим, что списки датчиков напряжений и деформаций для одной и той же подсистемы могут быть различными.
2. Выбрать датчик в списке датчиков. Иерархия списка датчиков соответствует структуре модели. Если объект содержит несколько упругих подсистем, в списке присутствуют каталоги, которым подчинены локальные списки датчиков подсистем. В примере на рис.11.67 модель содержит две упругих подсистемы «Балка 1» и «Балка 2». На рисунке показан список датчиков подсистемы «Балка 2». Если число датчиков подсистемы велико, поиск датчика можно выполнить по номеру или координатам узла с помощью формы, вызываемой из контекстного меню (рис.11.68). Если выполняется поиск по координатам, их нужно ввести в поля **X,Y,Z** и нажать кнопку **Найти**. Если в списке присутствует датчик, координаты которого полностью соответствуют введенным значениям, он будет выбран, если нет – будет предложено выбрать датчик ближайший к точке с заданными координатами.

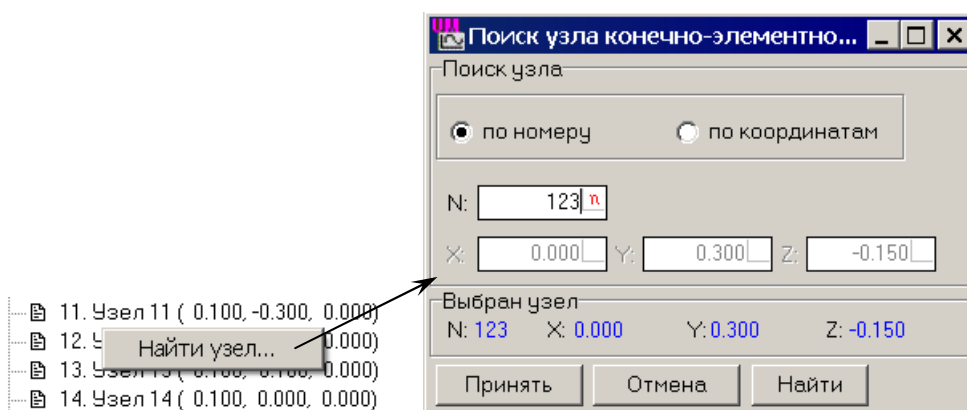


Рис.11.68. Поиск датчика в списке с помощью формы, вызываемой из контекстного меню.

3. Выбрать вид решения: **Узловое** или **Элементное**. Узловые решения рассчитываются как средние значения решений в элементах, содержащих данный узел (см. п.11.1.2). При этом элементы группируются по типу элемента, если узел принадлежит элементам разных типов, и по принадлежности элементов к поверхностям (для элементов оболочек). Группировка по принадлежности к поверхностям выполняется путем сравнения нормалей к плоскостям конечных элементов. Если угол между нормальями мал (составляет не более шести градусов) конечные элементы оболочек относятся к одной группе. Узловые решения рассчитываются отдельно для каждой группы конечных элементов.
4. Выбрать группу конечных элементов для узлового решения или конечный элемент для элементного решения. На рис.11.67 представлен вид формы при значении вида решения **Узловое**. Если выбрать значение **Элементное**, заголовок **Группа элементов** изменит название на **Конечные элементы** и содержимое списка обновится.
5. Выбрать компонент исследуемой величины в выпадающем списке рис.11.69. Список содержит элементы тензора напряжений, а также главные напряжения и эквивалентные напряжения фон Мизеса. Для элементов оболочек список содержит компоненты для верхней и нижней поверхности. Верх поверхности определяется направлением нормали. Наименование компонент соответствует обозначениям, принятым в программе конечно-элементного анализа, из которой импортированы данные.

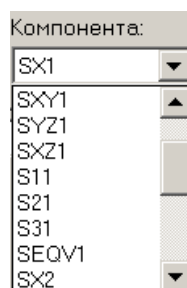





Рис.11.69. Выпадающий список **Компонента**.

Например, для программы **ANSYS** компоненты напряжений именовются **SX, SY, SZ, SXY, SYZ, SXZ, S1, S2, S3, SEQV**, где **S1..S3** – главные напряжения, **SEQV** – эквивалентные напряжения (напряжения фон Мизеса). Если выбран элемент оболочки или группа элементов данного типа, имя компоненты дополняется цифрой **1** для верхней поверхности элемента или **2** – для нижней. Например, **S12** – максимальное главное напряжение на нижней поверхности, **SEQV1** – напряжение фон Мизеса на верхней поверхности, **SZ1** – напряжение вдоль оси **Z** на верхней поверхности и т.д..

6. Выбрать в выпадающем списке **Представить в СК** систему координат, относительно которой рассчитываются напряжения.
7. Если требуется, изменить имя переменной или комментарий, которые формируются по умолчанию.

8. Кнопкой  создать переменную с измененным именем переменной и комментарием. При нажатии кнопки  создается переменная с именем и комментарием по умолчанию.

#### 11.5.3.4. Экспорт упругих перемещений в ANSYS

Упругие перемещения экспортируются в **ANSYS** с помощью формы (рис.11.71), которая вызывается кнопкой  панели инструментов программы **UMSimul.exe**. Если данная кнопка отсутствует, включите пункт **Упругие подсистемы** контекстного меню панели инструментов, чтобы сделать ее видимой (рис.11.70).

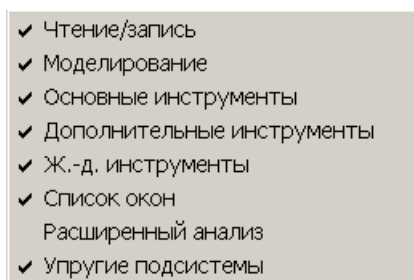


Рис.11.70. Контекстное меню панели инструментов **UMSimul.exe**

Чтобы экспортировать упругие перемещения нужно выполнить следующую последовательность действий.

1. Включить флажок **Сохранять значения модальных координат** перед началом интегрирования уравнений движения.
2. С помощью **Мастера переменных** создать переменные, значения которых будут критерием выбора момента модельного времени для формирования файла нагрузки.
3. Поместить созданные переменные в список переменных или на графическое окно.
4. По окончании интегрирования уравнений открыть форму экспорта нагрузки (рис.11.71). Выбранные переменные перетащить мышкой в список переменных данной формы.
5. В выпадающем списке **Подсистема** выбрать упругую подсистему, для которой формируется файл нагрузки.

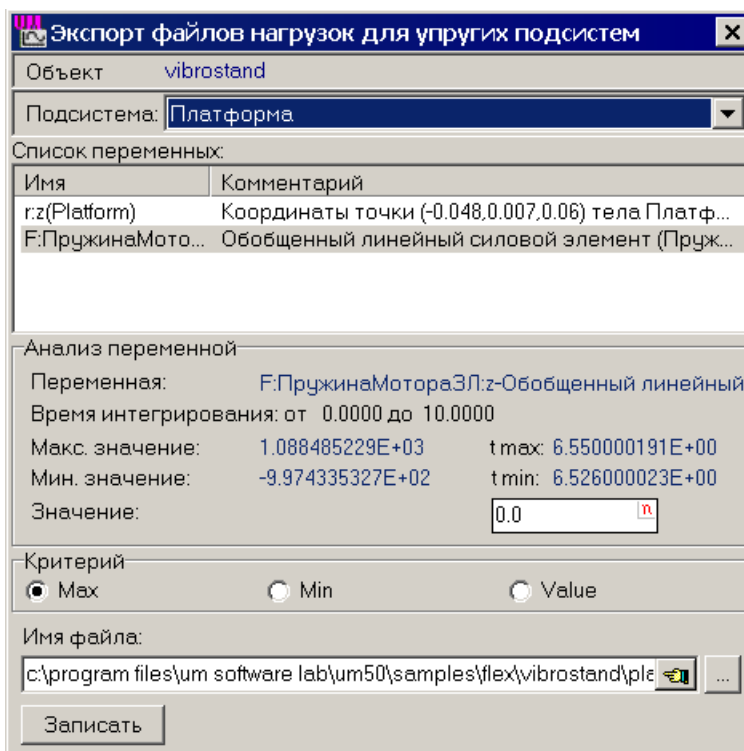


Рис.11.71. Формирование файла нагрузки ANSYS


6. Выбрать переменную в списке переменных формы экспорта. Группа элементов **Анализ переменной** отражает информацию, включающую имя переменной, максимальное и минимальное значения переменной и моменты времени, когда переменная имела эти значения, а также поле ввода произвольного момента времени, для которого нужно сформировать файл нагрузки.
7. С помощью радио-группы **Критерий** выбрать момент времени, для которого формируется файл упругих перемещений. Возможные значения:
  - **Max** – используется t max;
  - **Min** – используется t min;
  - **Value** – используется значение времени в поле ввода.

**Примечание.** Результаты интегрирования запоминаются через интервалы времени очень близкие к шагу представления результатов (поле **Шаг представления результатов** на вкладке **Интегратор | Параметры моделирования**). Значение времени, задаваемое в поле ввода, может не соответствовать точно времени, для которого сохраняются результаты. Поэтому среди результатов подбираются ближайшие по времени.

**Примечание.** Выбор момента времени, для которого формируется файл нагрузки, можно сделать на основе визуального анализа графика контрольной характеристики в графическом окне.

8. В поле **Имя файла** задать имя создаваемого файла нагрузки. Имя файла по умолчанию, включая полный путь к нему, можно задать, нажав клавиши **Ctrl+ENTER** клавиатуры, либо кнопкой . Каталог хранения файла по умолчанию является каталог упругой подсистемы. Имя файла по умолчанию включает имя подсистемы, имя переменной и критерий выбора времени для формирования. Если такой файл существует, к имени файла по умолчанию добавляется следующий порядковый номер, до тех пор, пока оно не станет уникальным. Например, Платформа F\_ПружинаМотораЗЛ\_zmax003.ald – создается

файл нагрузки, соответствующей максимальному значению вертикальной силы, возникающей в силовом элементе ПружинаМотораЗЛ, причем такой файл формируется четвертый раз (при втором формировании к имени добавляется «000»).

9. Кнопка  предназначена для выбора файла нагрузки из числа существующих файлов, который будет перезаписан.
10. Кнопка **Записать** создает файл нагрузки.