



Руководство пользователя



# Моделирование упругих тел

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

## Оглавление

<b>11. МОДУЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ UM FEM .....</b>	<b>1-4</b>
<b>11.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....</b>	<b>1-4</b>
11.1.1. Кинематика .....	1-5
11.1.2. Расчет напряжений и деформаций .....	1-7
11.1.2.1. Расчет напряжений и деформаций с использованием импортированных данных .....	1-8
11.1.2.2. Расчет напряжений и деформаций с использованием библиотеки конечных элементов UM..	1-9
11.1.2.2.1. Объемные элементы .....	1-9
11.1.2.2.1.1. 8-ми узловой гексаэдр .....	1-9
11.1.2.2.1.2. 6-ти узловая призма .....	1-10
11.1.2.2.1.3. 4-х узловой тетраэдр.....	1-11
11.1.2.2.2. Оболочечные элементы .....	1-12
11.1.2.2.2.1. 3-х узловой треугольник.....	1-12
<b>11.2. КОМПЛЕКТАЦИЯ, УСТАНОВКА, ПОДГОТОВКА ДАННЫХ.....</b>	<b>1-14</b>
11.2.1. Создание модели в среде ANSYS и обмен данными .....	1-15
11.2.1.1. Порядок подготовки данных в ANSYS.....	1-15
11.2.1.2. Создание датчиков напряжений и деформаций .....	1-18
11.2.1.2.1. Выбор датчиков в программе ANSYS .....	1-19
11.2.1.2.2. Выбор датчиков в программе ANSYS_UM.....	1-19
11.2.1.3. Обмен данными с программой ANSYS .....	1-21
11.2.1.4. Особенности импорта данных из ANSYS Workbench.....	1-25
11.2.2. Создание модели в среде MSC.NASTRAN и обмен данными .....	1-32
11.2.2.1. Общие сведения .....	1-32
11.2.2.2. Состав программного обеспечения, схема импорта .....	1-32
11.2.2.3. Подготовка данных в среде MSC.PATRAN/NASTRAN .....	1-35
11.2.2.4. Обмен данными с программой MSC.NSATRAN .....	1-44
11.2.3. Создание модели в среде NX NASTRAN и обмен данными.....	1-45
11.2.3.1. Общие сведения .....	1-45
11.2.3.2. Состав программного обеспечения, схема импорта .....	1-45
11.2.3.3. Подготовка данных в среде NX NASTRAN/FEMAP .....	1-48
11.2.3.4. Обмен данными с программой NX NASTRAN.....	1-55
11.2.4. Создание модели в среде ABAQUS и обмен данными.....	1-57
11.2.4.1. Общие сведения .....	1-57
11.2.4.2. Состав программного обеспечения, схема импорта .....	1-57
11.2.4.3. Подготовка данных в среде ABAQUS .....	1-59
11.2.4.4. Обмен данными с программой ABAQUS .....	1-73
11.2.5. Создание модели в среде FIDESIS и обмен данными .....	1-74
11.2.5.1. Общие сведения .....	1-74
11.2.5.1.1. Состав программного обеспечения, схема импорта из ПК FIDESYS .....	1-74
11.2.5.1.2. Основные этапы создания упругой модели в программе FIDESYS .....	1-76
11.2.5.1.3. Сосредоточенные массы и твердотельные площадки в программе FIDESYS.....	1-78
11.2.5.1.3.1.1. Обмен данными с программой FIDESYS .....	1-80
11.2.6. Особенности подготовки данных в программе МКЭ .....	1-81
11.2.6.1. Выбор интерфейсных узлов.....	1-81
11.2.6.2. Контроль нормалей к поверхностям оболочек и пластин.....	1-89
<b>11.3. МАСТЕР УПРУГИХ ПОДСИСТЕМ .....</b>	<b>1-91</b>
11.3.1. Анимационное окно .....	1-92
11.3.2. Управляющее окно .....	1-93
11.3.2.1. Вкладка «Общие» .....	1-94
11.3.2.2. Вкладка «Решение» .....	1-95
11.3.2.3. Вкладка «Представление».....	1-101
11.3.2.4. Вкладка «Положение».....	1-103
11.3.3. Окно выбора узлов.....	1-103
<b>11.4. НОВЫЙ МАСТЕР УПРУГИХ ПОДСИСТЕМ – UM FEM WIZARD.....</b>	<b>1-105</b>
11.4.1. Выбор файла данных .....	1-106
11.4.2. Выбор объектов в анимационном окне .....	1-108

11.4.2.1. Выбор узлов .....	1-108
11.4.2.2. Выбор конечных элементов .....	1-108
11.4.3. Ввод свойств конечных элементов .....	1-110
11.4.4. Окно редактирования списка конечных элементов .....	1-112
11.4.4.1. Контекстное меню списка конечных элементов группы .....	1-113
11.4.5. Вкладка Решение управляющего окна .....	1-115
11.4.6. Вкладка Представление управляющего окна .....	1-116
<b>11.5. ВКЛЮЧЕНИЕ УПРУГОЙ ПОДСИСТЕМЫ В СОСТАВНОЙ ОБЪЕКТ .....</b>	<b>1-118</b>
11.5.1. Добавление упругой подсистемы .....	1-118
11.5.2. Диалоговое окно упругой подсистемы .....	1-119
11.5.2.1. Вкладка «Общие» .....	1-119
11.5.2.2. Вкладка «Положение» .....	1-121
11.5.2.3. Вкладка «Решение» .....	1-121
11.5.2.4. Вкладка «Представление» .....	1-121
11.5.2.5. Вкладка «Системы координат» .....	1-121
11.5.3. Особенности описания взаимодействий с упругой подсистемой .....	1-124
11.5.3.1. Особенности описания контактной силы .....	1-126
<b>11.6. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УПРУГОЙ ПОДСИСТЕМЫ В СОСТАВЕ МОДЕЛИ .....</b>	<b>1-129</b>
11.6.1. Специальные инструменты .....	1-130
11.6.1.1. Экспорт упругих перемещений в ANSYS .....	1-130
11.6.1.2. Подготовка данных для UM Durability .....	1-131
11.6.2. Инспектор моделирования объекта .....	1-133
11.6.2.1. Вкладка «Моделирование» .....	1-133
11.6.2.2. Вкладка «Представление» .....	1-137
11.6.2.3. Вкладка «Решение» .....	1-137
11.6.3. Работа с переменными .....	1-138
11.6.3.1. Координаты .....	1-138
11.6.3.2. Линейные переменные .....	1-138
11.6.3.3. Напряжения и деформации .....	1-139
11.6.3.4. Раскрашивание поверхности в соответствии с решением .....	1-142
11.6.3.4.1. Создание переменных раскрашивания .....	1-142
11.6.3.4.2. Добавление переменных раскрашивания в список анимационного окна .....	1-144
11.6.3.4.3. Настройка переменных раскрашивания .....	1-145
<b>11.7. ЭКСПОРТ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ANSYS .....</b>	<b>1-147</b>

# 1. МОДУЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ UM FEM

## 1.1. 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**. Конечноэлементная 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, MSC.NASTRAN 2007, MSC MD NASTRAN 2010, MSC.NASTRAN 2012, MSC.NASTRAN 2016, MSC.NASTRAN 2019;**
- **NX NASTRAN 8.0, NX NASTRAN 9.0, NX NASTRAN 12;**
- **ABAQUS 6.10-1;**
- **FIDESYS 3.0** и более поздних версий.

Предполагается, что пользователь владеет, как минимум, базовыми понятиями конечноэлементного 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. 1.5.3. "Особенности описания взаимодействий с упругой подсистемой", с. 1-124.

### 1.1.1. 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. 1.1):

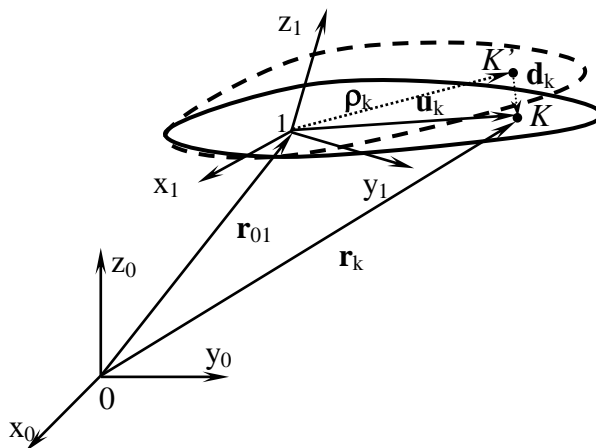


Рис. 1.1. Метод присоединенной системы координат

$$\mathbf{r}_k^0 = \mathbf{r}_{01}^0 + \mathbf{A}_{01}(\boldsymbol{\rho}_k^1 + \mathbf{d}_k^1) \tag{1.1}$$

где  $\mathbf{r}_{01}$  – радиус-вектор начала отсчета СК1,  $\mathbf{A}_{01}$  – матрица поворота,  $\boldsymbol{\rho}_k$  – радиус-вектор точки К 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 конечноэлементного анализа.

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

$$\mathbf{u} = \sum_{j=1}^N \mathbf{h}_j w_j = \mathbf{H} \mathbf{w} \tag{1.2}$$

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 конечноэлементной 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 конечноэлементной 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:

$$(\mathbf{C} - \lambda \mathbf{M})\mathbf{u} = 0, \quad (1.3)$$

где  $\mathbf{C}$  – матрица жесткости,  $\mathbf{M}$  – матрица масс,  $\lambda$  – собственное значение,  $\mathbf{u}$  – собственный вектор. Если матрицы имеют полный ранг, уравнение (1.3) 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 конечноэлементной 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:

$$(\bar{\mathbf{C}} - \lambda \bar{\mathbf{M}})\bar{\mathbf{y}} = 0 \quad (1.4)$$

Преобразованный набор форм строится на основе соотношения:

$$\bar{\mathbf{N}} = \mathbf{N}\bar{\mathbf{U}} \quad (1.5)$$

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 (1.4).

### 1.1.2. Расчет напряжений и деформаций

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

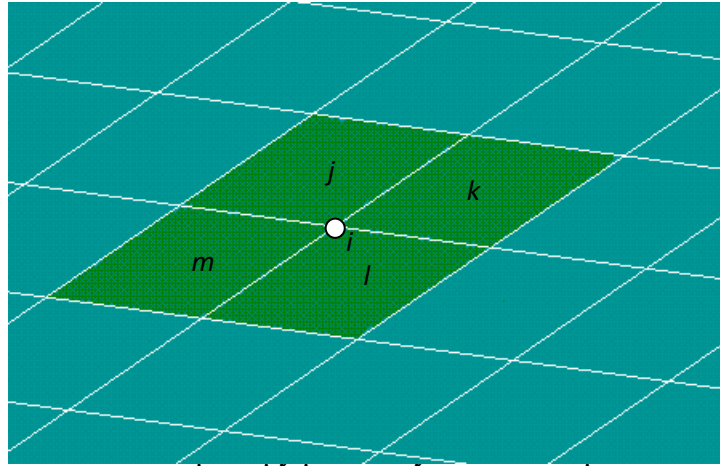
$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_i^e &= \mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e)\mathbf{u}_i^e, \\ \boldsymbol{\sigma}_i^e &= \mathbf{D}_i^e\boldsymbol{\varepsilon}_i^e = \mathbf{D}_i^e\mathbf{B}_i^e\mathbf{u}_i^e, \end{aligned} \quad (1.6)$$

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.

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. 1.2), то узловое напряжение рассчитывается по формуле

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

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  $i$ .



### 1.1.2.1. Расчет напряжений и деформаций с использованием импортированных данных

Представив узловые перемещения в виде суммы (1.2), деформации и напряжения конечного элемента можно представить следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^e &= \mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e)\mathbf{H}_i^e\mathbf{w} = \mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e)\sum_{j=1}^H \mathbf{h}_{ji}^e w_j = \sum_{j=1}^H \mathbf{h}_{ji}^{e\varepsilon} w_j = \mathbf{H}_i^{e\varepsilon}\mathbf{w}, \\ \sigma_i^e &= \mathbf{D}_i^e\mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e)\mathbf{H}_i^e\mathbf{w} = \mathbf{D}_i^e\mathbf{B}_i^e(\mathbf{x}_i^e)\sum_{j=1}^H \mathbf{h}_{ji}^e w_j = \sum_{j=1}^H \mathbf{h}_{ji}^{e\sigma} w_j = \mathbf{H}_i^{e\sigma}\mathbf{w}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где  $\mathbf{h}_{ji}^e$  – часть  $j$ -ой формы, соответствующая узловым степеням свободы  $i$ -го конечного элемента. Векторы-столбцы  $\mathbf{h}_{ji}^{e\sigma}$  и  $\mathbf{h}_{ji}^{e\varepsilon}$  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 (1.7), 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 УМ они преобразуются аналогично векторам-столбцам  $\mathbf{h}_j$  на основе соотношений (1.4), (1.5).

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

Отметим, что матрицы  $\mathbf{H}^e$  и  $\mathbf{H}^\sigma$  всей упругой подсистемы могут занимать десятки гигабайт дискового пространства в файле *input.fss* и оперативной памяти при вычислениях, делая расчёт динамических напряжений для всей подсистемы очень долгим или даже невозможным. Поэтому поиск опасных зон, который требуется, например, для оценки нагруженности и долговечности детали, проводится обычно на предварительном этапе в программе МКЭ на основе результатов статического анализа, что трудоёмко и не всегда корректно. Затем формируется список датчиков в этих зонах для которого рассчитываются

ся и экспортируются матрицы  $\mathbf{H}^e$ ,  $\mathbf{H}^o$ . Таким образом требования к ресурсам резко снижаются и появляется возможность оценить нагруженность выбранных зон, при этом анализ напряжений остальной детали в **УМ** недоступен.

Чтобы преодолеть эти ограничения разработана библиотека конечных элементов, с помощью которой можно рассчитать напряжения как в отдельном датчике, так и всей подсистемы, не прибегая к импорту данных (то есть матрицы  $\mathbf{H}^o$ ).

### 1.1.2.2. Расчет напряжений и деформаций с использованием библиотеки конечных элементов **УМ**

Библиотека содержит следующие наиболее часто используемые типы конечных элементов:

- объёмные элементы:
  - 8-ми узловой гексаэдр;
  - 6-ти узловая призма;
  - 3-х узловой тетраэдр;
- элементы пластин:
  - 3-х узловой треугольник;
  - 4-х узловой четырёхугольник;
- другие конечные элементы:
  - n-узловая жесткая площадка.

В данной версии программы поддерживаются только изотропные материалы.

Далее кратко опишем теоретические основы создания элементов каждого типа.

Общий вид выражения для расчёта матрицы  $\mathbf{B}_i^e$ , связывающей поле деформаций конечного элемента с узловыми перемещениями, называемой в литературе матрицей градиентов, следующий:

$\mathbf{B} = \frac{d\mathbf{N}}{dq^T}$ , где  $\mathbf{N}$  – матрица функций формы элемента,  $\mathbf{q}$  – матрица-столбец узловых степеней свободы, индексы у матриц опущены. Функции формы и узловые степени свободы элементов каждого типа приведены в следующих пунктах.

#### 1.1.2.2.1. Объёмные элементы

##### 1.1.2.2.1.1. 8-ми узловой гексаэдр

Трёхмерный изопараметрический шестигранный конечный элемент первого порядка показан на Рис.11.3.

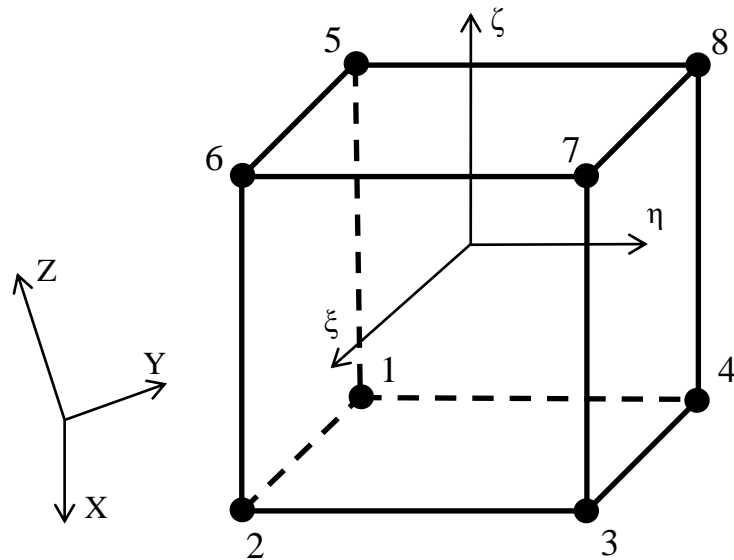


Рис. 1.3. 8-ми узловой гексаэдр

Конечный элемент имеет 8 узловых точек, которые расположены в вершинах элемента. В каждой узловой точке задано по три степени свободы: перемещения вдоль осей X, Y и Z. Функции формы для такого элемента в естественной системе координат задаются следующими соотношениями (Шабров):

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_i)(1 + \eta \eta_i)(1 + \zeta \zeta_i),$$

где  $\xi_i, \eta_i, \zeta_i$  – локальные координаты вершины с номером  $i, i = 1 \dots 8$ .

Пределы изменения локальных координат одинаковы для каждого конечного элемента и составляют  $-1 \leq \xi, \eta, \zeta \leq 1$ .

#### 1.1.2.2.1.2. 6-ти узловая призма

Трехмерный изопараметрический пятигранный конечный элемент первого порядка показан на рис. 1.4.

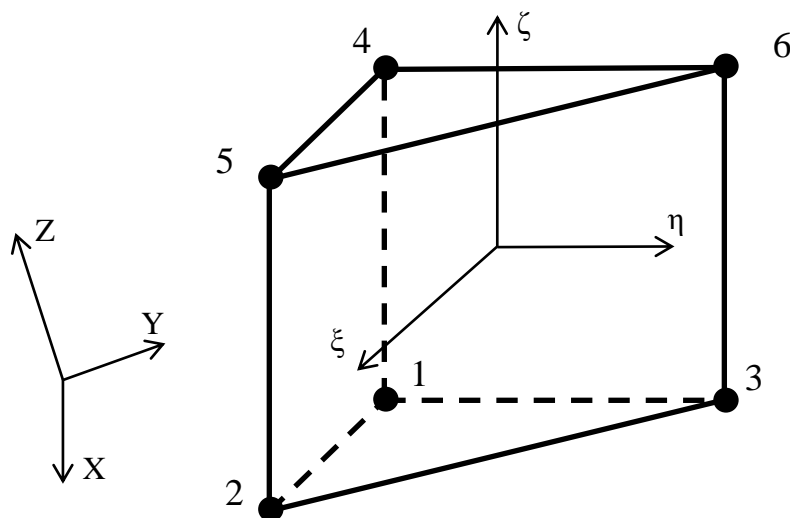


Рис. 1.4. 6-ти узловая призма

Конечный элемент имеет 6 узловых точек, которые расположены в вершинах элемента. В каждой узловой точке задано по три степени свободы: перемещения вдоль осей X, Y и Z. Функции формы для такого элемента в системе координат  $L_1, L_2, \zeta$  задаются следующими соотношениями (Zienkiewicz):

$$\begin{cases} N_1(L_1, L_2, \xi) = \frac{1}{2}L_1(1 - \xi) \\ N_2(L_1, L_2, \xi) = \frac{1}{2}L_2(1 - \xi) \\ N_3(L_1, L_2, \xi) = \frac{1}{2}(1 - L_1 - L_2)(1 - \xi) \\ N_4(L_1, L_2, \xi) = \frac{1}{2}L_1(1 + \xi) \\ N_5(L_1, L_2, \xi) = \frac{1}{2}L_2(1 + \xi) \\ N_6(L_1, L_2, \xi) = \frac{1}{2}(1 - L_1 - L_2)(1 + \xi) \end{cases},$$

где  $L_1, L_2$  – это так называемые  $L$  – координаты (Zienkiewicz), а  $\xi$  локальная координата по высоте призмы с пределами изменения  $-1 \leq \xi \leq 1$ .

### 1.1.2.2.1.3. 4-х узловой тетраэдр

Трехмерный изопараметрический четырехгранный конечный элемент первого порядка показан на рис. 1.5

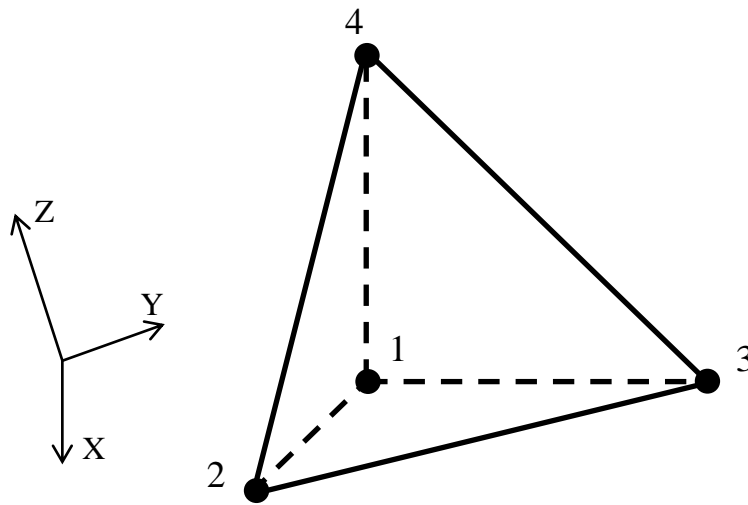


Рис. 1.5. 4-х узловой тетраэдр

Конечный элемент имеет 4 узловые точки, которые расположены в вершинах элемента. В каждой узловой точке задано по три степени свободы: перемещения вдоль осей X, Y и Z. Функции формы для такого элемента в системе  $L$ -координат задаются следующими соотношениями (Zienkiewicz):

$$N_i(L_1, L_2, L_3, L_4) = L_i, \text{ где } i = 1 \dots 4.$$

**1.1.2.2.2. Оболочечные элементы**

**1.1.2.2.2.1. 3-х узловой треугольник**

Трехмерный оболочечный конечный элемент первого порядка показан на рис. 1.6.

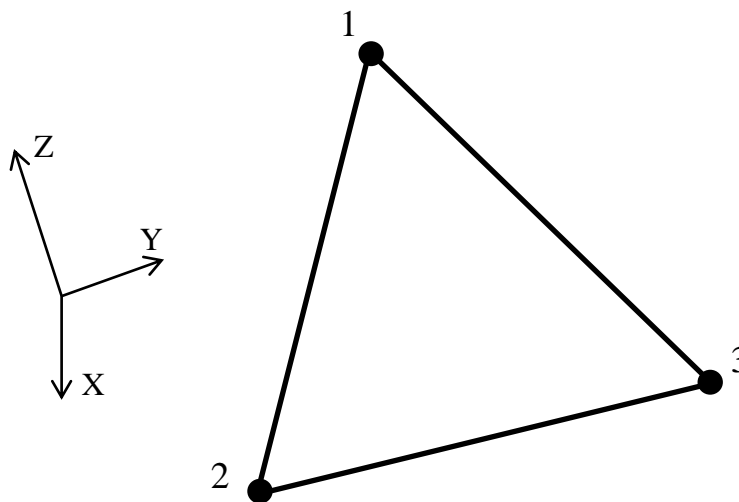


Рис. 1.6. 3-х узловой треугольник

Конечный элемент имеет 3 узловые точки, которые расположены в вершинах элемента. В каждой узловой точке задано 5 степеней свободы: 3 перемещения вдоль координатных осей X, Y и Z и 2 угла поворота вокруг осей X и Y.

Мембранные перемещения аппроксимируются с использованием функций формы (Zienkiewicz):

$$N_i(L_1, L_2, L_3) = L_i, \text{ где } i = 1 \dots 3.$$

Изгибные перемещения (прогиб и два угла поворота) аппроксимируются с использованием функций формы, которые для первого узла конечного элемента имеют вид (Zienkiewicz):

$$[N_1]^T = \left\{ \begin{array}{l} L_1 + L_1^2 L_2 + L_1^2 L_3 - L_1 L_2^2 - L_1 L_3^2 \\ b_3 \left( L_1^2 L_2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3 \right) - b_2 \left( L_3 L_1^2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3 \right) \\ c_3 \left( L_1^2 L_2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3 \right) - c_2 \left( L_3 L_1^2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3 \right) \end{array} \right\},$$

где  $b_1 = y_2 - y_3$ ,  $c_1 = x_3 - x_2$  и т.д.

Для узлов 2 и 3 изгибные функции формы получаются циклической перестановкой индексов 1->2->3->1.

**1.1.2.2.2.2. 4-х узловой четырёхугольник**

Трехмерный оболочечный конечный элемент первого порядка показан на рис. 1.6.

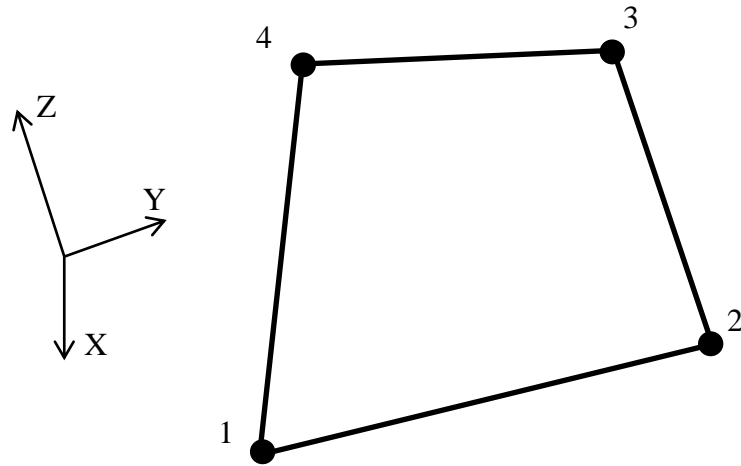


Рис. 1.7. 4-х узловой четырёхугольник.

Конечный элемент имеет 3 узловые точки, которые расположены в вершинах элемента. В каждой узловой точке задано 5 степеней свободы: 3 перемещения вдоль координатных осей X, Y и Z и 2 угла поворота вокруг осей X и Y.

Мембранные перемещения аппроксимируются с использованием функций формы (Zienkiewicz):

$$N_i(L_1, L_2, L_3) = L_i, \text{ где } i = 1 \dots 3.$$

Изгибные перемещения (прогиб и два угла поворота) аппроксимируются с использованием функций формы, которые для первого узла конечного элемента имеют вид (Zienkiewicz):

$$[N_1]^T = \left\{ \begin{array}{l} L_1 + L_1^2 L_2 + L_1^2 L_3 - L_1 L_2^2 - L_1 L_3^2 \\ b_3 \left( L_1^2 L_2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3 \right) - b_2 \left( L_3 L_1^2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3 \right) \\ c_3 \left( L_1^2 L_2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3 \right) - c_2 \left( L_3 L_1^2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3 \right) \end{array} \right\},$$

где  $b_1 = y_2 - y_3$ ,  $c_1 = x_3 - x_2$  и т.д.

Для узлов 2 и 3 изгибные функции формы получаются циклической перестановкой индексов 1->2->3->1.

## 1.2. Комплектация, установка, подготовка 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**;
- программное обеспечение для импорта данных из **ABAQUS** - программа-конвертер **abaqus\_um.exe**;
- мастер подготовки данных упругих тел, встроенный в программу **UM Input**;
- модуль ввода исходных данных упругих подсистем, встроенный в программу **UM Input**;
- модуль моделирования динамики упругих подсистем, встроенный в программу **UM Simulation**.

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

- 1) описание упругого тела в программе конечноэлементного 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 п. 1.2.1. "Создание модели в среде **ANSYS** и обмен данными", с. 1-15, работе с **MSC.NASTRAN** посвящен п. 1.2.2. "Создание модели в среде **MSC.NASTRAN** и обмен данными", с. 1-32, **NX NASTRAN** п. 1.2.3. "Создание модели в среде **NX NASTRAN** и обмен данными", с. 1-45, **ABAQUS** п. 1.2.4. "Создание модели в среде **ABAQUS** и обмен данными", с. 1-57.

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

### 1.2.1.1. Порядок подготовки данных в ANSYS

На рис. 1.8 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 конечноэлементной 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`.

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 `.\docu` каталога программы ANSYS, для версии **9.0** – `.\apdl`.

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

*/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.

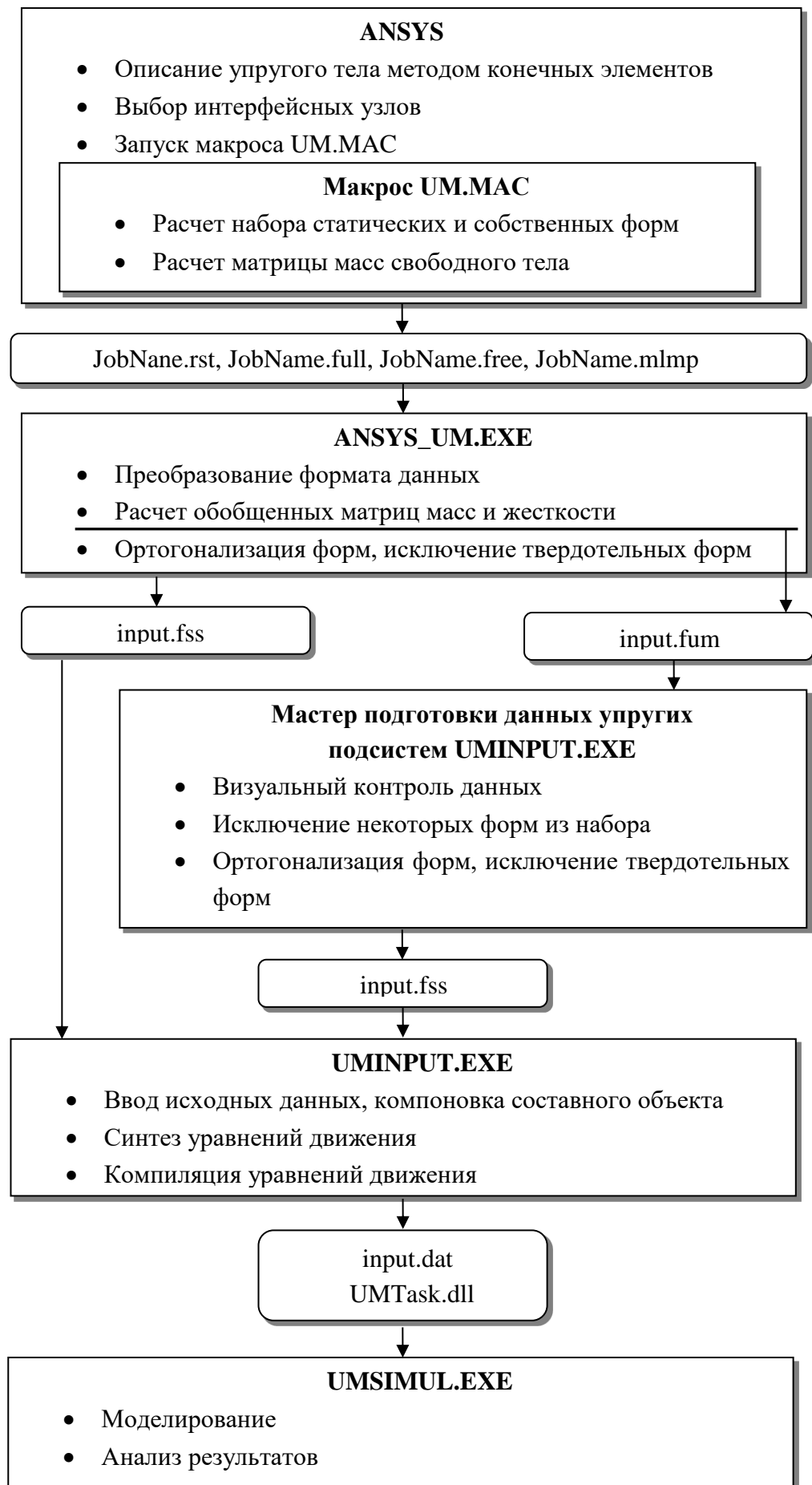


Рис. 1.8. Цикл подготовки данных объекта с упругими подсистемами

**Мастер упругих подсистем**, встроенный в программу **UM Input**, 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 программе ввода данных **UM Input**. Программа 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 конечноэлементной 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 `HPTCREATE`), либо подбором параметров разбивки. Некоторые особенности создания конечноэлементной модели описаны в п. 1.3.1. "Анимационное окно", с. 1-92.

- 2) Выбор *интерфейсных узлов* конечноэлементной 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.

#### 1.2.1.2. 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  $\mathbf{h}_{ji}^{\epsilon\sigma}$  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 конечноэлементной модели. Это связано с ограничением 2 Гб на размер файла, доступный для чтения программам **ANSYS\_UM** и **UM Input**. 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.

#### 1.2.1.2.1. 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.fum. 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.fum.

#### 1.2.1.2.2. 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 umsensors.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 `umsensors.mac`, который позволяет автоматизировать создание файла `umsensors.lst`. Поместите его в каталог **ANSYS**, выбранный по умолчанию для хранения макросов. Формат командной строки:

```
umsensors, 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 конечноэлементной 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 `umsensors.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 номером **N**, то включение этого номера в список файла `umsensors.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 `umsensors.lst`. В табл. 1.1 приведено содержание файла `input.fum` в зависимости от вариантов подготовительных действий, при значении параметра `StressInclude` макроса **um.mac** равном 1.

Таблица 1.1

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

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`.

### 1.2.1.3. 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 **UM Input**.

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 конечноэлементной разбивке подсистемы, типах используемых элементов, имя задачи, комментарии. Совокупность этих данных будем называть *решением*.

Главное окно этой программы содержит три вкладки: **Файл**, **Настройки** и **Датчики**; индикатор, информирующий о ходе выполнения процесса преобразований, и две кнопки: **Создать** и **Заккрыть** (рис. 1.9).

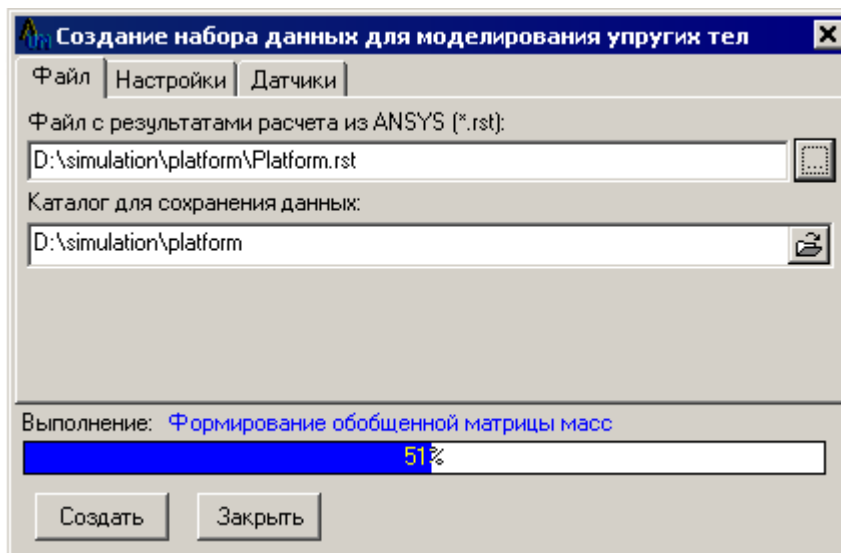


Рис. 1.9.

Закладка **Файл** (рис. 1.9) 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**.

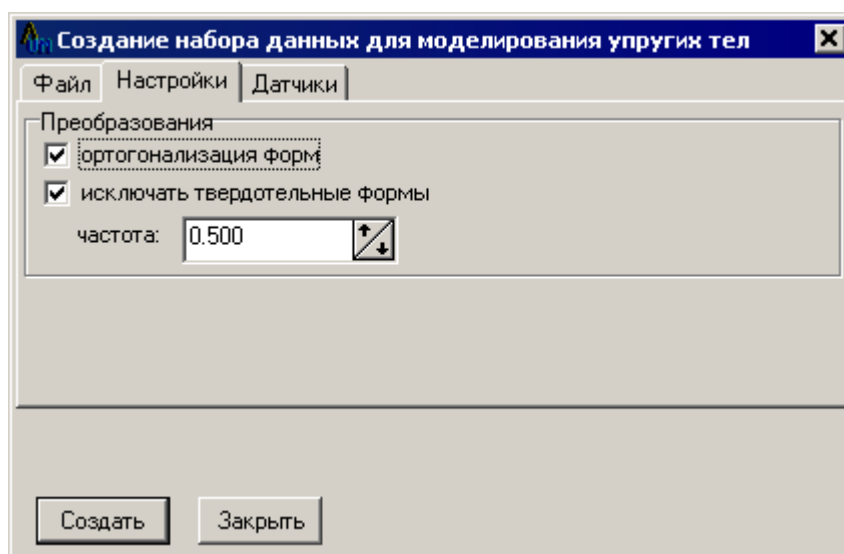


Рис. 1.10.

Закладка **Настройки** (рис. 1.10) 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 (1.4), (1.5) 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 (1.4) 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 umensors.lst (см. п. 1.3.2.2. "Вкладка «Решение»", с. 1-95.), закладка примет вид подобный рис. 1.11.

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 umensors.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. 1.12), которое вызывается правой кнопкой мыши.

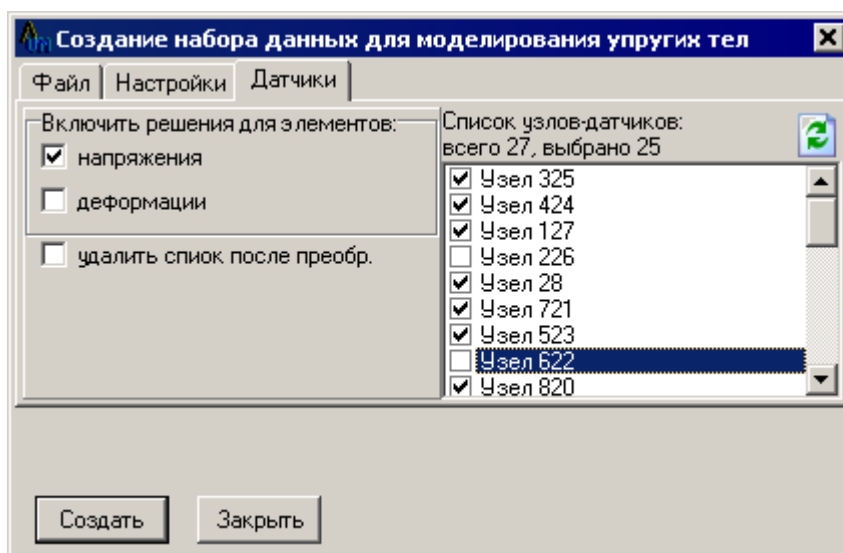


Рис. 1.11. Закладка Датчики при выборе узлов-датчиков из файла umensors.lst.

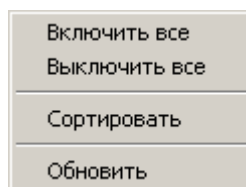



Рис. 1.12.

Файл `umsensors.lst` может быть создан, удален или отредактирован после запуска программы **ansys\_um**. Информация в окне 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. 1.13). Вид окна после выбора всех датчиков изображен на рис. 1.14.

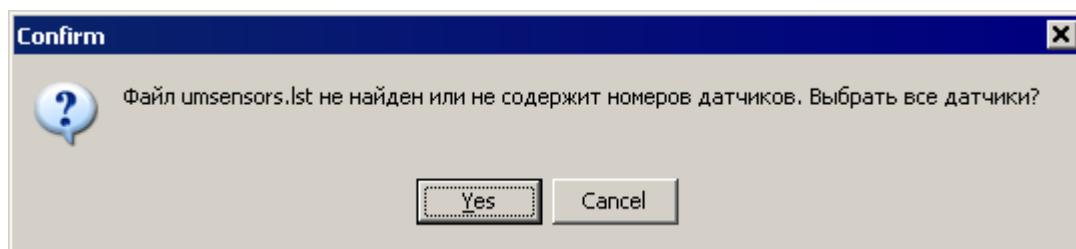


Рис. 1.13.

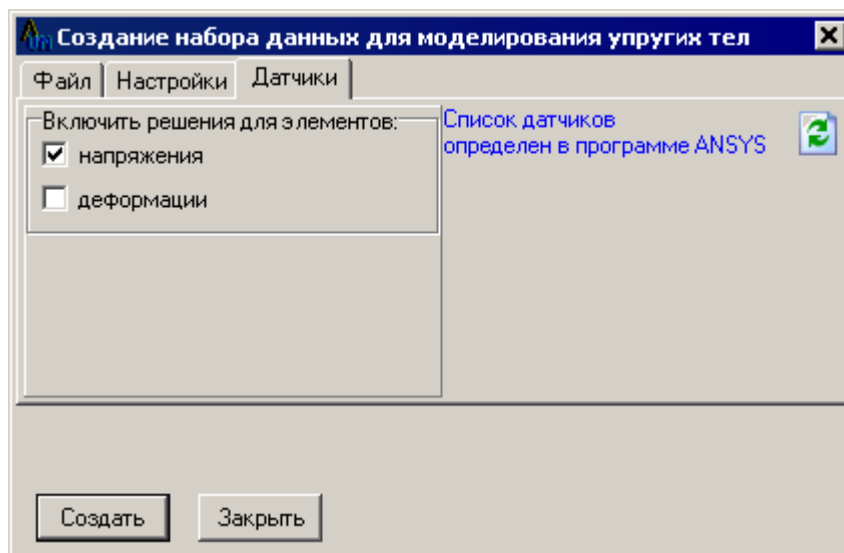


Рис. 1.14. Закладка Датчики при выборе узлов-датчиков в программе ANSYS

Файл `input.fum` 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.

### 1.2.1.4. Особенности импорта данных из ANSYS Workbench

**ANSYS Workbench** является универсальным конечноэлементным пакетом, предназначенным для решения в единой среде и/или на одной и той же конечно-элементной модели различных классов задач (прочности, теплофизики, динамики жидкостей и газов, электромагнетизма). В данной главе рассматривается подготовка данных о механических КЭ моделях для проведения динамических исследований в ПК УМ.

Отметим наиболее важные моменты, значимые при импорте упругой модели из ПК **ANSYS Workbench** в ПК УМ. При подготовке данных используется макрос **um.mac**, который должен располагаться в каталоге **.\apdl** среды **ANSYS Workbench**.

**Важное обстоятельство:** при описании модели должна использоваться система СИ (рис. 1.15).

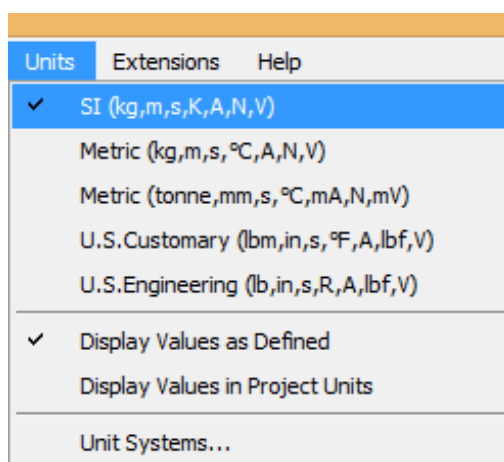


Рис. 1.15. Выбор системы СИ

Импорт данных в ПК УМ включает следующие этапы.

**Первый этап.** Устанавливается физический тип задачи – модальный анализ (**Modal**). Для этого выбираем компоненту **Modal** в панели задач **Toolbox** двойным нажатием левой кнопки мыши. В результате этих действий появится схема проекта модального анализа (рис. 1.16).

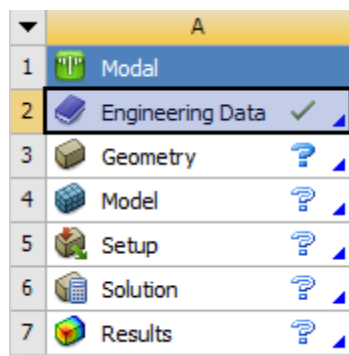


Рис. 1.16. Схема проекта для модального анализа

Строится геометрическая твердотельная модель объекта в модуле **Design Modeler**. Модуль вызывается двойным нажатием левой кнопки мыши по полю **Geometry** проекта задачи.

**Второй этап.** Создание КЭ сетки в модуле **Mechanical**, вызываемом двойным нажатием левой кнопки на поле **Model** (рис. 1.17).

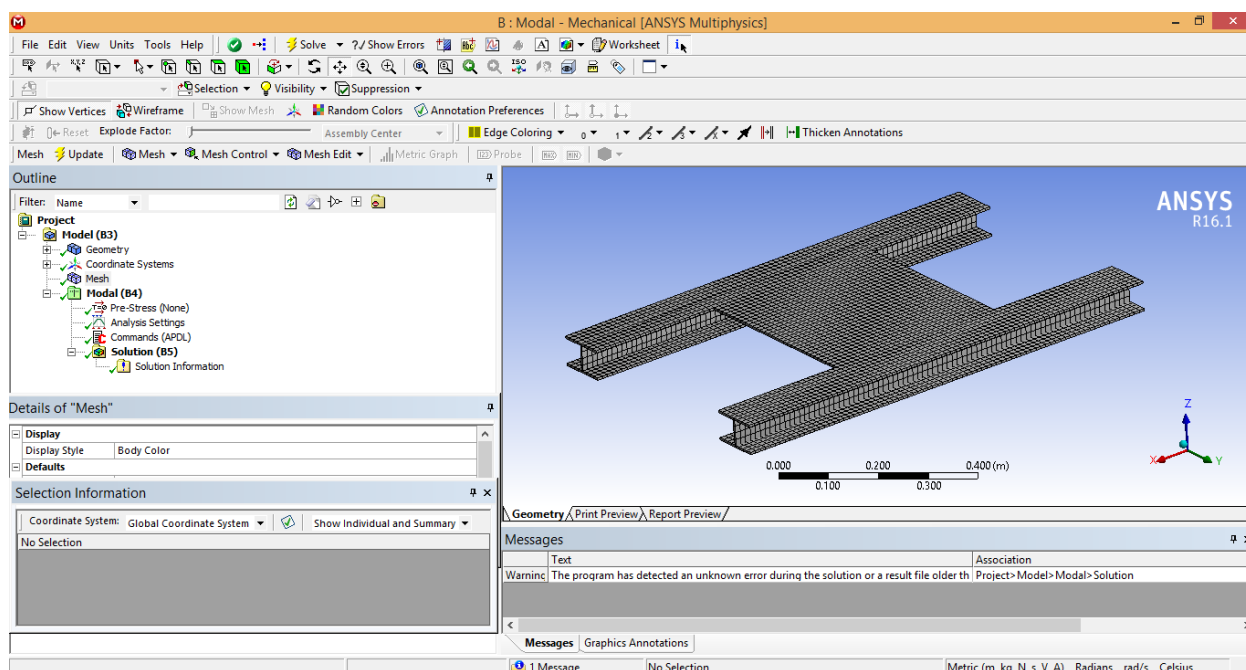


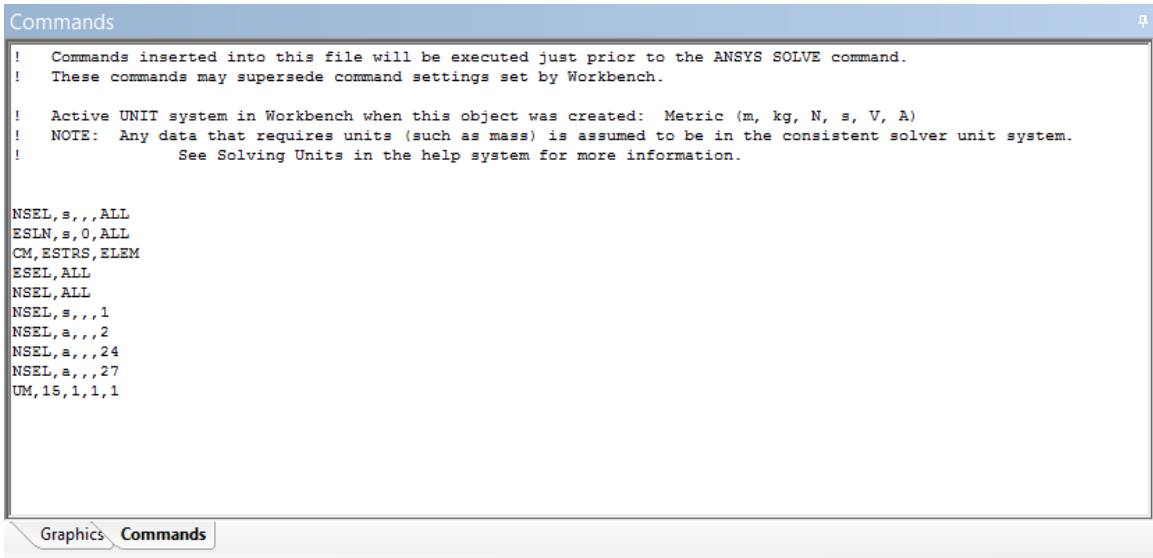
Рис. 1.17. Пример конечно-элементной модели платформы в модуле **Mechanical**

**Третий этап.** Добавление команд на языке **APDL**. Согласно базовой методике моделирования динамики упругих тел, КЭ модель должна быть описана как суперэлемент, должны быть выбраны датчики напряжений и деформаций. Все эти действия в среде **Workbench** пользователю предлагается выполнить с помощью команд **APDL**.

Добавление команд создания твердотельных площадок и описания суперэлемента, создание датчиков напряжений и деформаций, а также вызов макроса **UM.MAC** производится в поле **Commands** дерева проекта. Поле **Commands** добавляется с помощью правой кнопки мыши **Modal**→**Insert**→**Commands**. В поле **COMMANDS** задаются команды на языке **APDL**.

Команды языка **APDL**, используемые для подготовки импорта в ПК УМ подробно описаны в пунктах 1.2.1.1. "Порядок подготовки данных в ANSYS", с. 1-15 и 1.2.1.2.1. "Выбор датчиков в программе ANSYS", с. 1-19.

На рисунке (рис. 1.18) приведено окно с командами формирования задания без твердотельных площадок для платформы.



```
Commands
! Commands inserted into this file will be executed just prior to the ANSYS SOLVE command.
! These commands may supersede command settings set by Workbench.
!
! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N, s, V, A)
! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit system.
! See Solving Units in the help system for more information.
!
NSEL,S,,,ALL
ESLN,S,0,ALL
CM,ESTRS,ELEM
ESEL,ALL
NSEL,ALL
NSEL,S,,,1
NSEL,A,,,2
NSEL,A,,,24
NSEL,A,,,27
UM,15,1,1,1
```

Рис. 1.18. Окно **Commands** с командами на языке **APDL**

В данном примере формируется набор датчиков напряжений и деформаций, включающий все узлы и элементы КЭ модели. Далее выбираются интерфейсные узлы с номерами 1,2,24,27 и запускается макрос UM для расчета 15 собственных форм, напряжений и деформаций.

В ряде случаев для получения корректных результатов моделирования требуется создать **твердотельные площадки** вокруг интерфейсных узлов.

Создание твердотельных площадок осуществляется либо интерактивно, либо с помощью следующих команд **APDL**:

CERIG,MASTE,SLAVE,Ldof,Ldof2...Ldof5, где

CERIG – команда создания твердотельной связи.

MASTE – номер главного узла,

SLAVE – номер зависимого узла,

Ldof,Ldof2...Ldof5 – степени свободы, на которые вводятся ограничения.

**Важный момент:** указанные степени свободы должны быть допустимыми для используемых типов конечных элементов.

Интерактивный способ создания твердотельной площадки связан с созданием элементов **Point Mass** (сосредоточенная масса) и **Remote Points**. Для создания элемента **Point Mass** в поле дерева проекта нужно выбрать **Geometry->Insert->Point Mass**. В появившемся окне настроек указать в поле **Geometry** положение, в котором будет создана сосредоточенная масса, и в поле **Mass** задать величину **Point Mass** (рис. 1.19).

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
<b>Geometry</b>	<b>No Selection</b>
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Coordinate	0. m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	0. m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	0. m
Location	Click to Change
<b>Definition</b>	
<input type="checkbox"/> Mass	0. kg
Mass Moment of Inertia X	0. kg·m <sup>2</sup>
Mass Moment of Inertia Y	0. kg·m <sup>2</sup>
Mass Moment of Inertia Z	0. kg·m <sup>2</sup>
Suppressed	No
Behavior	Deformable
Pinball Region	All

Рис. 1.19. Поля, необходимые для описания элемента **Point Mass**

Выбрать созданный объект правой кнопкой мыши **Point Mass->Promote to Remote Point** (рис. 1.20).

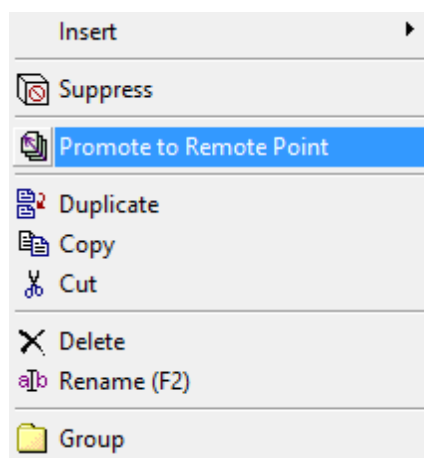


Рис. 1.20.

В появившемся окне настроек созданного объекта **Point Mass – Remote Point** (рис. 1.21), в поле **Geometry** выбрать узлы, входящие в твердотельную площадку, в поле **Location** указать узел с главными степенями свободы (интерфейсный узел). В поле **Behavior** выбрать **Rigid**, в поле **DOF Selection** установить **Manual**. Установить значения **Active** полям ограниченных степеней свободы (**X Component, Y Component, Z Component, Rotation X, Rotation Y, Rotation Z**).

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
<b>Geometry</b>	<b>No Selection</b>
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Coordinate	0. m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	10. m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	1.e-002 m
Location	Click to Change
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Behavior	Rigid
Pinball Region	All
DOF Selection	Manual
X Component	Active
Y Component	Active
Z Component	Active
Rotation X	Active
Rotation Y	Active
Rotation Z	Active

Рис. 1.21. Поля, необходимые для описания объекта **Point Mass – Remote Point**

**Важный момент:** указанные степени свободы должны быть допустимыми для используемых типов конечных элементов.

**Четвертый этап.** Для выполнения решения нажимаем правой кнопкой мыши на поле дерева проекта **Modal** → **Solve** (рис. 1.22).

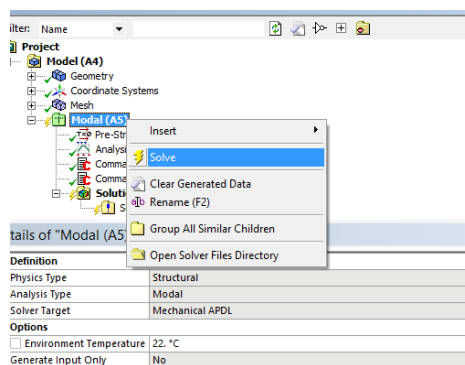


Рис. 1.22. Запуск решения

Файлы результатов решения располагаются в папке рабочего проекта **PROJECT\_NAME\dp0\SYS\MECH\**.

**Пятый этап.** Запускается программа **ansys\_um.exe**, подробности работы в которой описаны в пункте 1.2.1.3. "Обмен данными с программой ANSYS", с. 1-21.

Рассмотрим случай, когда **интерфейсный узел расположен не в области модели, а на некотором удалении от нее**, например, Рис. 1.23.

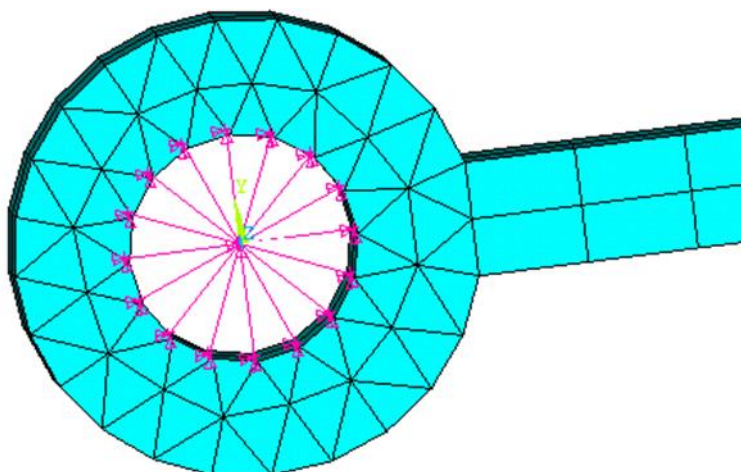


Рис. 1.23. Уравнения связей в цилиндрическом отверстии шатуна

В данном примере нужно создать интерфейсный узел в цилиндрическом отверстии шатуна, поместить туда сосредоточенную массу и создать твердотельную площадку вокруг интерфейсного узла, связав его с другими узлами шатуна.

1. Создаем узел в точке, не принадлежащей области модели.

**Remote Point**→ **Insert**→ **Remote Point**

В поле **Scoping Method** выбираем **Free Standing**. Вводим координаты X, Y и Z, также вводим имя созданного нами узла в поле **Pilot Node APDL Name** (в нашем случае **MyNode**).

Details of "Remote Point 3"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Free Standing
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Coordinate	0. m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	0. m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	0. m
Location	Click to Change
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Pilot Node APDL Name	MyNode

2. Добавляем сосредоточенную массу. **Geometry** → **Insert** → **Point Mass**.

Выбираем **Scoping Method**→**Remote Point**. В появившемся поле **Remote Point** выбираем уже созданную **Remote point**. Вводим значения массы и моменты инерции.

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Remote Point
Applied By	Remote Attachment
Remote Points	Remote Point
Coordinate System	Global Coordinate System
X Coordinate	0. m
Y Coordinate	0. m
Z Coordinate	0. m
<b>Definition</b>	
<input type="checkbox"/> Mass	1.e-004 kg
<input type="checkbox"/> Mass Moment of Inertia X	1.e-003 kg·m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> Mass Moment of Inertia Y	1.e-003 kg·m <sup>2</sup>
<input checked="" type="checkbox"/> Mass Moment of Inertia Z	1.e-003 kg·m <sup>2</sup>
Suppressed	No

3. Твердотельные площадки в данном случае удобно делать командами **CERIG** в поле **Commands**.

**Modal**→**Insert**→**Commands**.

Например,

CERIG,MyNode,SLAVE,Ldof,Ldof2...Ldof5, где

CERIG – команда создания твердотельной связи.

MyNode – имя созданного нам и главного узла,

SLAVE – номер зависимого узла,

Ldof,Ldof2...Ldof5 – степени свободы, на которые вводятся ограничения.

## 1.2.2. Создание модели в среде MSC.NASTRAN и обмен данными

### 1.2.2.1. Общие сведения

Анализ конечноэлементной 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.

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 конечноэлементной 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 конечноэлементных 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. 1.2.2.3. *«Подготовка данных в среде MSC.PATRAN/NASTRAN»*, с. 1-35 представлены копии экрана с элементами управления программы **MSC.PATRAN 2005**. Диалоговые окна для других версий программы могут отличаться.

### 1.2.2.2. 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. YYYU в наименовании модуля это номер версии **MSC.NASTRAN**, для которой он используется. Например, `umfum2005.alt` предназначен для импорта данных из **MSC.NASTRAN 2005**.

- 2) Файл `geoms.op2` содержит конечноэлементную модель (узлы, конечные элементы), упругие формы и данные для расчета напряжений и деформаций в заданных узлах; файл `matrix.op4` содержит обобщенные матрицы модели.
- 3) 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**.
- 4) Основные этапы создания упругой подсистемы на основе импорта из **MSC.NASTRAN** и ее анализа в **UM** изображены на рис. 1.24.
- 5) Файлы `umfumYYYY.alt` и **NASTRAN\_UM.EXE** после установки программы **Универсальный механизм** располагаются в каталоге `.\bin`.

**Примечание.** **UM 2023** поддерживает импорт данных только из **MSC.NASTRAN 2005**, **MSC.NASTRAN 2007**, **MSC MD NASTRAN 2010** и **MSC.NASTRAN 2012**, **MSC.NASTRAN 2016**, **MSC.NASTRAN 2019**. Импорт из других версий данной программы не тестировался.

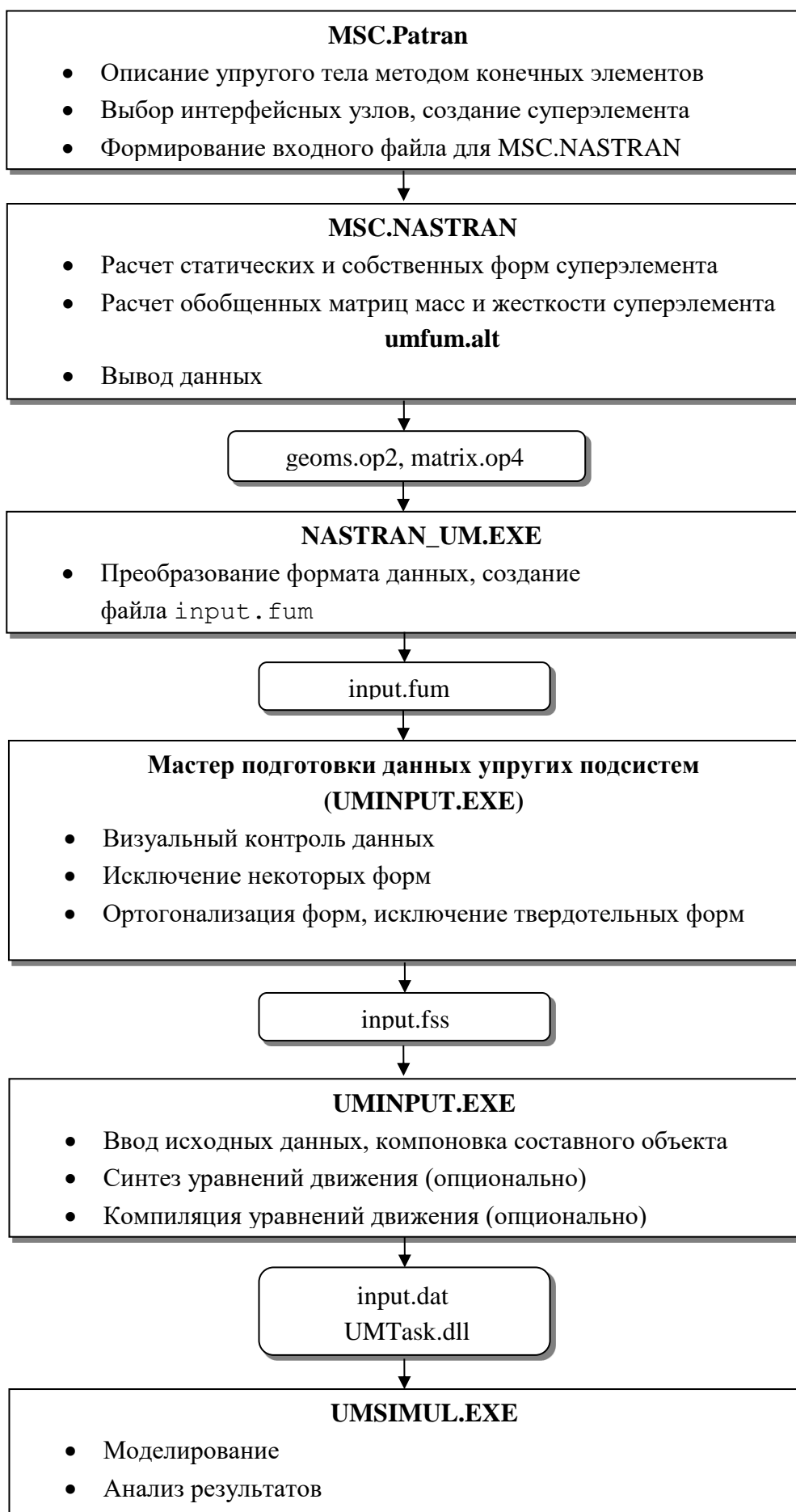


Рис. 1.24. Создание упругой подсистемы с использованием MSC.PATRAN/NASTRAN

### 1.2.2.3. Подготовка данных в среде MSC.PATRAN/NASTRAN

#### Основные этапы создания упругой подсистемы

- 1) Создание конечноэлементной модели исследуемого объекта в программе **MSC.PATRAN**. Модель описывается в системе СИ единиц измерения. Конечноэлементная сетка должна содержать узлы в шарнирных точках и точках прикрепления силовых элементов. Некоторые особенности создания конечноэлементной модели описаны в п. 1.2.6. "*Особенности подготовки данных в программе МКЭ*", с. 1-81.
- 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.
  - Нажать кнопку **Elements** панели инструментов (рис. 1.25).

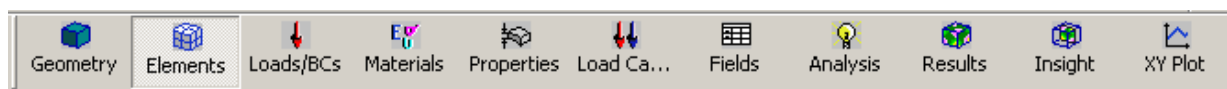


Рис. 1.25. Панель инструментов программы MSC.PATRAN

- На появившемся справа окне (рис. 1.26) выполнить следующие действия.
  - Выбрать **Action**: Create.
  - Выбрать **Object**: Superelement.
  - Задать имя суперэлемента в поле **Superelement Name**.
  - Нажать кнопку **Select Boundary Nodes**.

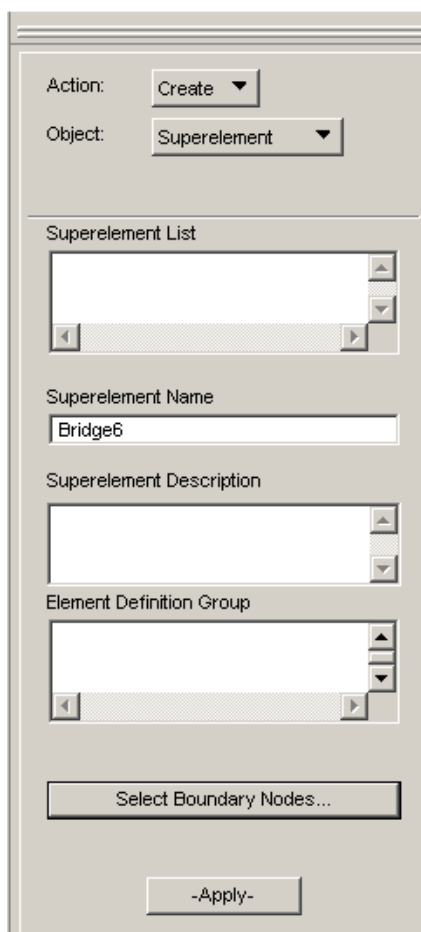


Рис. 1.26. Создание суперэлемента в программе MSC.PATRAN

- Выбрать интерфейсные узлы мышью в окне, отображающем конечноэлементную модель или задав их номера непосредственно в форме рис. 1.27. Нажать кнопку **ОК**

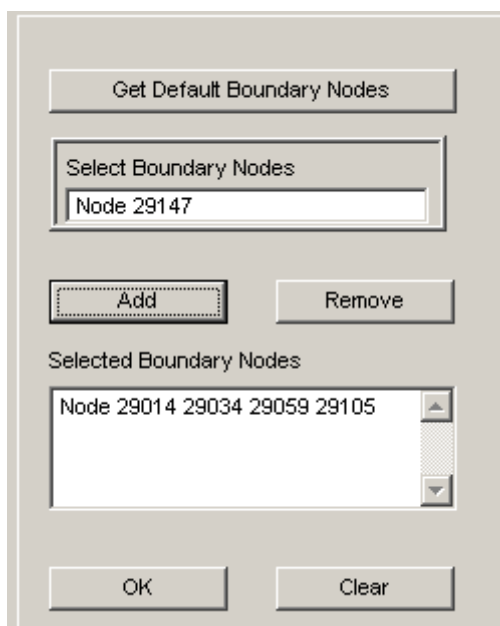


Рис. 1.27. Выбор интерфейсных узлов в программе MSC.PATRAN

- Нажать кнопку **Apply** в окне рис. 1.26.

При отсутствии ошибок будет создан суперэлемент с именем, заданном в поле **Super-element 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.

- Нажать кнопку **Analysis** панели инструментов.
- На появившемся справа окне (рис. 1.28) выполнить следующие действия.
  - Выбрать **Action**: Analyze.
  - Выбрать **Object**: Entire model.
  - Выбрать **Method**: Full Run.
  - Ввести имя задания в поле **Job Name**.

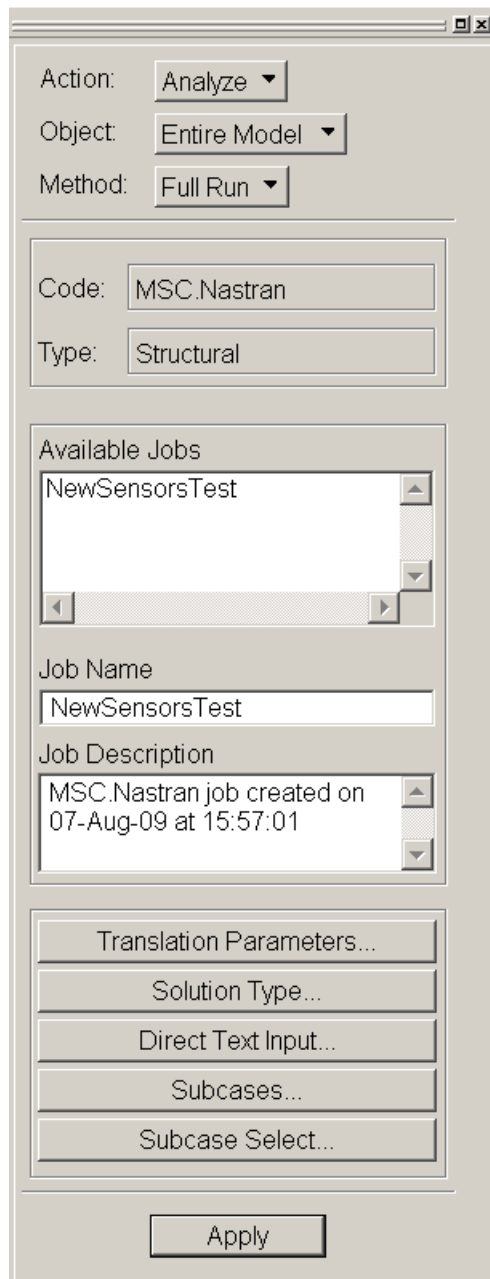


Рис. 1.28. Диалоговое окно анализа модели в программе MSC.PATRAN

Тип решения выбирается в окне, которое вызывается кнопкой **Solution Type...** (рис. 1.29).

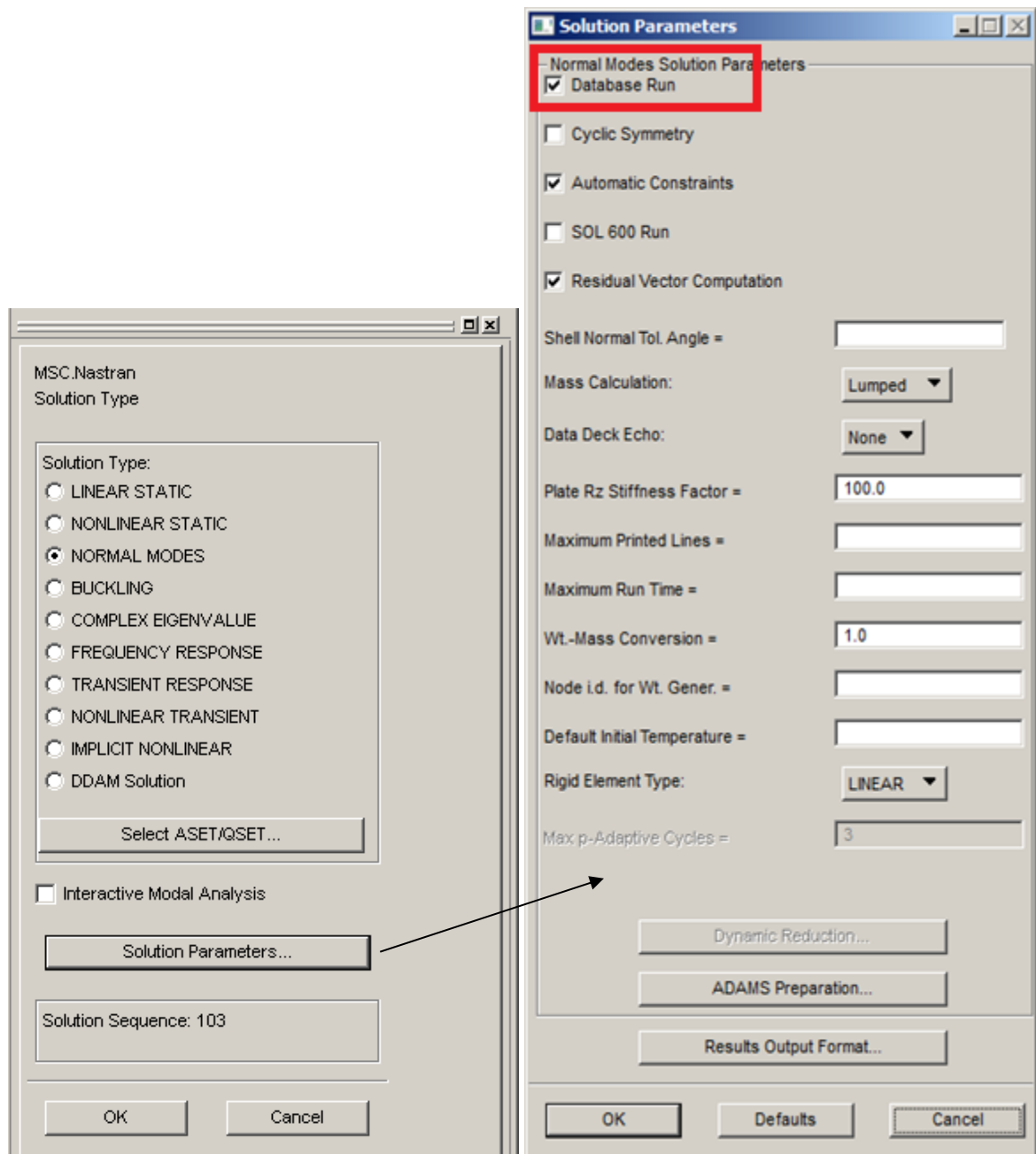


Рис. 1.29. Выбор типа решения в программе MSC.PATRAN

- 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. 1.30).

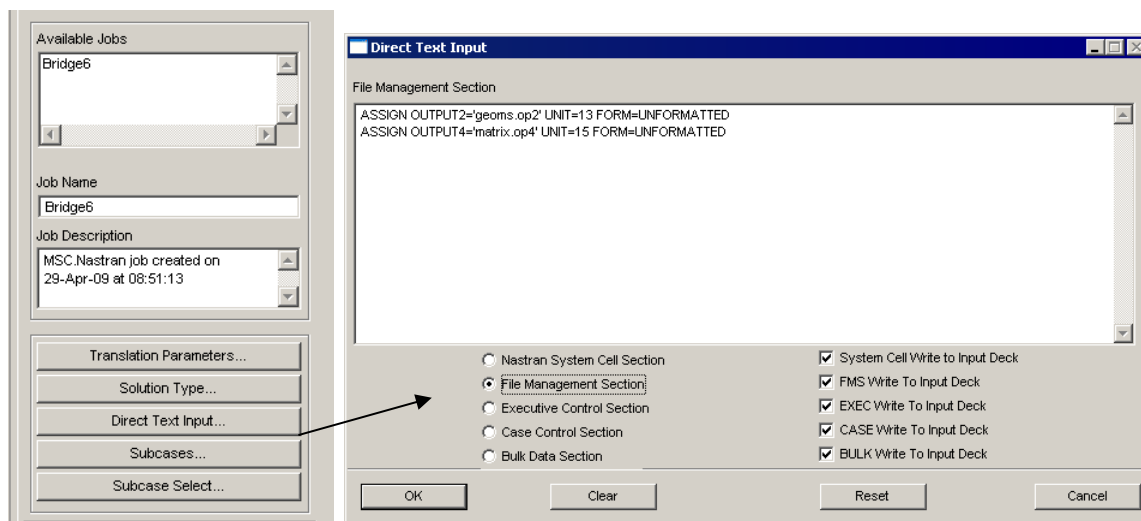


Рис. 1.30. Объявление выходных файлов в программе MSC.PATRAN

- 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 окна **Analysis | Subcases....**

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

9) Нажмите кнопку **Subcase Parameters...** и введите параметры модального анализа в поля появившейся окна (рис. 1.31).

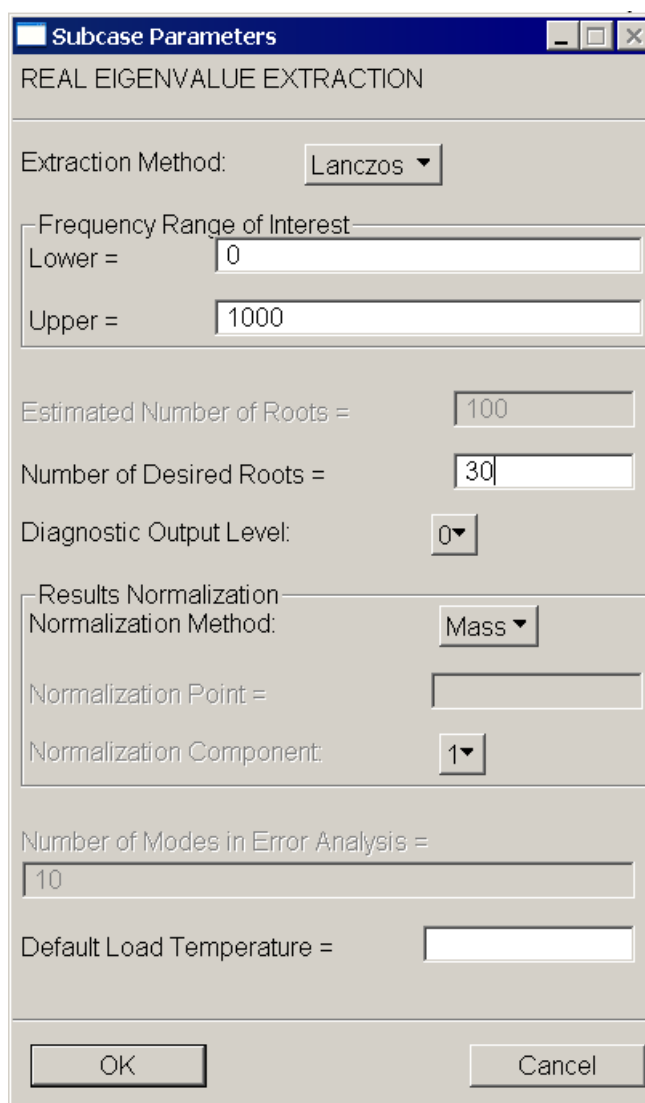


Рис. 1.31. Параметры модального анализа программе MSC.PATRAN

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 ко-

мандой SPOINT. Рассчитанные формы нормализуются относительно матрицы масс (M-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 **CQUAD4**. 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 окне, которое вызывается кнопкой **Select Superelements...** (рис. 1.32); поле со списком: **Aviable Superelements**. Нажмите **OK**.

- 13) Нажмите кнопку **Apply** в окне **Subcases**. В результате будет подготовлен новый набор параметров для расчета суперэлемента. При последующих расчетах его следует выбирать с помощью окна **Subcase Select**, которая вызывается одноименной кнопкой в окне **Analysis**.

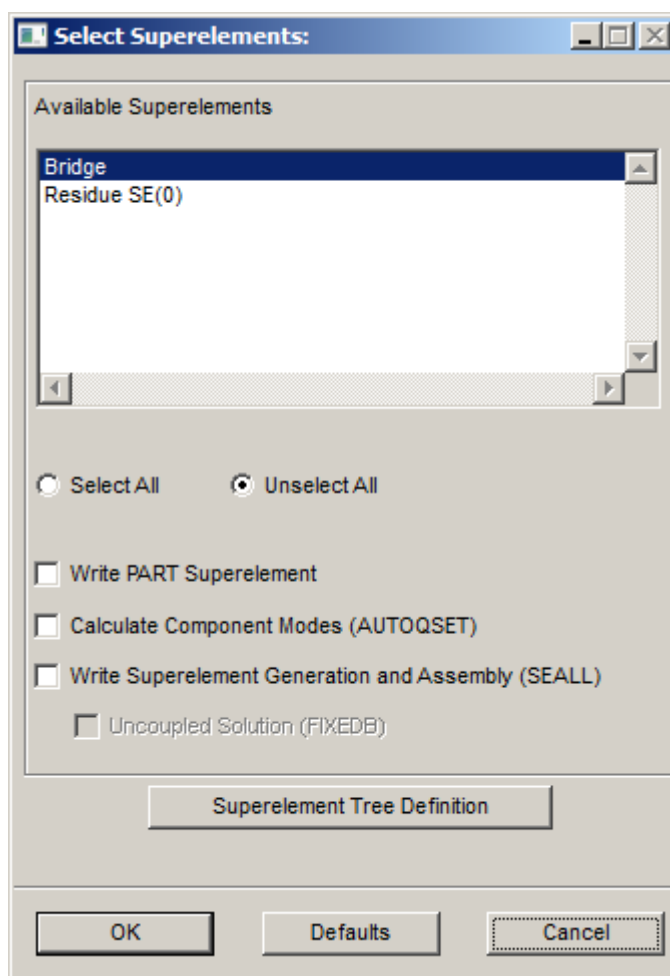


Рис. 1.32. Окно выбора суперэлемента

- 14) Выберите созданный набор параметров.
- 15) Запустить расчет модели в **MSC.NASTRAN** кнопкой **Apply** на окне **Analysis**. При успешном завершении расчета в рабочем каталоге будут созданы файлы `geoms.or2` и `matrix.or4`. 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. Если в результате расчета созданы пустые файлы `geoms.or2` и `matrix.or4`, то в пути к файлу задания для **MSC.NASTRAN** рекомендуется заменить русские буквы на английские и повторить расчет.
- 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 в окне **Analysis**.

#### 1.2.2.4. Обмен данными с программой MSC.NASTRAN

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. 1.33). Конечно, эти данные должны быть рассчитаны **MSC.NASTRAN** с помощью команд, указанных в п. 1.2.2.3. "Подготовка данных в среде **MSC.PATRAN/NASTRAN**", с. 1-35 (п. 11 списка).

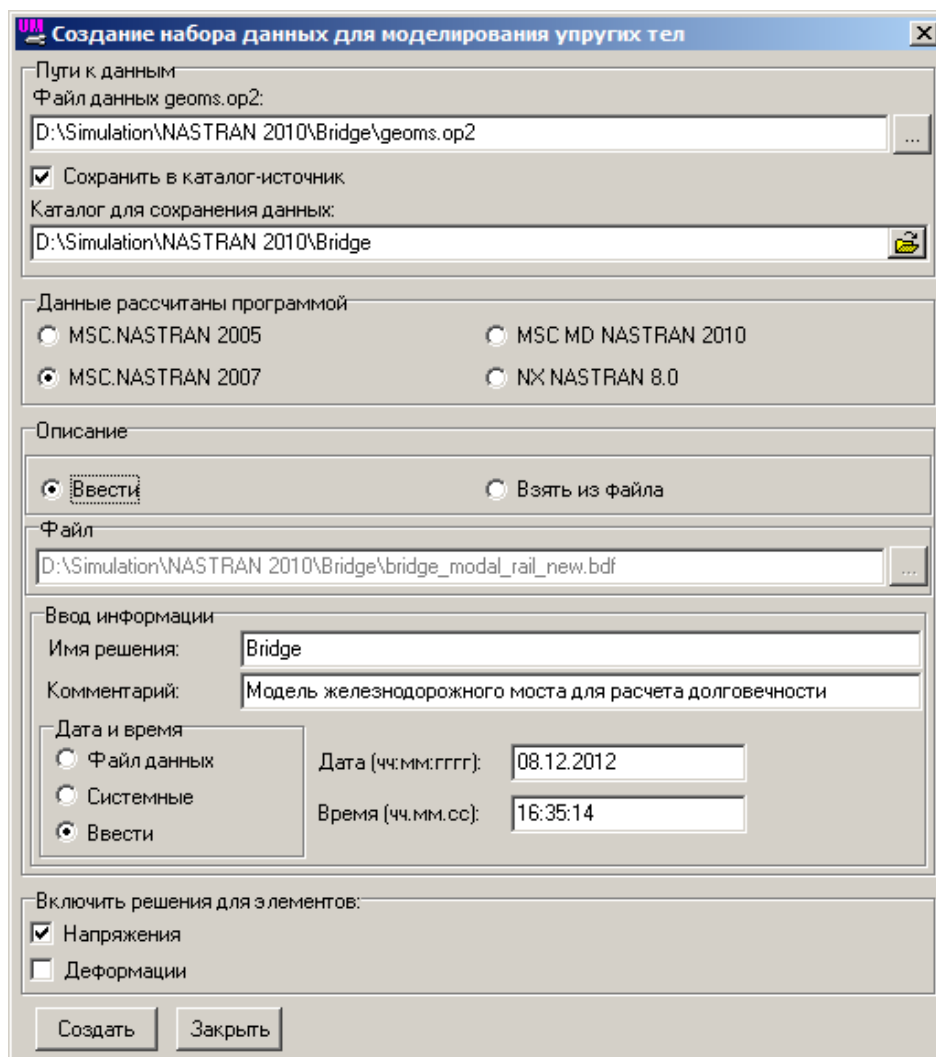


Рис. 1.33. Окно программы NASTRAN\_UM.exe

Имя решения, комментарий и дату расчета можно ввести в соответствующие поля диалогового окна 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. 1.3. "Мастер упругих подсистем", с. 1-91.

### 1.2.3. Создание модели в среде NX NASTRAN и обмен данными

#### 1.2.3.1. Общие сведения

Анализ конечноэлементной модели в NX NASTRAN реализован посредством процедур, написанных на языке NX NASTRAN DMAP (Direct Matrix Abstraction Program). DMAP это язык высокого уровня со своим компилятором.

Для решения типовых задач NX NASTRAN предоставляет процедуры, называемые в руководстве пользователя NX 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.

NX 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 конечноэлементной модели пользователь должен выбрать интерфейсные узлы и создать суперэлемент. Необходимые данные импортируются в ходе модального анализа суперэлемента.

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

NX NASTRAN не имеет собственной визуальной среды разработки конечноэлементных моделей. Как правило, совместно с NX NASTRAN для этой цели используется программа FEMAP. Поэтому при описании необходимых действий пользователя будем указывать соответствующие операции в программе FEMAP. Входной файл NX NASTRAN создается программой FEMAP автоматически при выполнении анализа модели. Ниже, в п. 1.2.3.3. "Подготовка данных в среде NX NASTRAN/FEMAP", с. 1-48 представлены копии экрана с элементами управления программы FEMAP 10.3.0. Диалоговые окна для других версий программы FEMAP могут отличаться.

#### 1.2.3.2. Состав программного обеспечения, схема импорта

ПК UM предоставляет следующее программное обеспечение для импорта из NX NASTRAN.

- 1) Модуль umfumNX\*\*.alt, включающий операторы и процедуры на языке DMAP, которые записывают данные в промежуточные файлы geoms.op2 и matrix.op4 в формате

DMAP. Файл geoms.op2 содержит конечноэлементную 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**.

Основные этапы создания упругой подсистемы на основе импорта из **NX NASTRAN** и ее анализа в **UM** изображены на рис. 1.34. Файл umfumNX\*\*.alt и **NASTRAN\_UM.EXE** после установки программы **Универсальный механизм** располагаются в каталоге .\bin. Далее опишем подробно подготовку данных.

**Примечание.** **UM 2023** поддерживает импорт данных только из **NX NASTRAN 8.0** и **NX NASTRAN 9.0, NX NASTRAN 12**.

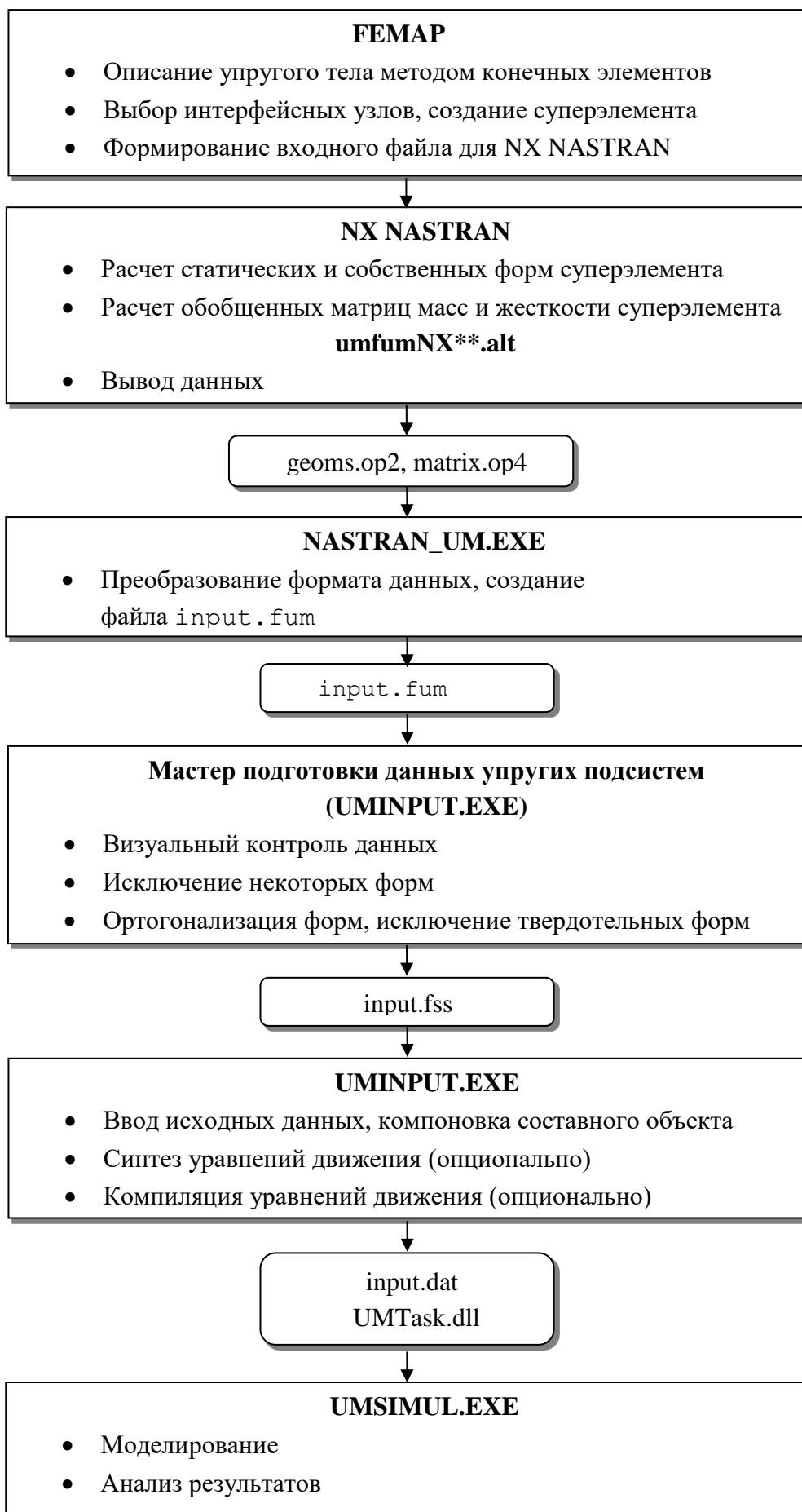


Рис. 1.34. Создание упругой подсистемы с использованием NX NASTRAN/FEMAP

### 1.2.3.3. Подготовка данных в среде NX NASTRAN/FEMAP

#### Основные этапы создания упругой подсистемы

1. Создание конечноэлементной модели исследуемого объекта в программе **FEMAP**. Модель описывается в системе СИ единиц измерения. Конечноэлементная сетка должна содержать узлы в шарнирных точках и точках прикрепления силовых элементов. Некоторые особенности создания конечноэлементной модели описаны в п. 1.2.6. "Особенности подготовки данных в программе МКЭ", с. 1-81.
2. Выбор интерфейсных узлов в соответствии с шарнирными точками и точками крепления силовых элементов в модели **UM** и создание суперэлемента. В **FEMAP** интерфейсные узлы суперэлемента задаются с использованием «закреплений». С помощью команды **Model** → **Constraint** → **Create/Manage Set** создайте новый вариант закреплений с наименованием, например, InterfaceNodes (рис. 1.35). Затем с использованием команды **Model** → **Constraint** → **Nodal** закрепите по всем степеням свободы те узлы, которые будут интерфейсными (рис. 1.36).

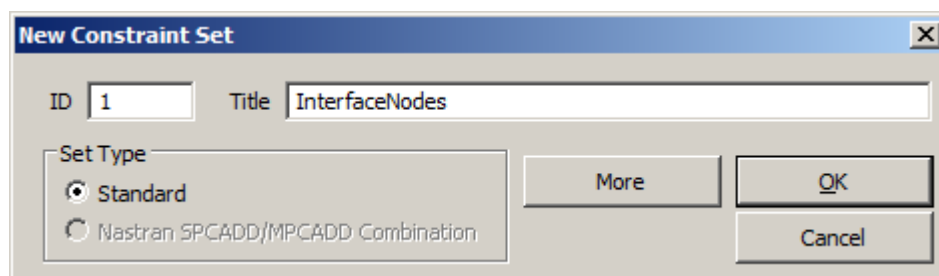


Рис. 1.35. Создание варианта закреплений в программе FEMAP

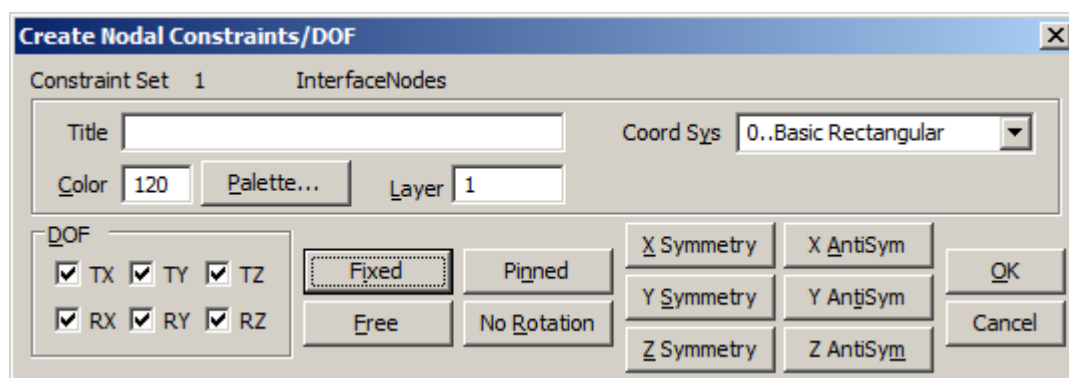


Рис. 1.36. Создание закрепления узлов в программе FEMAP

3. С помощью команды **Model** → **Analysis** создайте новый набор параметров расчёта (рис. 1.37).
  - На первом шаге задания параметров расчёта введите наименование набора параметров расчёта и выберите тип расчёта **2..Normal Modes/Eigenvalue** (рис. 1.38).
  - На следующем шаге (рис. 1.39) объявите выходные файлы geoms.op2 и matrix.op4 по следующему образцу  
 ASSIGN OUTPUT2='geoms.op2' UNIT=13 FORM=UNFORMATTED  
 ASSIGN OUTPUT4='matrix.op4' UNIT=15 FORM=UNFORMATTED

- Подключите модуль `umfurnX**.alt`, добавив строку `(include umfurnX**.alt)` в окно, показанное на рис. 1.40.

Файл `umfurnX**.alt` должен быть помещен в каталог, в котором он будет найден программой **NX NASTRAN**. Например, в каталог, в котором расположен входной файл для программы **NX NASTRAN**.

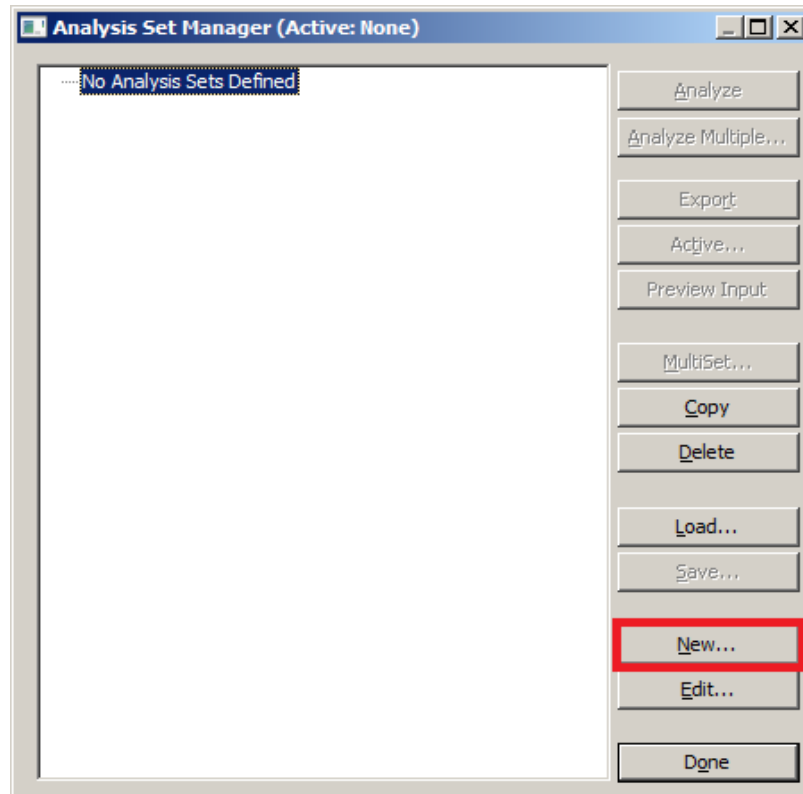


Рис. 1.37. Создание набора параметров расчёта в программе FEMAP

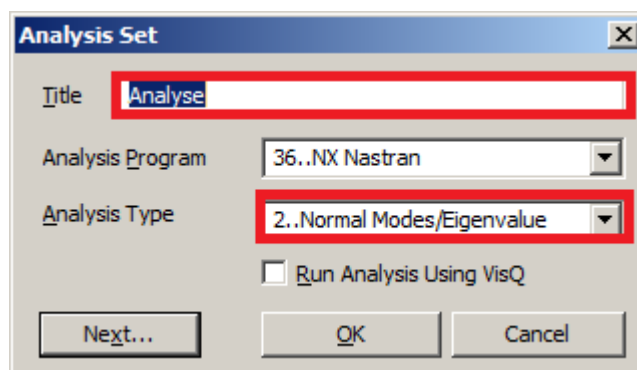


Рис. 1.38. Задание типа расчёта в программе FEMAP

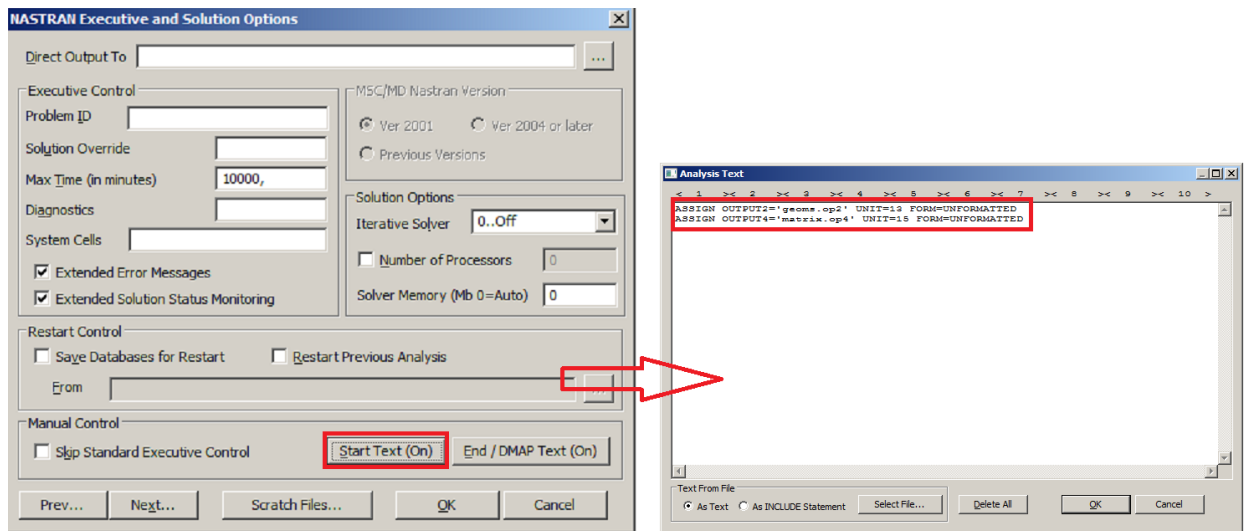


Рис. 1.39. Объявление выходных файлов geoms.op2 и matrix.op4

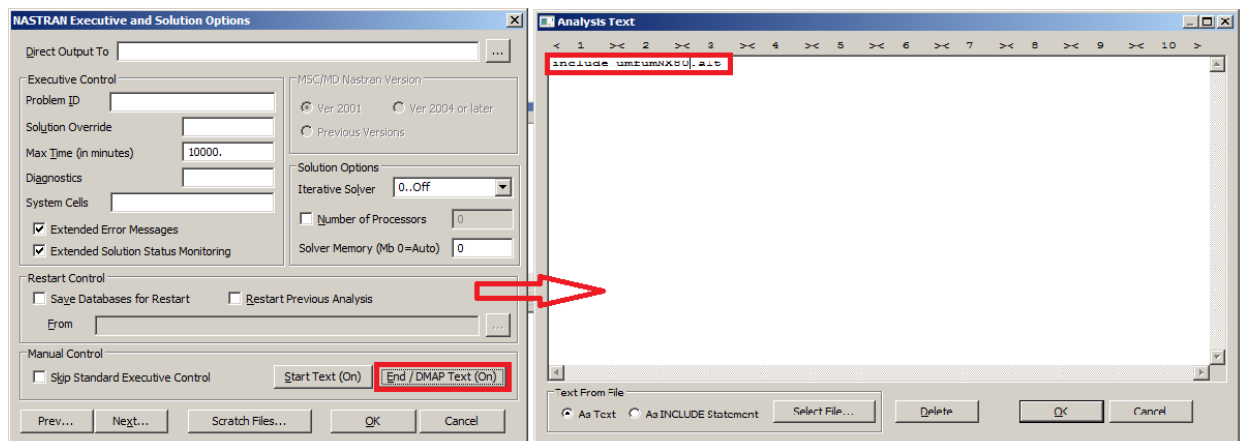


Рис. 1.40. Подключение модуля umfumnx\*\*\*.alt

- В окне, показанном на рис. 1.41 следует задать число требуемых собственных форм. Для этого используется команды, подобные следующим.

SPOINT, 300001, thru, 300030

QSET1, 0, 300001, thru, 300030

В данном примере требуется рассчитать тридцать собственных форм суперэлемента. Как правило, рассчитываются формы, соответствующие низшим собственным частотам.

Оператор SPOINT определяет скалярные параметры, называемые *скалярными точками* в руководстве пользователя NX 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 QSET1 определяет обобщенные координаты.

Более подробную информацию об этих операторах можно получить, воспользовавшись документацией к программе **NX NASTRAN**.

- В окне, показанном на рис. 1.42, введите параметры модального анализа.

В приведенном примере требуется рассчитать методом Ланцоша тридцать собственных форм. Число собственных форм должно соответствовать числу скалярных точек, указанному в п.3.4. командой **SPOINT**. Рассчитанные формы нормализуются относительно матрицы масс (M-норма). Данный метод нормализации должен всегда выбираться при подготовке данных для экспорта в **UM**.

- Перейдите в окно, показанное на рис. 1.43, и первой строкой введите оператор **VECTOR(SORT1,REAL)=ALL**

Этот оператор определяет формат вывода вектора перемещений.

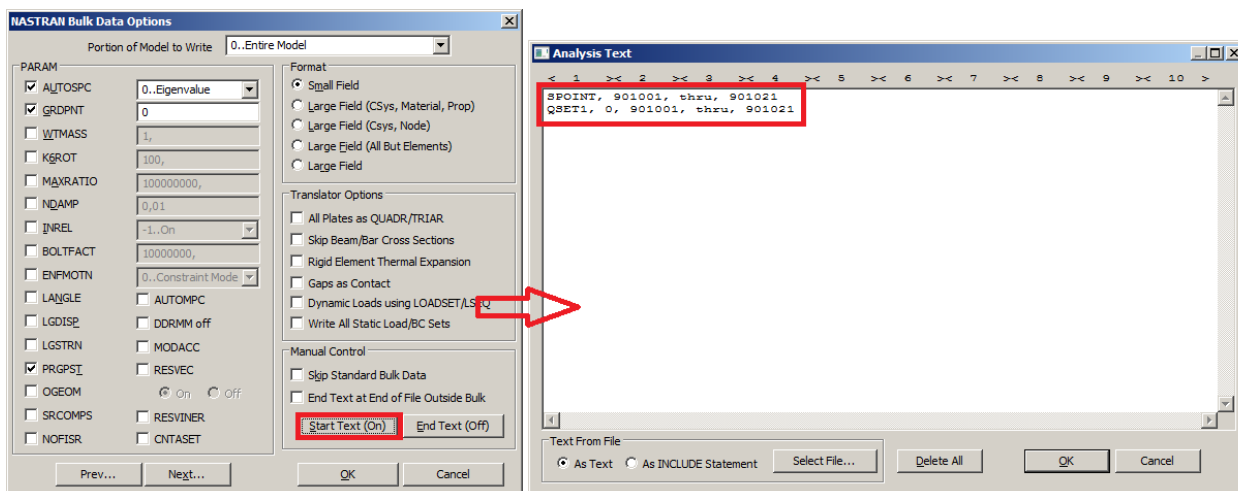


Рис. 1.41. Объявление скалярных точек

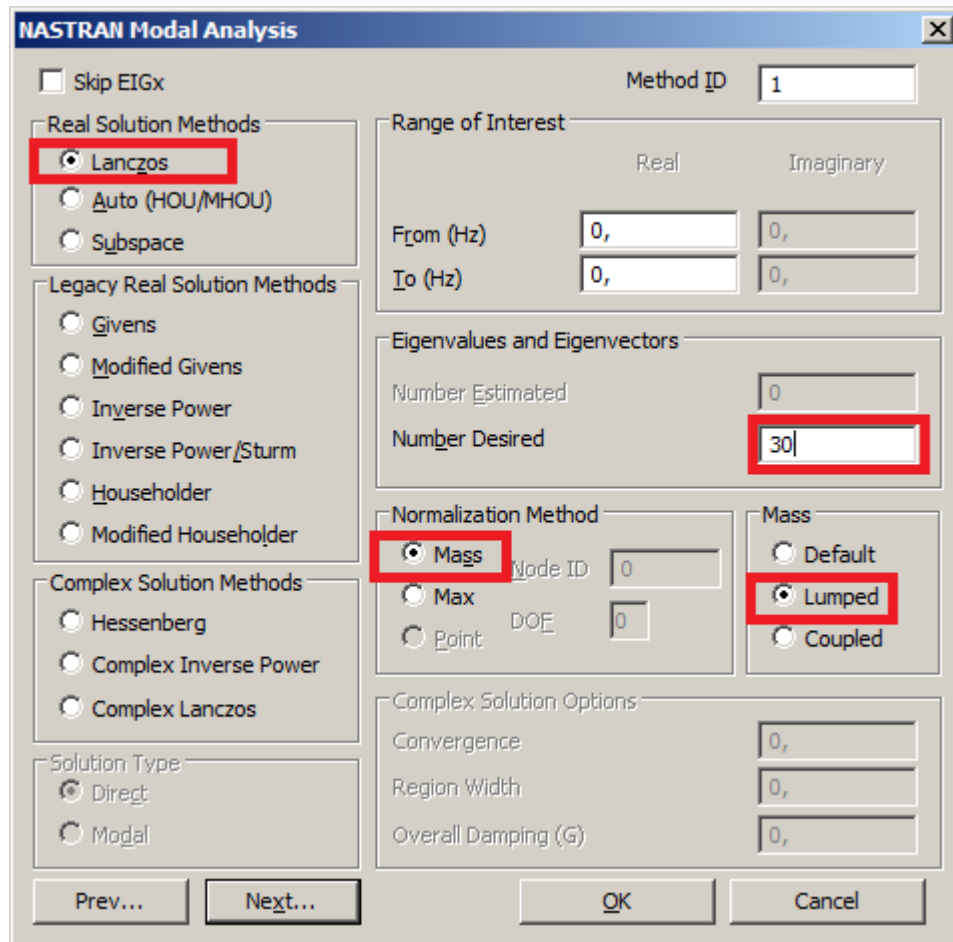


Рис. 1.42. Задание параметров модального анализа

Чтобы создать датчики напряжений (деформаций) нужно в окне, показанном на рис. 1.43, после оператора VECTOR, 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 CQUAD4. 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 УМ, нужно включить все элементы, содержащие этот узел, в состав множества, номер которого является параметром команды STRESS или STRAIN соответственно.

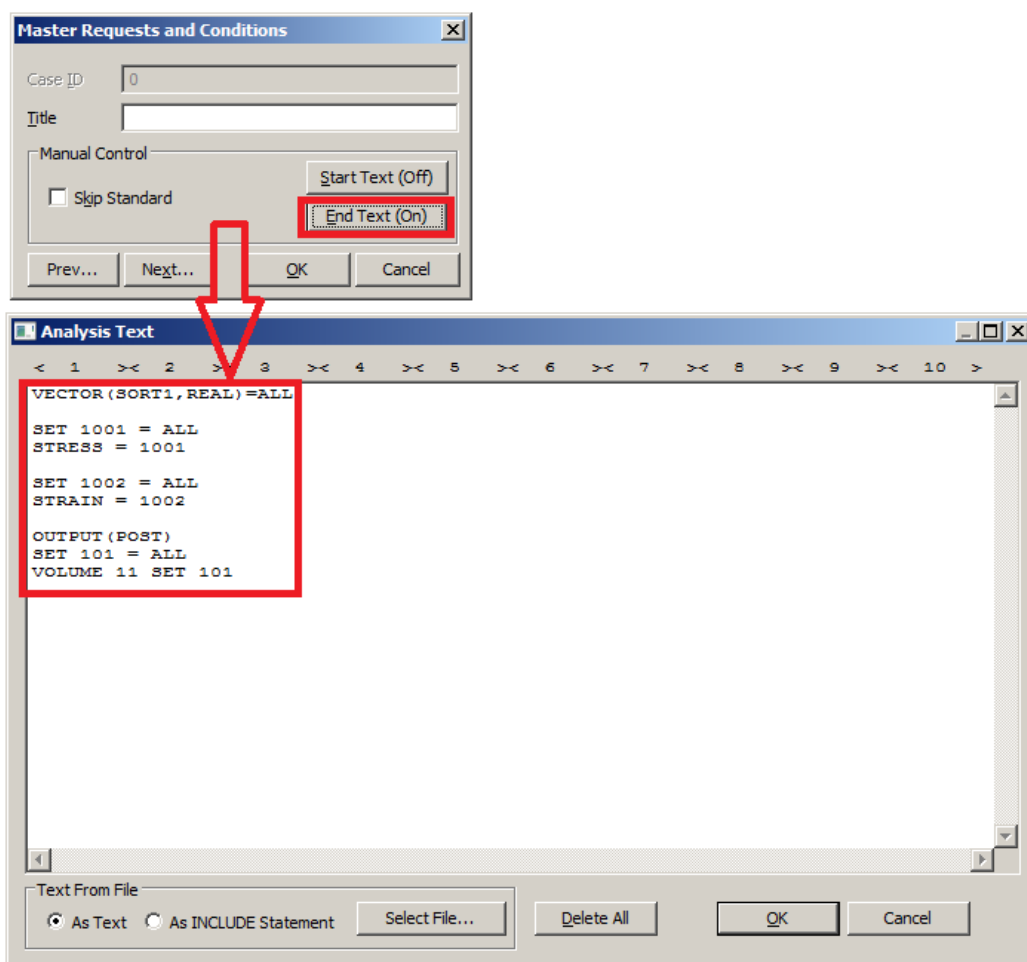


Рис. 1.43. Операторы для создания датчиков напряжений (деформаций)

- Перейдите в окно, изображённое на рис. 1.44. В списке **Constraints** выберите **0..None**, а в списке **Master (ASET)** выберите вариант закреплений, соответствующий интерфейсным узлам суперэлемента (см. п. 2). Завершите задание набора параметров расчёта нажатием кнопки **OK**. При последующих расчетах его следует выбирать в разделе **Analysis** информационно-навигационной панели **Model Info**.

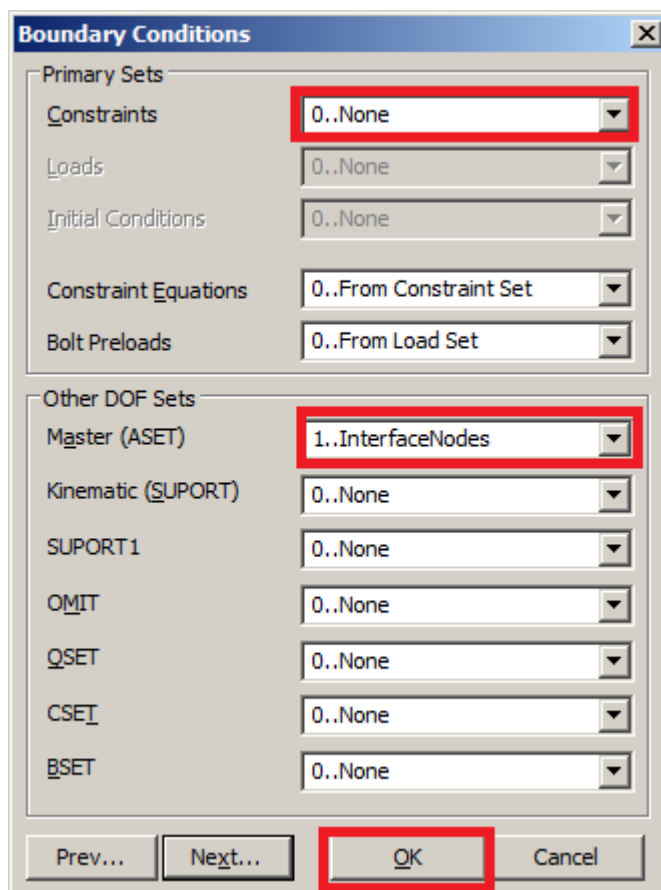


Рис. 1.44. Завершающий этап определения интерфейсных узлов

4. Выберите созданный набор параметров.
5. Запустите расчет модели с созданным набором параметров, нажатием кнопки **Analyze**. 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.

### 1.2.3.4. Обмен данными с программой NX NASTRAN

Запустите программу конвертер **NASTRAN\_UM.EXE** для создания файла `input.fum`. Выберите файл `geoms.op2` в каталоге расчета **NX 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. 1.33). Конечно, эти данные должны быть рассчитаны **NX NASTRAN** с помощью команд, указанных в п. 1.2.3.3. "Подготовка данных в среде **NX NASTRAN/FEMAP**", с. 1-48. (п. 3.7 списка).

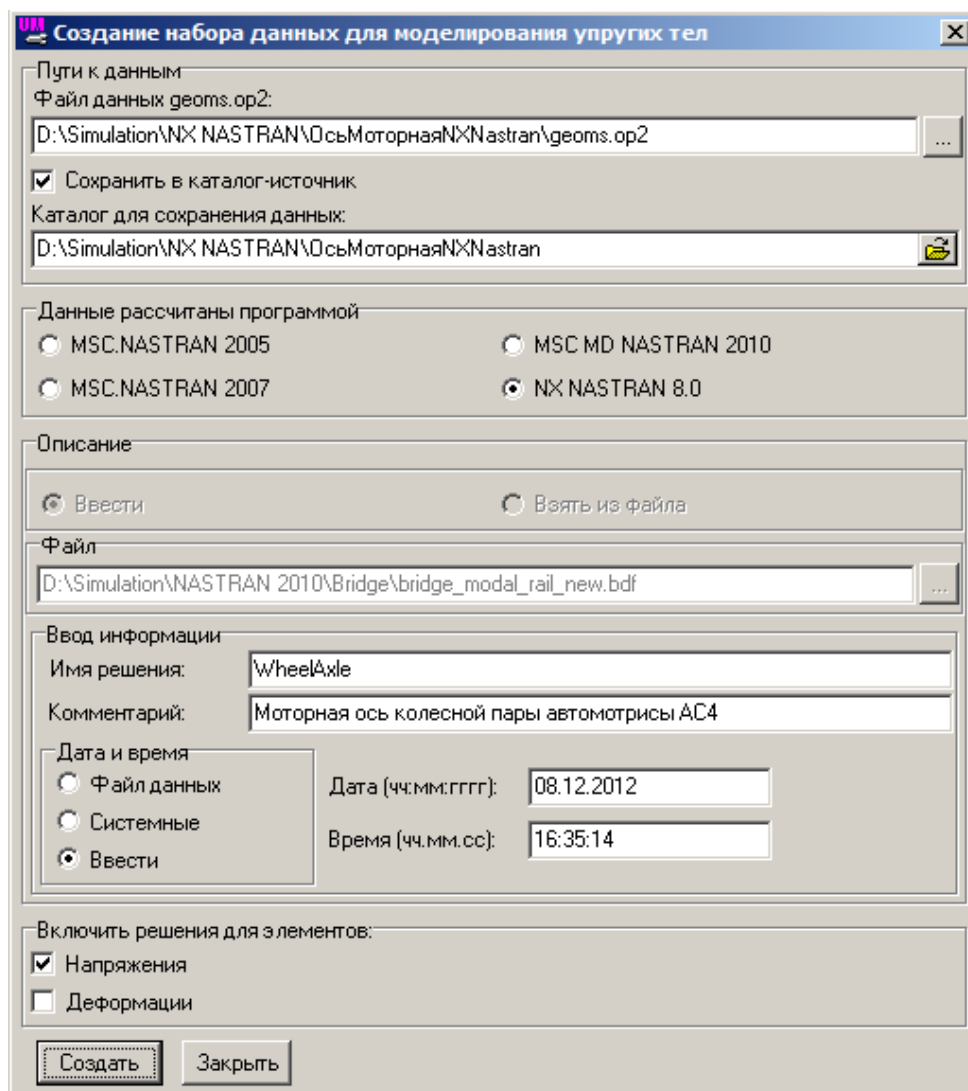


Рис. 1.45. Окно программы NASTRAN\_UM.exe

Имя решения, комментарий и дату расчета можно ввести в соответствующие поля диалогового окна 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 дан-**

**ных.** Дальнейшая работа с этим файлом описана ниже в п. 1.3. "*Мастер упругих подсистем*", с. 1-91.

## 1.2.4. Создание модели в среде ABAQUS и обмен данными

### 1.2.4.1. Общие сведения

На рис. 1.46 представлен полный цикл подготовки исходных данных с использованием программы ABAQUS и анализа модели в UM.

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

Далее опишем правила подготовки исходных данных в ABAQUS, а также состав и последовательность использования программного обеспечения для импорта данных в Универсальный механизм.

Пошаговое описание разработки и анализа модели, включающей импортированную упругую подсистему, приводится в руководстве *«Начинаем работать в программном комплексе «Универсальный механизм»: модуль моделирования упругих тел»*.

### 1.2.4.2. Состав программного обеспечения, схема импорта

Для импорта из ABAQUS ПК UM предоставляет программу-конвертер ABAQUS\_UM.EXE, которая читает файл \*.fil и формирует файл input.fum, то есть, сохраняет данные в формате UM.

Программа-конвертер ABAQUS\_UM.EXE после установки программы Универсальный механизм располагаются в каталоге .\bin. Далее опишем подробно подготовку данных.

**Примечание.** UM 2023 поддерживает импорт данных только из ABAQUS 6.12-1. При этом импорт данных о деформациях и напряжениях из программы ABAQUS 6.12-1 пока не поддерживается.

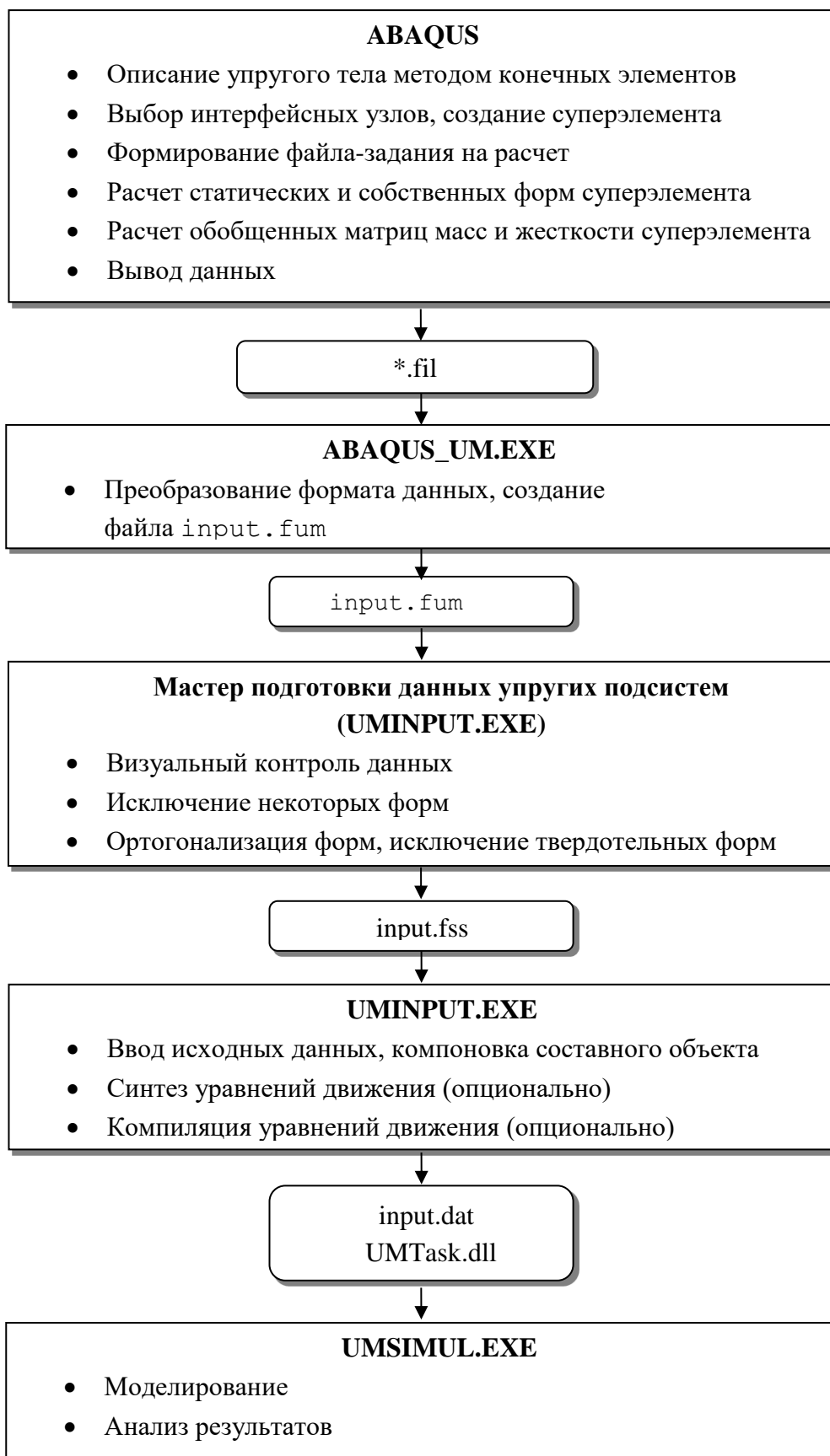


Рис. 1.46. Создание упругой подсистемы с использованием ABAQUS

### 1.2.4.3. Подготовка данных в среде ABAQUS

#### Основные этапы создания упругой подсистемы

- 2) Создание конечноэлементной модели исследуемого объекта в программе **ABAQUS**. Модель описывается в системе СИ единиц измерения. Конечноэлементная сетка должна содержать узлы в шарнирных точках и точках прикрепления силовых элементов. Некоторые особенности создания конечноэлементной модели описаны в п. 1.2.6. "Особенности подготовки данных в программе МКЭ", с. 1-81.
- 3) Для создания в программе **ABAQUS** шага расчета собственных частот перейдите к модулю **STEP** (рис. 1.47).

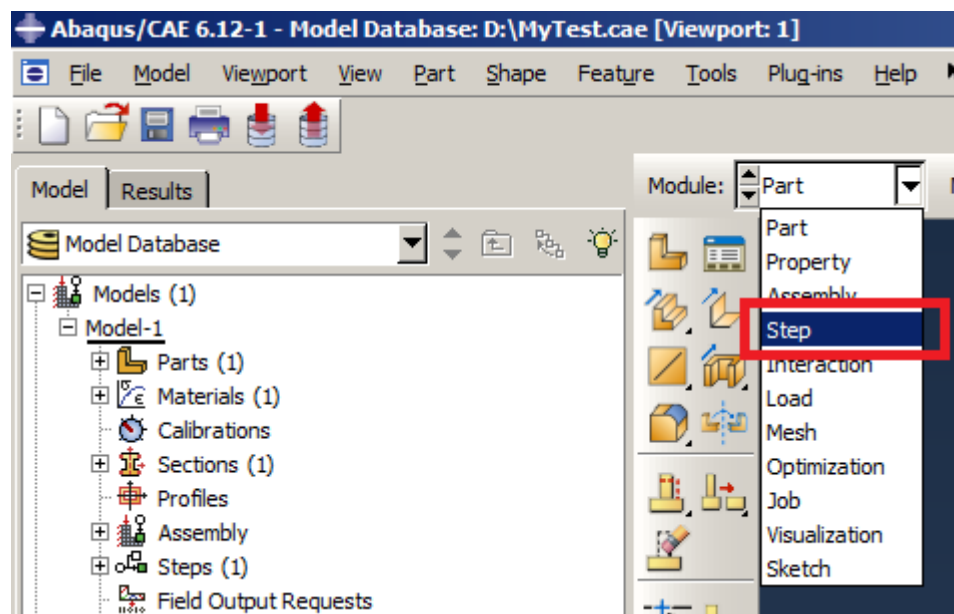




Рис. 1.47. Переход к модулю **STEP** в программе **ABAQUS**

С помощью кнопки **Create Step**  (либо двойного щелчка мыши по элементу  **Steps (1)** дерева модели, либо с помощью команды меню **Step** → **Create**), создайте новый шаг расчёта. В результате должно появиться окно **Create Step** (рис. 1.48), в котором уже указан начальный шаг расчета Initial. Задайте в этом окне наименование шага расчета Frequency, в выпадающем списке **Procedure type** выберите **Linear perturbation**, а шаг расчета выберите **Frequency**.

Нажав кнопку **Continue**, перейдите в окно параметров шага расчета **Edit Step** (рис. 1.49). В окне **Edit Step** на закладке **Basic** в графе **Description** укажите наименование решаемой задачи - Frequency и задайте количество собственных частот. На закладке **Other** окна **Edit Step** (рис. 1.50) выберите значение параметра **Normalize eigenvectors by** равное **Mass**. Завершите задание параметров расчета собственных частот нажатием кнопки **OK**.

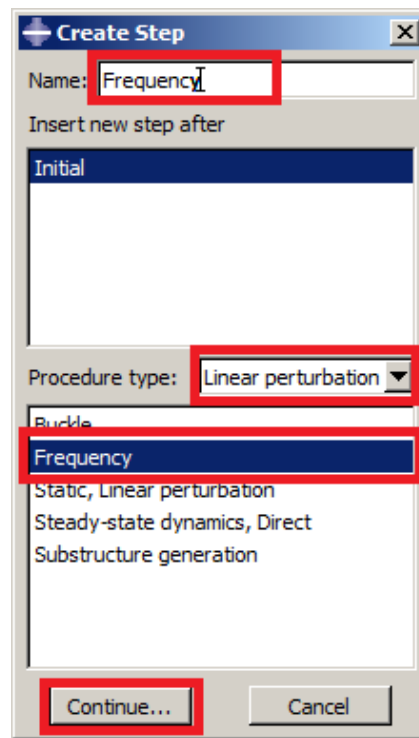


Рис. 1.48. Создание шага расчета Frequency

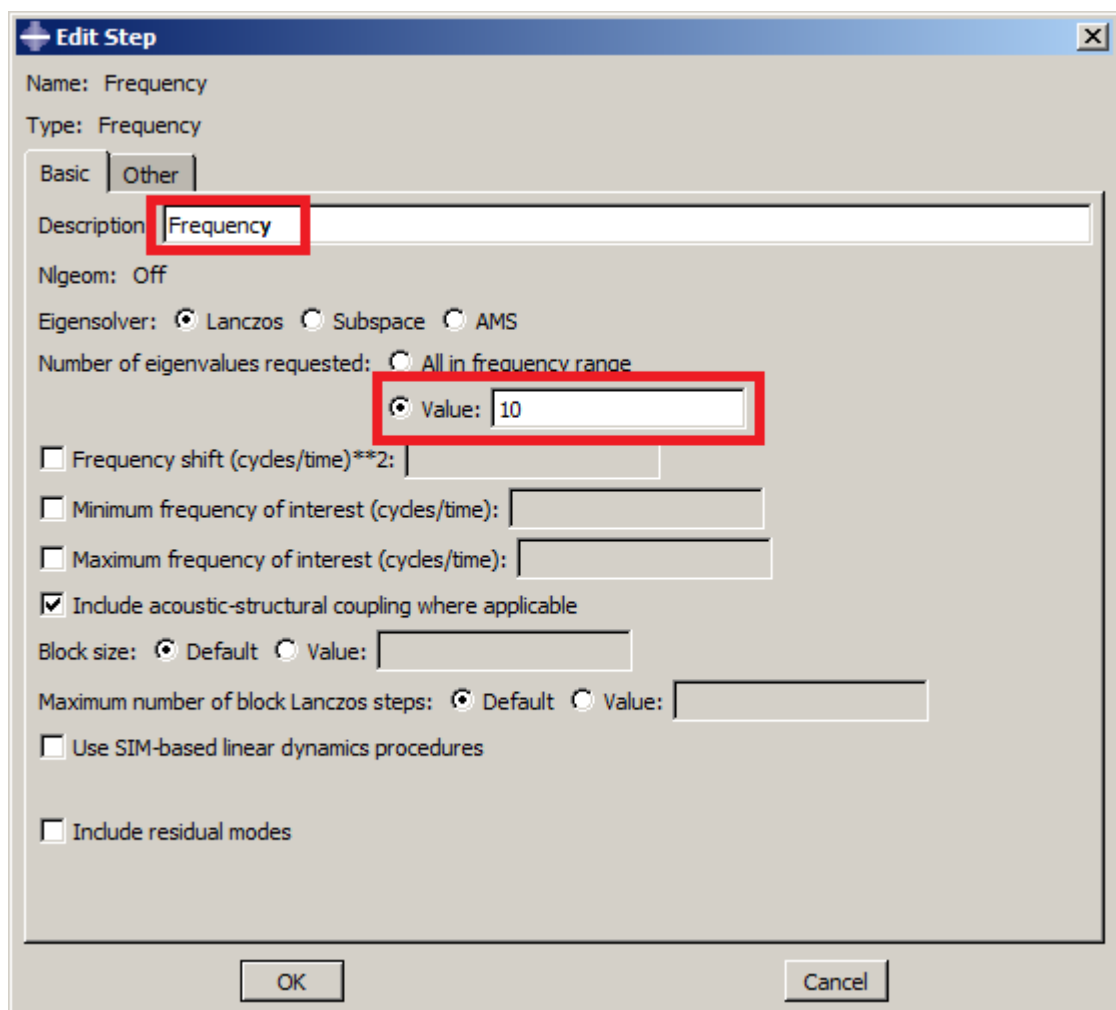


Рис. 1.49. Задание параметров расчета собственных частот

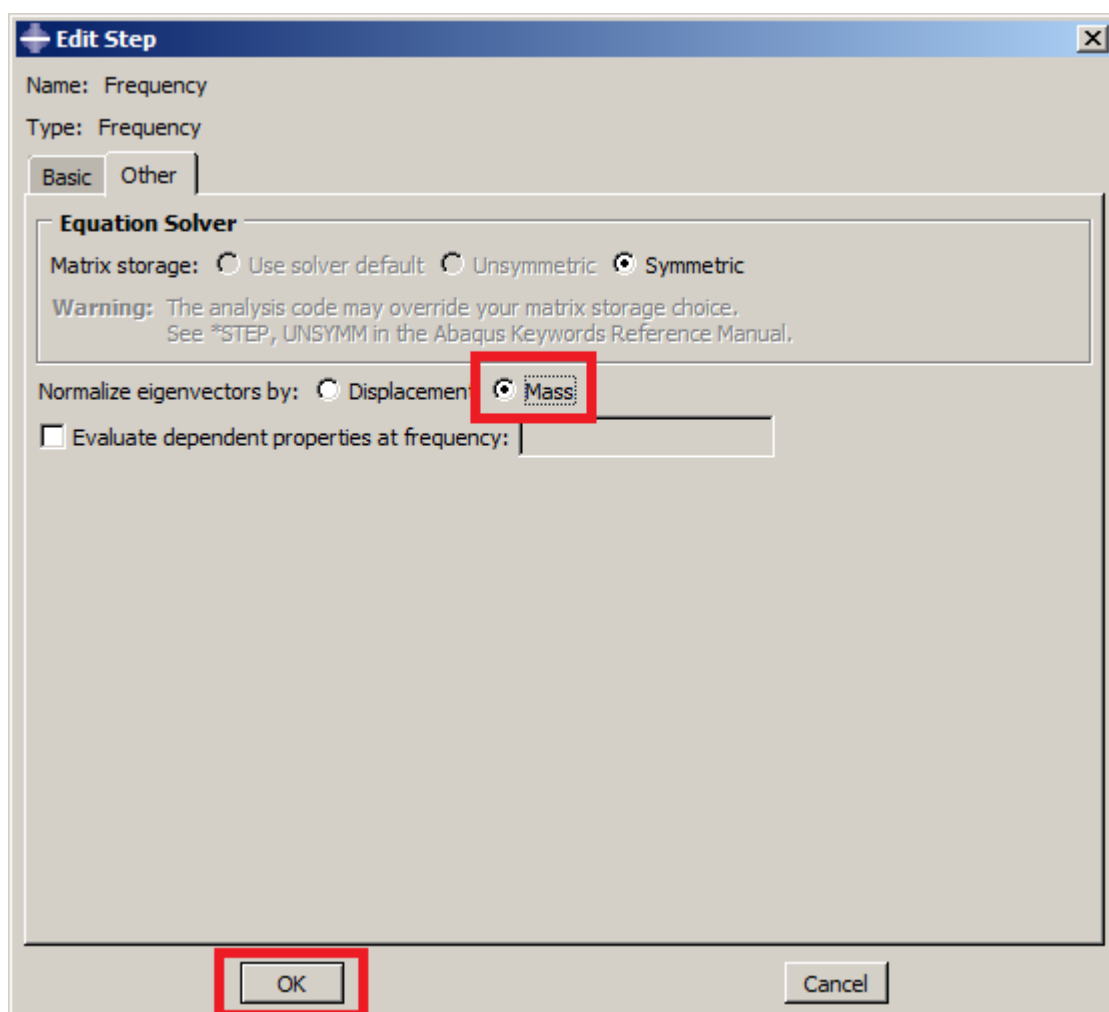


Рис. 1.50. Задание параметров расчета собственных частот (продолжение)

Далее необходимо в интерфейсных узлах задать граничные условия для шага расчета Frequency. Для этого в дереве модели в разделе созданного шага расчета Frequency необходимо дважды щелкнуть на пункт **BCs** (рис. 1.51).

В появившемся окне **Create Boundary Condition** необходимо выбрать категорию граничных условий **Mechanical**, тип граничных условий **Displacement/Rotation** и нажать кнопку **Continue** (рис. 1.52). Далее необходимо либо выбрать интерфейсные узлы мышью в графическом окне, либо воспользоваться заранее сформированным набором узлов **Set**. После этого нажать кнопку **Done** в нижней части графического окна (рис. 1.53).

В появившемся окне **Edit Boundary Condition** выбрать закрепляемые степени свободы (рис. 1.54).

**Примечание.** Закрепляемые степени свободы в окне **Edit Boundary Condition** должны быть допустимыми для используемых в модели типов конечных элементов.

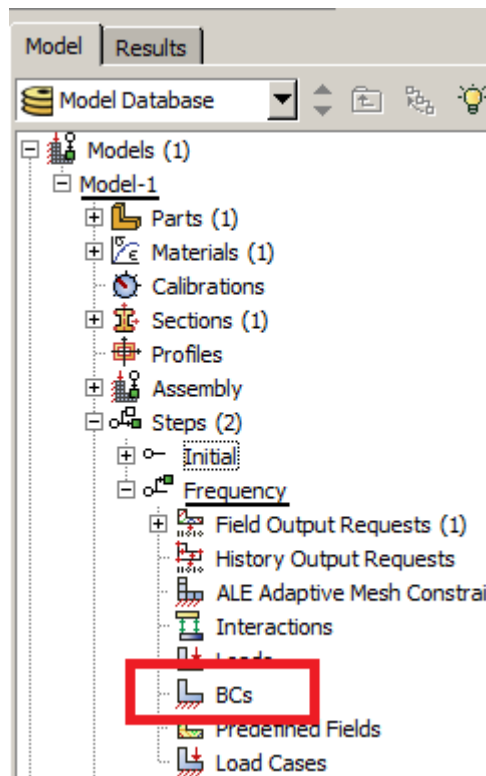


Рис. 1.51. Задание граничных условий для шага расчета Frequency

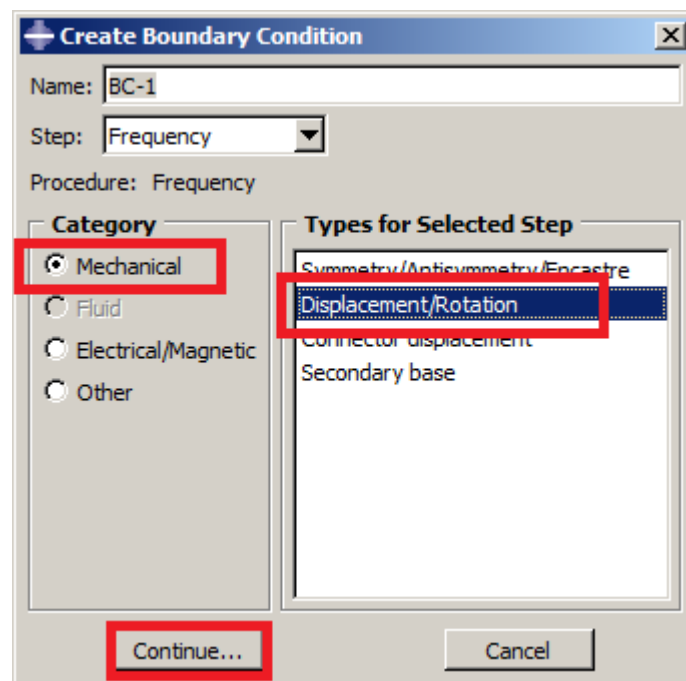


Рис. 1.52. Задание граничных условий для шага расчета Frequency (продолжение)

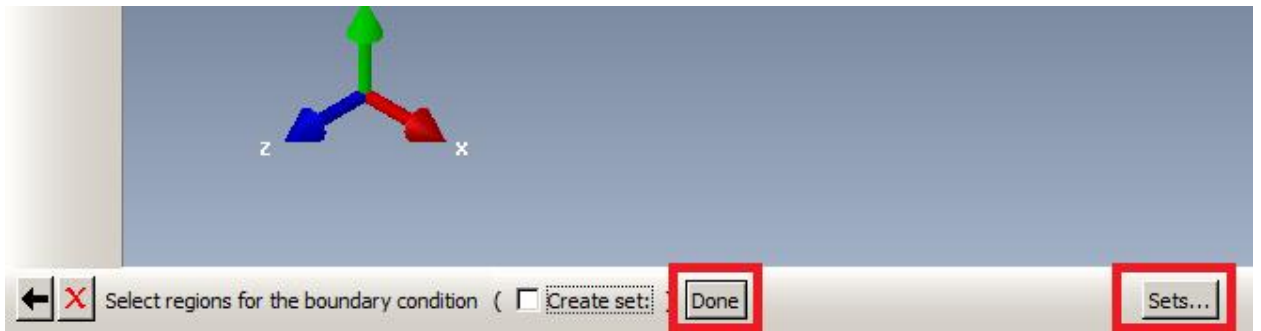


Рис. 1.53. Задание граничных условий для шага расчета Frequency (продолжение)

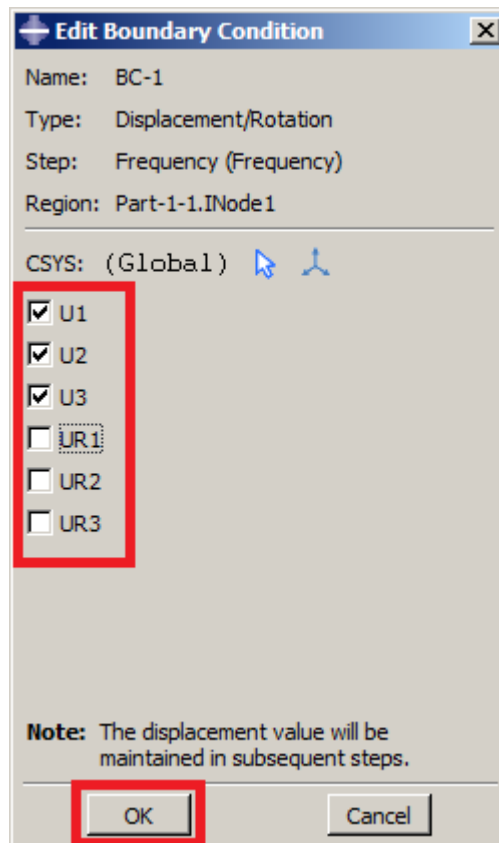




Рис. 1.54. Задание граничных условий для шага расчета Frequency (продолжение)

- 4) Для создания шага расчета - генерация суперэлемента снова нажмите кнопку **Create**

**Step**  (либо используйте двойной щелчок мыши по элементу  Steps (1) дерева модели, либо команду меню **Step** → **Create**).

В появившемся окне **Create Step** (рис. 1.55) введите наименование шага расчета **Substructure generation**, в выпадающем списке **Procedure type** выберите **Linear perturbation**, укажите шаг расчета **Substructure generation** и нажмите кнопку **Continue**.

В окне **Edit Step** на закладке **Basic** (рис. 1.56) в графе **Description** укажите наименование решаемой задачи - **Substructure generation**, а в графе **Substructure identifier** необходимо ввести произвольное число, например 1. Это означает, что создаваемый суперэлемент будет иметь идентификатор Z1. Флаг **Evaluate recovery matrix** установить в положение **Истина** и активировать поле **Whole model**.

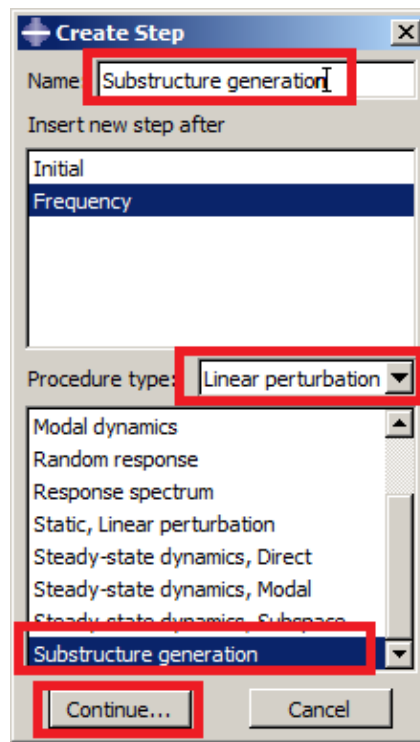


Рис. 1.55. Создание шага расчета Substructure generation

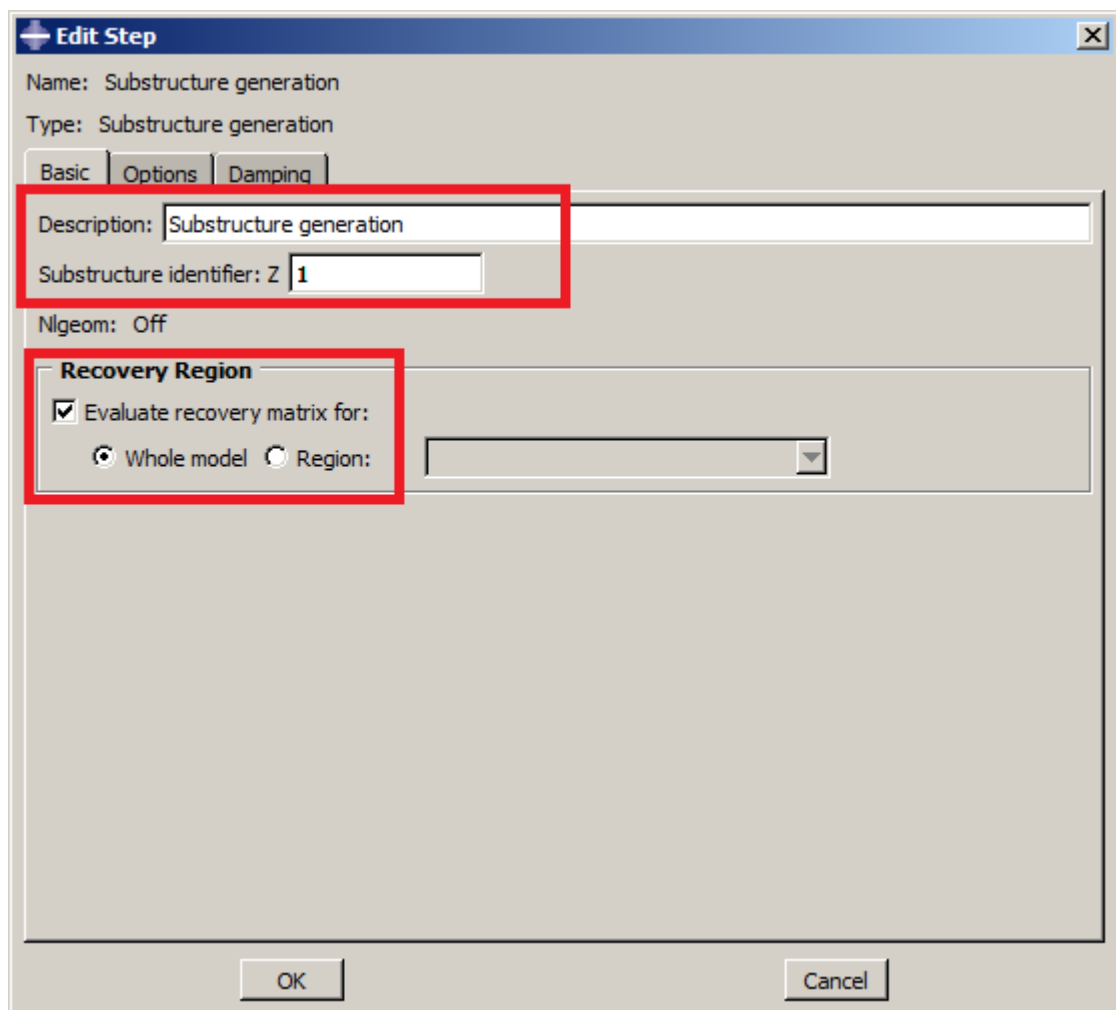


Рис. 1.56. Задание параметров расчета суперэлемента

На закладке **Options** окна **Edit Step** (рис. 1.57) установите флаг **Compute reduced mass matrix**, установите флаг **Specify retained eigenmodes by** и выберите **Mode range**. Затем укажите используемые при построении суперэлемента собственные формы. В данном случае на рисунке, например, показано, что используются собственные формы с 1 по 10 с шагом 1.

На закладке **Damping** окна **Edit Step** ничего указывать не нужно, нажмите кнопку **OK**.

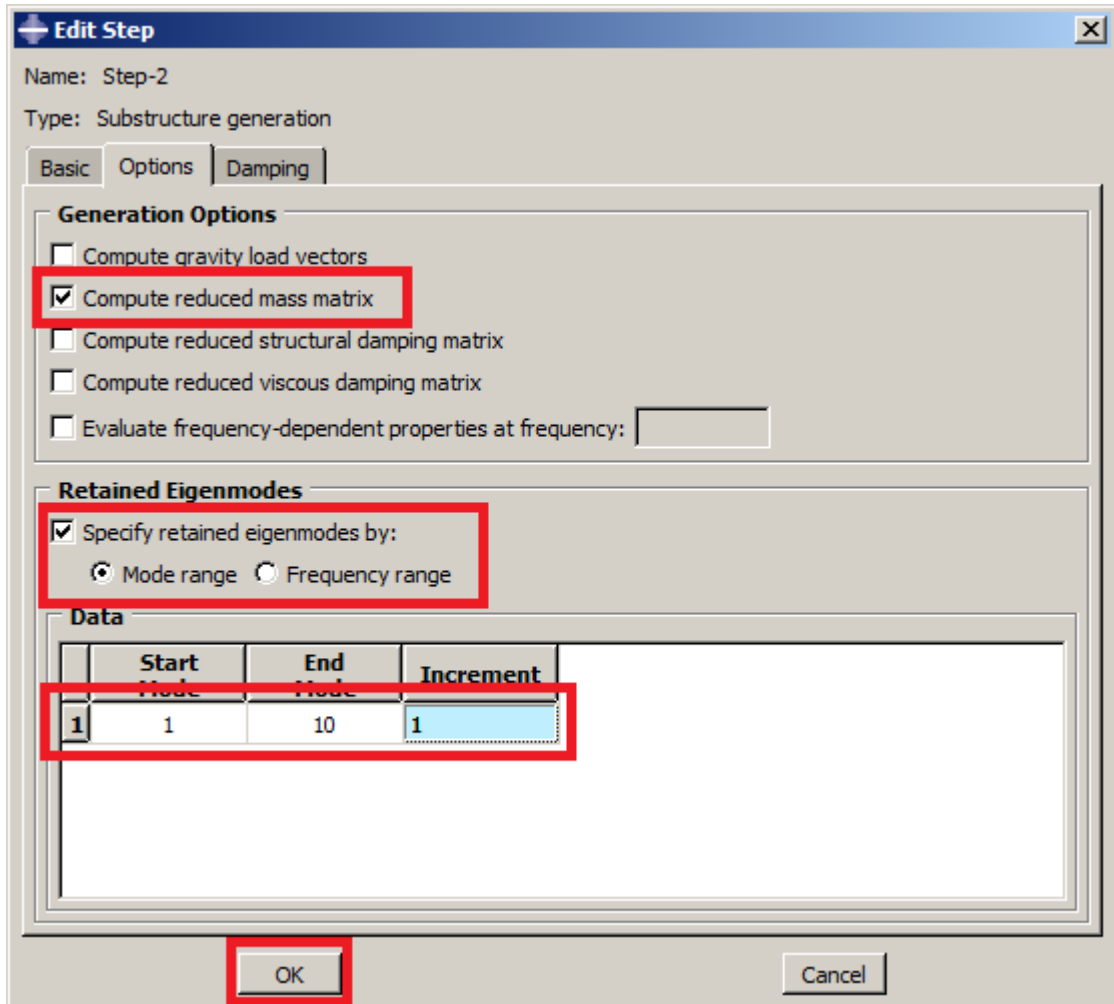


Рис. 1.57. Задание параметров расчета суперэлемента (продолжение)

Далее необходимо в интерфейсных узлах задать граничные условия для шага расчета **Substructure generation**. Для этого в дереве модели в разделе созданного шага расчета **Substructure generation** необходимо дважды щелкнуть на пункт **BCs** (рис. 1.58).

В появившемся окне **Create Boundary Condition** необходимо выбрать категорию граничных условий **Mechanical**, тип граничных условий **Retained nodal dofs** и нажать кнопку **Continue** (рис. 1.59). Далее необходимо либо выбрать интерфейсные узлы мышью в графическом окне, либо воспользоваться заранее сформированным набором узлов **Set**. После этого нажать кнопку **Done** в нижней части графического окна (рис. 1.60).

В появившемся окне **Edit Boundary Condition** выбрать закрепляемые степени свободы (рис. 1.61).

**Примечание.** Закрепляемые степени свободы в окне **Edit Boundary Condition** должны быть допустимыми для используемых в модели типов конечных элементов.

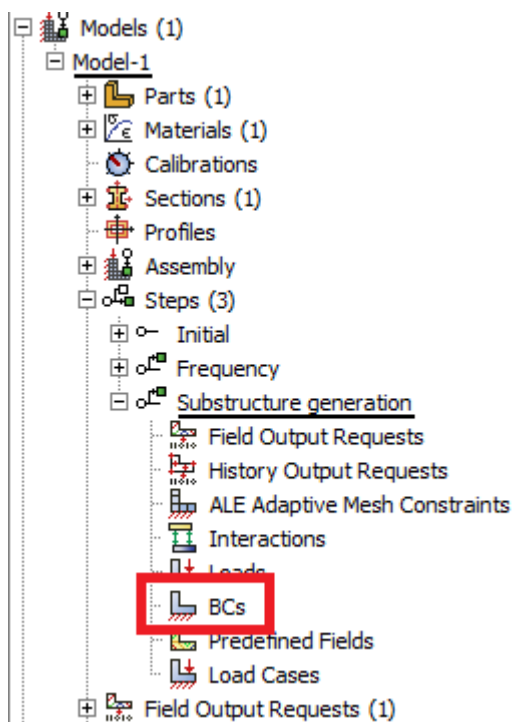


Рис. 1.58. Задание граничных условий для шага расчета Substructure generation

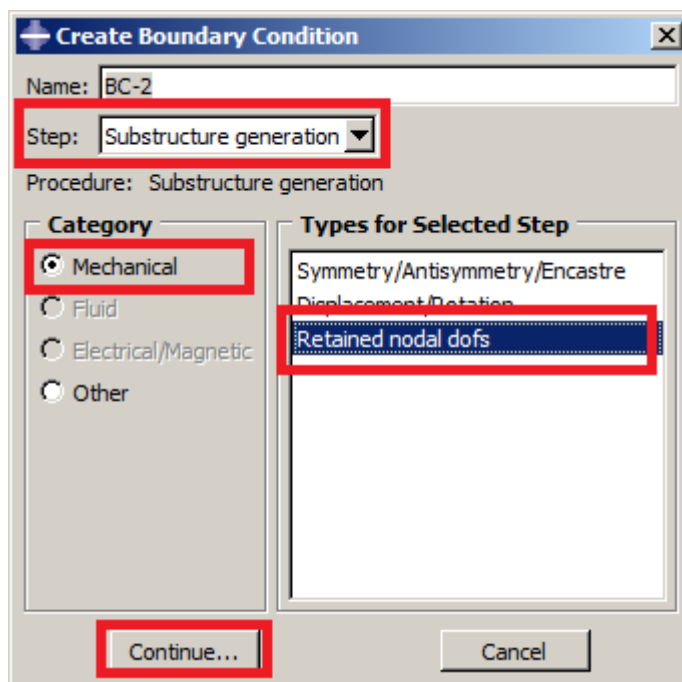


Рис. 1.59. Задание граничных условий для шага расчета Substructure generation (продолжение)

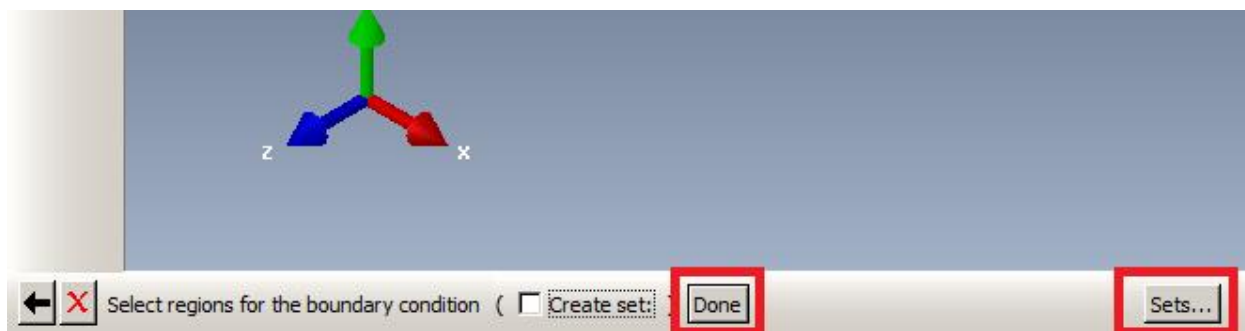


Рис. 1.60. Задание граничных условий для шага расчета Substructure generation (продолжение)

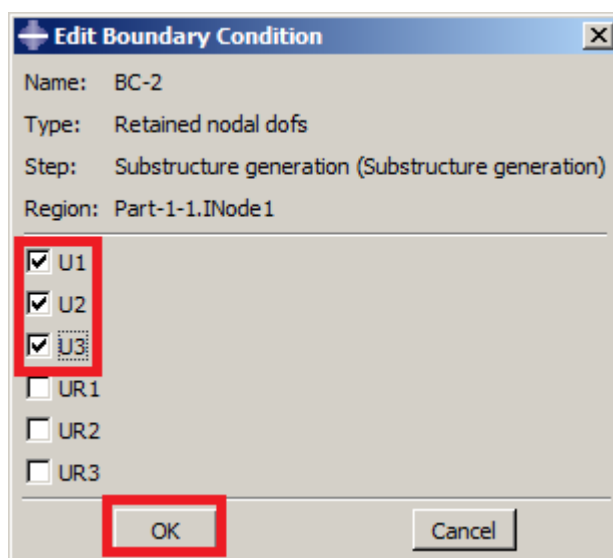


Рис. 1.61. Задание граничных условий для шага расчета Substructure generation (продолжение)

- 5) Для создания проекта анализа в дереве проекта необходимо дважды щелкнуть на пункт **Job** (рис. 1.62) или нажать на него правой кнопкой мыши и выбрать **Create Job**. В появившемся окне **Create Job** (рис. 1.63) нажмите кнопку **Continue**.

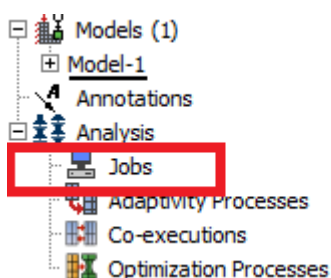


Рис. 1.62. Создание проекта анализа

Появится редактор задания (рис. 1.64), чтобы согласиться со значениями параметров по умолчанию нажмите кнопку **OK**.

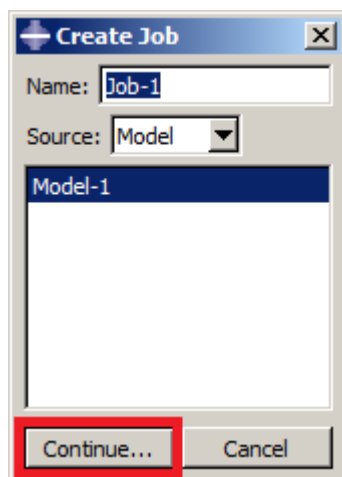


Рис. 1.63. Окно создания задания для расчета

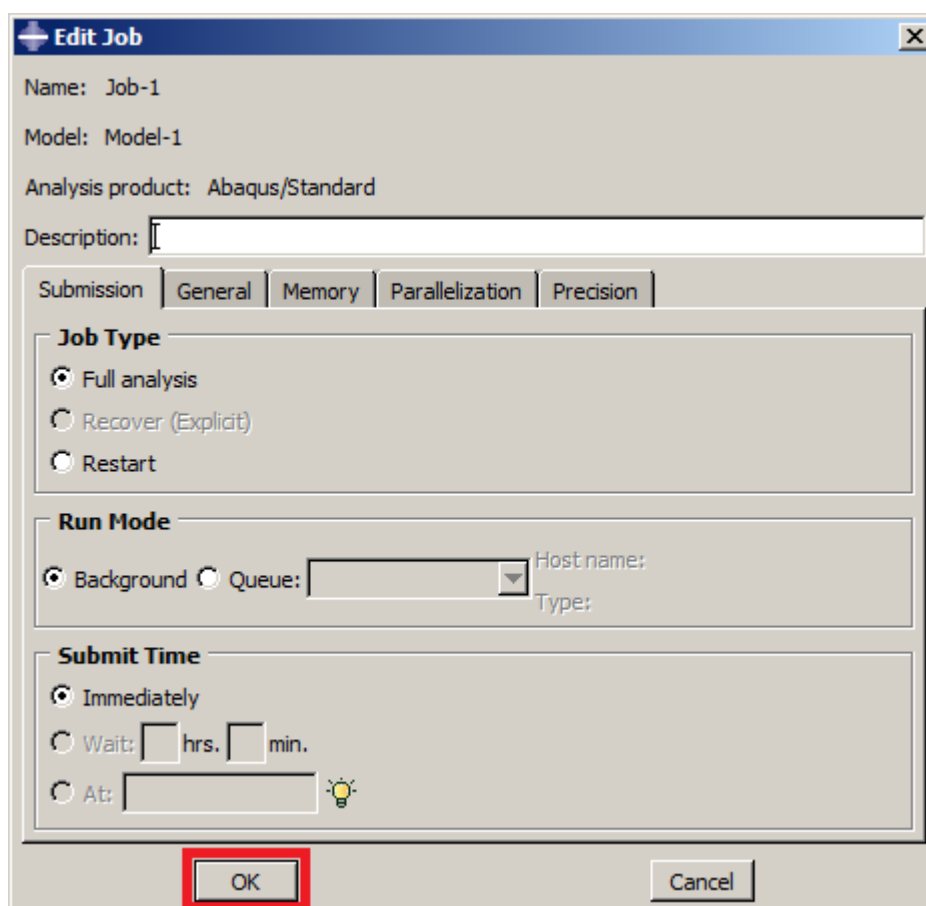


Рис. 1.64. Окно редактора задания

Нажмите правую кнопку мыши по контейнеру **Job** в дереве модели и выберите пункт контекстного меню **Manager** (рис. 1.65).

В появившемся окне **Job Manager** нажмите кнопку **Write Input** (рис. 1.66). При этом в рабочем каталоге программы **ABAQUS** будет создан файл с названием проекта для анализа (в нашем примере это Job-1) и расширением **inp**. Изменить текущий рабочий каталог программы **ABAQUS** можно с помощью команды меню **File** → **Set Work Directory** (рис. 1.67).

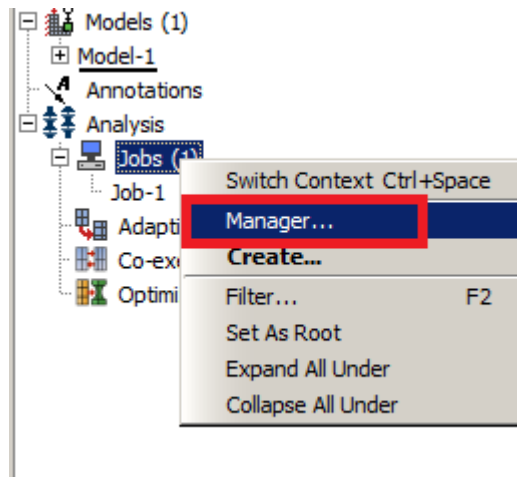


Рис. 1.65. Запуск менеджера заданий

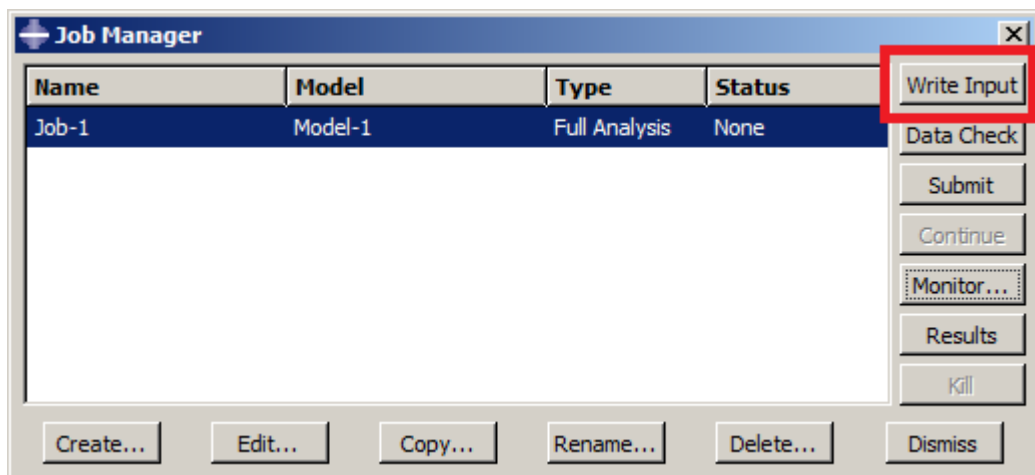


Рис. 1.66. Окно менеджера заданий

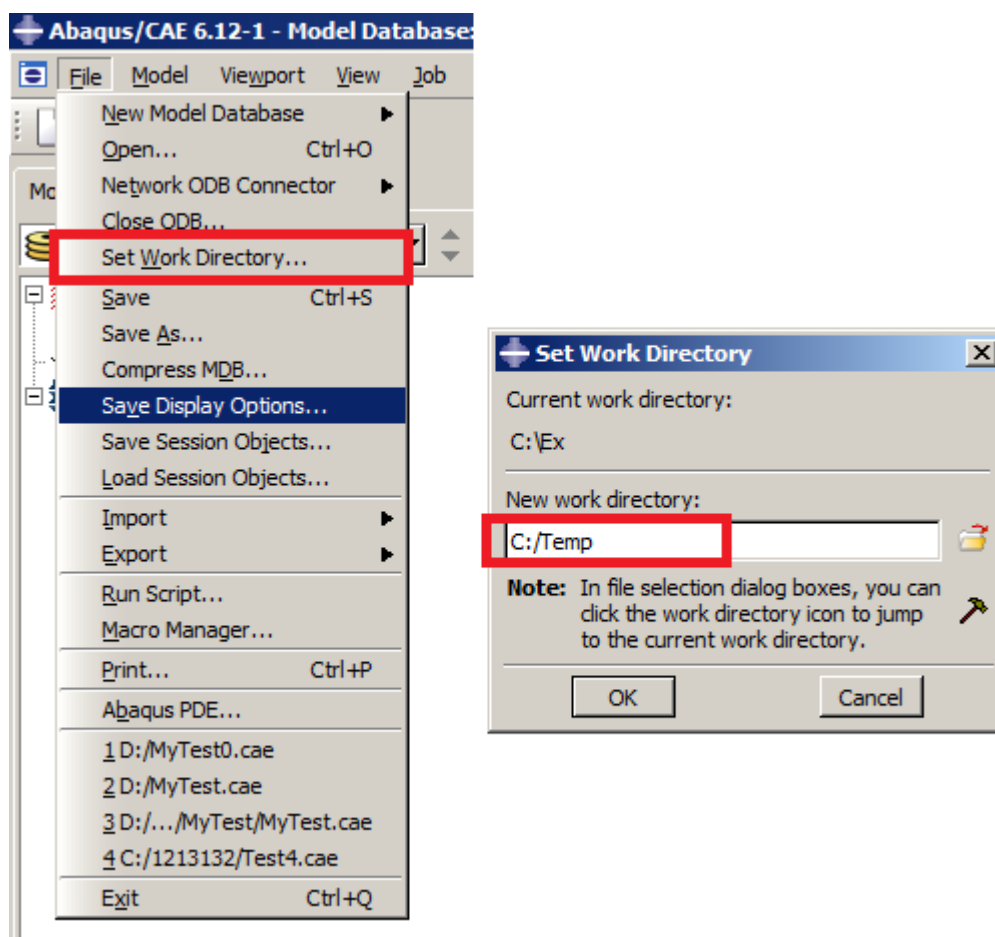


Рис. 1.67. Изменение текущего рабочего каталога программы **ABAQUS**

Далее необходимо изменить созданный файл \*.inp, открыв его в текстовом редакторе.

Для вывода собственных форм, узлов и элементов в этапе описания параметров расчета собственных частот Frequency перед последней строкой \*END STEP нужно ввести команды вывода матриц в выходной файл \*.fil.

```

** STEP: Frequency
...
...
...
*ELEMENT MATRIX OUTPUT, MASS=YES, ELSET=Part-1-1__PickedSet2
*NODE FILE
U
*END STEP

```

В конце файла, перед последней строкой (\*End Step) –нужно ввести команды вывода матриц масс и жесткости в выходной файл \*.fil. Последние строки в файле Job-1.inp должны выглядеть так:

```

** STEP: Superelement
...
...
...

```

```
*SUBSTRUCTURE MATRIX OUTPUT, STIFFNESS=YES, MAS=YES,  
RECOVERY=YES  
*END STEP
```

**Примечание.** Параметр ELSET принимает значение, соответствующее имени набора, включающего все КЭ модели (в примере выше Part-1-1\_\_PickedSet2). Имя выборки, включающей все конечные элементы в файле Job-1.inp. уже присутствует, т.к. программа создает его и использует, например, при генерации конечных элементов. Ниже приведены строки из файла Job-1.inp., задающие набор всех созданных КЭ модели от 1 до 60 с шагом 1, имя этого набора Part-1-1\_\_PickedSet2.

```
*Elset, elset=Part-1-1__PickedSet2, generate  
1, 60, 1
```

Поэтому в командах вывода матриц в выходной файл замените значение параметра ELSET на то, которое используется в Вашем файле \*.inp при генерации конечных элементов.

После всех внесенных изменений сохраните файл \*.inp.

Для запуска файла-задания \*.inp на расчет в менеджере заданий нажмите кнопку **Create**, в появившемся диалоговом окне **Create Job** выберите файл \*.inp и нажмите кнопку **Continue** (рис. 1.68). Появится редактор задания (рис. 1.64). Нажмите **OK**, чтобы принять все установки по умолчанию.

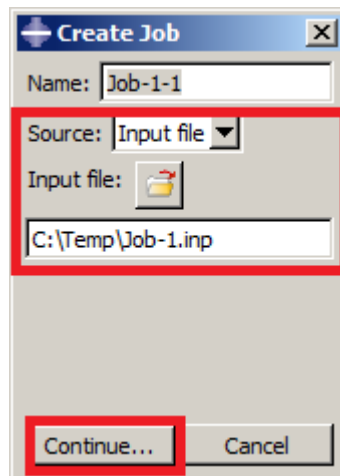


Рис. 1.68. Окно создания задания для расчета

Сделайте активным проект, основанный на изменённом в текстовом редакторе файле \*.inp и запустите задание на расчет, нажав в менеджере заданий кнопку **Submit** (рис. 1.69). **Abaqus** в процессе работы позволяет производить мониторинг при проведении расчета. Для этого необходимо нажать кнопку **Monitor** в окне менеджера заданий. В открывшемся диалоговом окне мониторинга на закладках **Errors** и **Warnings** имеется возможность просмотреть критические ошибки и предупреждения, которые могут возникнуть при выполнении расчета.

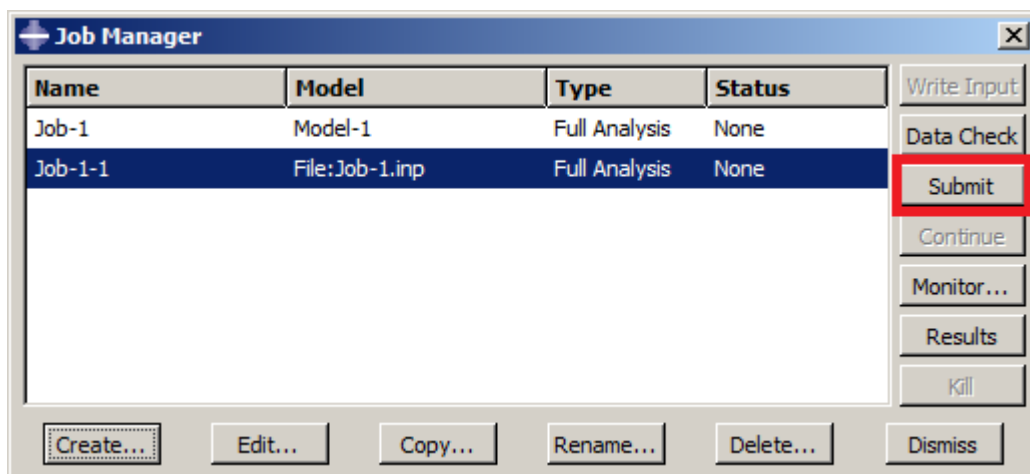


Рис. 1.69. Запуск задания на расчет

При успешном завершении расчета в рабочем каталоге будет создан файл \*.fil, содержащий данные для импорта в ПК УМ.

#### 1.2.4.4. Обмен данными с программой ABAQUS

Запустите программу конвертер **ABAQUS\_UM.EXE** для создания файла input.fum. Выберите файл \*.fil в соответствующем каталоге и укажите каталог сохранения файла input.fum. Назначение всех полей понятно по их названиям.

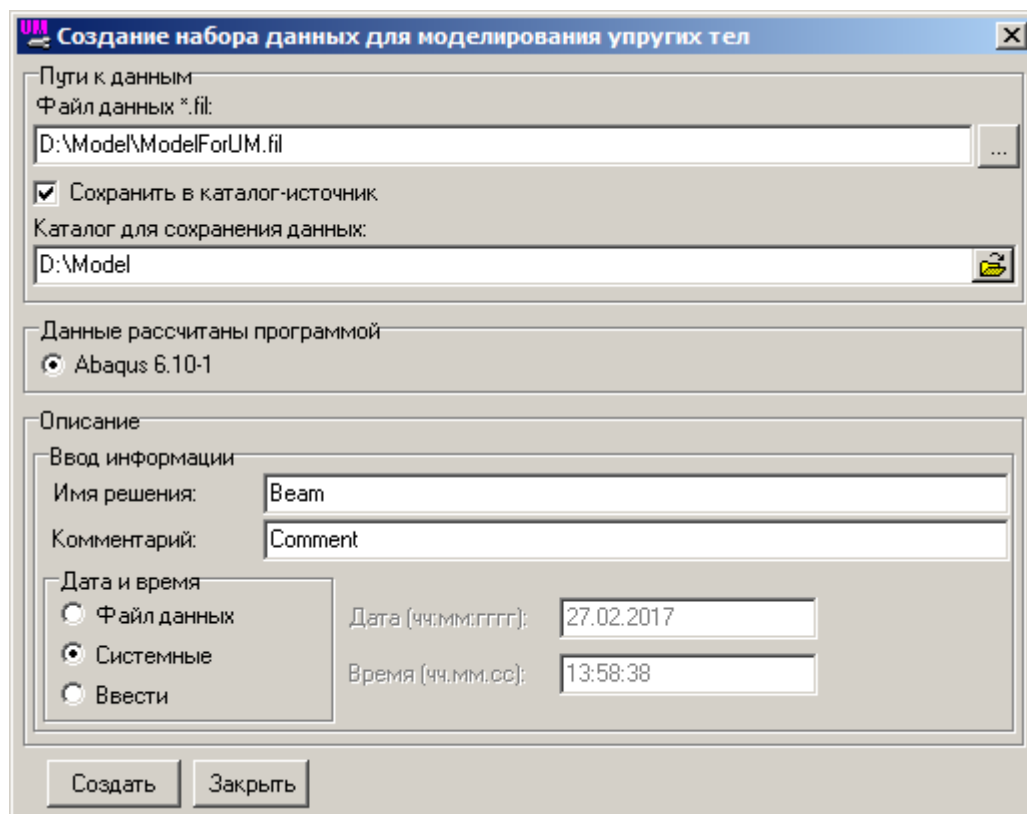


Рис. 1.70. Окно программы ABAQUS\_UM.exe

В соответствующие поля диалогового окна имеется возможность задать имя решения, комментарий и дату расчета. 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. 1.3. "Мастер упругих подсистем", с. 1-91.

## 1.2.5. Создание модели в среде FIDESIS и обмен данными

### 1.2.5.1. Общие сведения

На Рис. 1.71 представлен полный цикл подготовки исходных данных с использованием программы **FIDESYS** и анализа модели в **UM**.

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 в **FIDESYS**, а также состав и последовательность использования программного обеспечения для импорта данных в Универсальный механизм.

Пошаговое описание разработки и анализа модели, включающей импортированную упругую подсистему, приводится в руководстве «Начинаем работать в программном комплексе «Универсальный механизм»: модуль моделирования упругих тел».

#### 1.2.5.1.1. Состав программного обеспечения, схема импорта из ПК FIDESYS

ПК **UM** предоставляет программу-конвертер **FIDESYS\_UM.EXE**, которая читает файлы **geometry.vtk**, **res.cbm**, **M\_CCS.hb**, **K\_CCS.hb** и формирует файл **input.fum**, то есть, сохраняет данные в формате **UM**.

Программа-конвертер **FIDESYS\_UM.EXE** после установки программы Универсальный механизм располагается в каталоге `.\bin`. Далее опишем подробно подготовку данных.

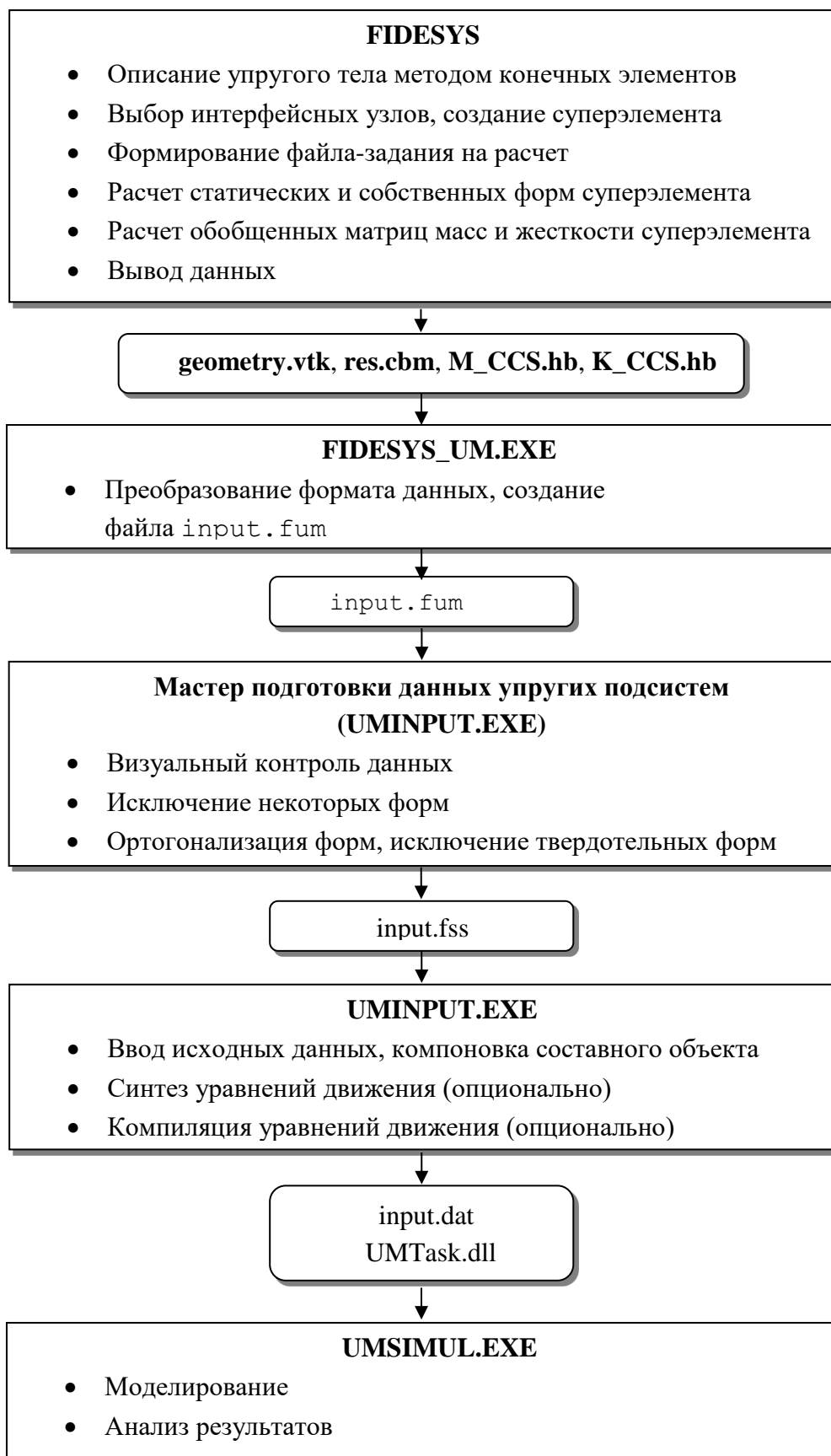


Рис. 1.71. Создание упругой подсистемы с использованием FIDESYS

### 1.2.5.1.2. Основные этапы создания упругой модели в программе FIDESYS

Руководство пользователя программы **FIDESYS** доступно для скачивания на сайте программы<sup>1</sup>. Модель должна быть описана в системе СИ единиц измерения, также это необходимо учитывать при задании упругих свойств материала. Конечно-элементная сетка должна содержать узлы в шарнирных точках и точках прикрепления силовых элементов. Некоторые особенности создания конечно-элементной модели описаны в п. 1.2.6. "Особенности подготовки данных в программе МКЭ", с. 1-81.

После создания КЭ модели требуется указать интерфейсные узлы суперэлемента, используемого при расчете. Для этого на панели команд выбираем **Режим - Множества**, **Объект - Набор узлов**, **Действие - Управление**. Вводим **Имя набора узлов**, в поле **ID(s)** вводим номера, либо, активировав это поле, выбираем узлы мышью в анимационном окне (для нескольких узлов с нажатием клавиши Ctrl). После выбора нужных узлов нажимаем **Применить** (Рис. 1.72).

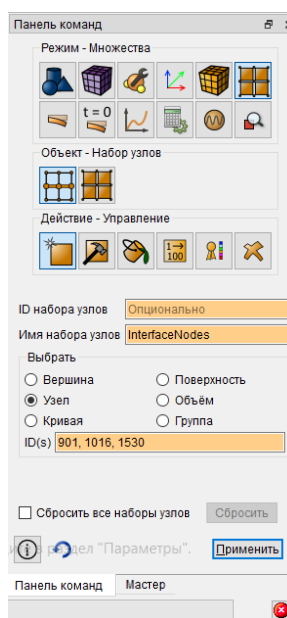
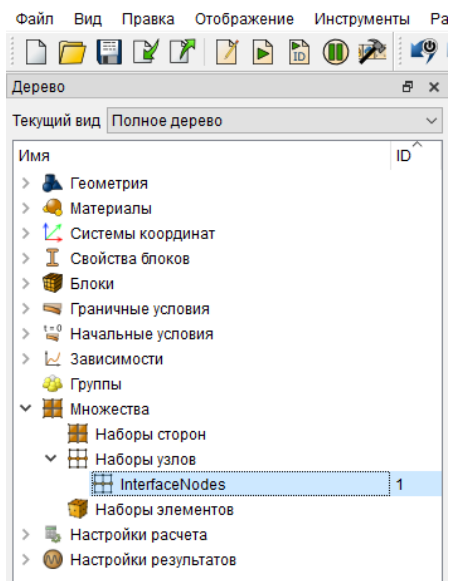


Рис. 1.72

Просмотреть созданные наборы узлов можно в дереве модели (Рис. 1.73).

---

<sup>1</sup> <https://cae-fidesys.com/documentation/>



На панели команд задаем настройки для расчета: указываем число собственных форм, формат выходных данных - двоичный (Рис. 1.74). Нажимаем кнопку **Применить**, затем **Начать расчет**.

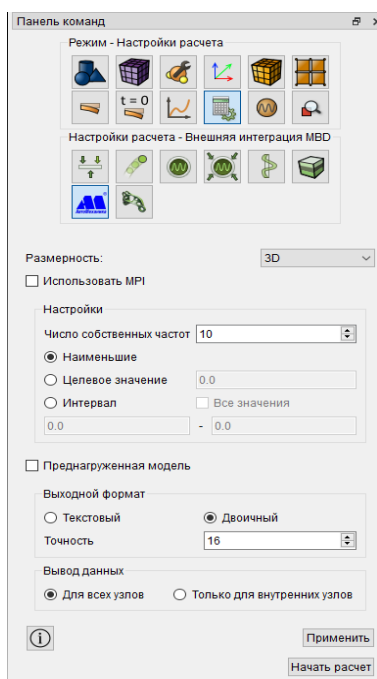


Рис. 1.74

Задаем имя и выбираем место для сохранения файлов с результатами, выбираем **Сохранить** (Рис. 1.75).

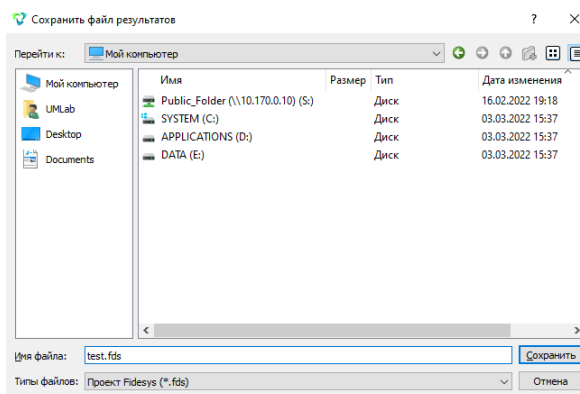


Рис. 1.75

### 1.2.5.1.3. Сосредоточенные массы и твердотельные площадки в программе FIDESYS

При подготовке КЭ модели необходимо обеспечить шесть степеней свободы в интерфейсном узле и распределение сил по площадке в его окрестности. Шесть степеней свободы в интерфейсном узле можно обеспечить, добавив в этот узел сосредоточенную (узловую) массу. Для корректного распределения сил вокруг интерфейсного узла нужно создать вокруг него твердотельную площадку. В данной главе покажем, как создавать сосредоточенные массы в интерфейсных узлах и твердотельные площадки в ПК FIDESYS.

Для добавления в узел сосредоточенной массы необходимо сначала создать блок, включив в него узлы (в которых и будут находиться сосредоточенные массы), затем указать для этого блока свойства сосредоточенной массы.

Выбираем **Режим - Блоки**, **Объект - Блок**, **Действие - Добавить сущность в блок**, **Список сущностей - Узел**, в поле **ID объекта(ов)** указываем номера узлов, в которых будут находиться сосредоточенные массы, нажимаем **Применить** (Рис. 1.76). Блок, включающий 3 узловых массы, создан.

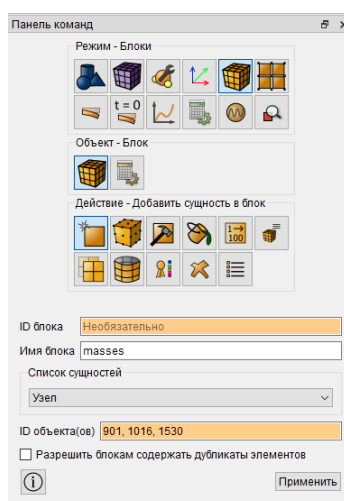


Рис. 1.76

Далее для созданного блока нужно задать свойства сосредоточенной массы: **Режим - Блоки, Объект - Блок, Действие - Свойства/параметры блока**, выбираем созданный ранее блок, **Категория - Точечная масса**, нажимаем **Задать свойства точечной массы** (Рис. 1.77). В появившемся окне задаем массы и моменты инерции вдоль осей.

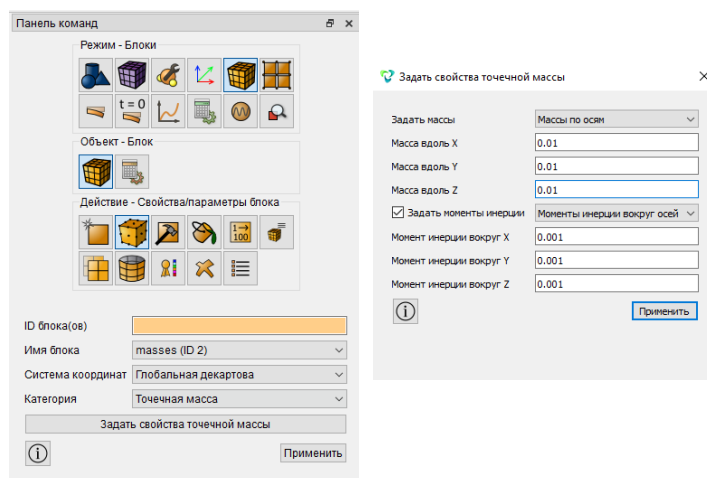


Рис. 1.77

Для создания твердотельной площадки выбираем **Режим - Граничные условия, Объект - Связи, Действие - Создать**, из выпадающих **Списков сущностей** (и главной, и побочной) выбираем **Узел**, далее в полях **ID объекта (ов)** вводим номер одного главного узла и нескольких зависимых узлов (Рис. 1.78).

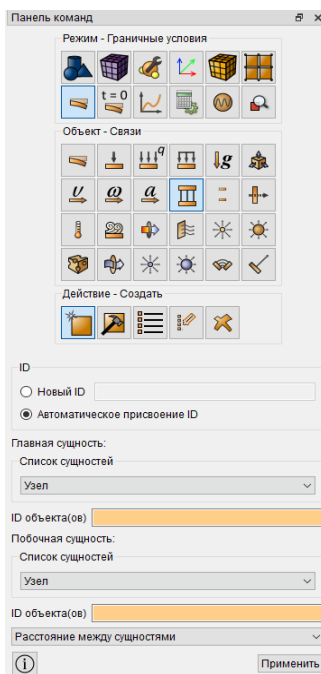


Рис. 1.78

Подробнее о сосредоточенных (узловых) массах и твердотельных площадках описано в 1.2.6.1.

### 1.2.5.1.3.1.1. Обмен данными с программой FIDESYS

Запустите программу конвертер **FIDESYS\_UM.EXE** (Рис. 1.79) для создания файла **input.fum**. Выберите файл **geometry.vtk** в соответствующем каталоге и укажите каталог сохранения файла **input.fum**. **Важно:** файлы **res.cbm**, **M\_CCS.hb**, **K\_CCS.hb** должны находиться в том же каталоге, что и файл **geometry.vtk**. Назначение всех полей понятно по их названиям (Рис. 1.79).

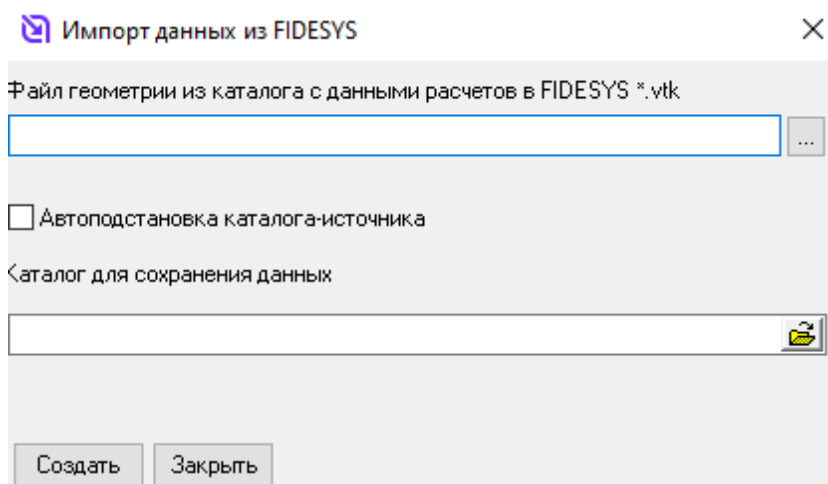


Рис. 1.79. Окно программы FIDESYS\_UM.exe

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. 1.3. "Мастер упругих подсистем", с. 1-91.

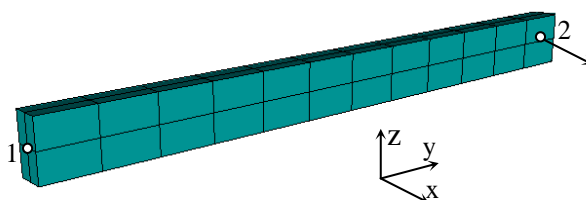
## 1.2.6. Особенности подготовки данных в программе МКЭ

Рассмотрим некоторые особенности, которые следует учитывать при разработке конечноэлементных моделей упругих подсистем.

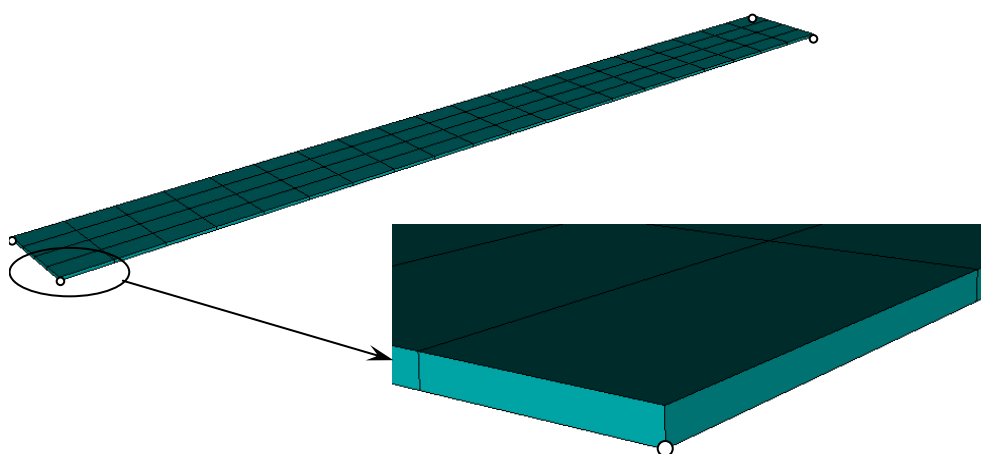
### 1.2.6.1. Выбор интерфейсных узлов

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. 1.80 приведены примеры некорректного (а) и корректного (б) выбора интерфейсных узлов.



(а) – Некорректный выбор интерфейсных узлов



(б) – Корректный выбор интерфейсных узлов

○ – интерфейсные узлы.

Рис. 1.80. Примеры выбора интерфейсных узлов

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. 1.80, а) не обеспечивают неподвижность модели как абсолютно твердого тела при расчете статических форм от поперечных единичных смеще-

ний ( $x$  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. 1.80, б) все статические формы могут быть корректно рассчитаны.

- 2) При моделировании в **УМ** все силы, кроме контактных сил, могут быть приложены только в узлах конечноэлементной 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. 1.81. 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.

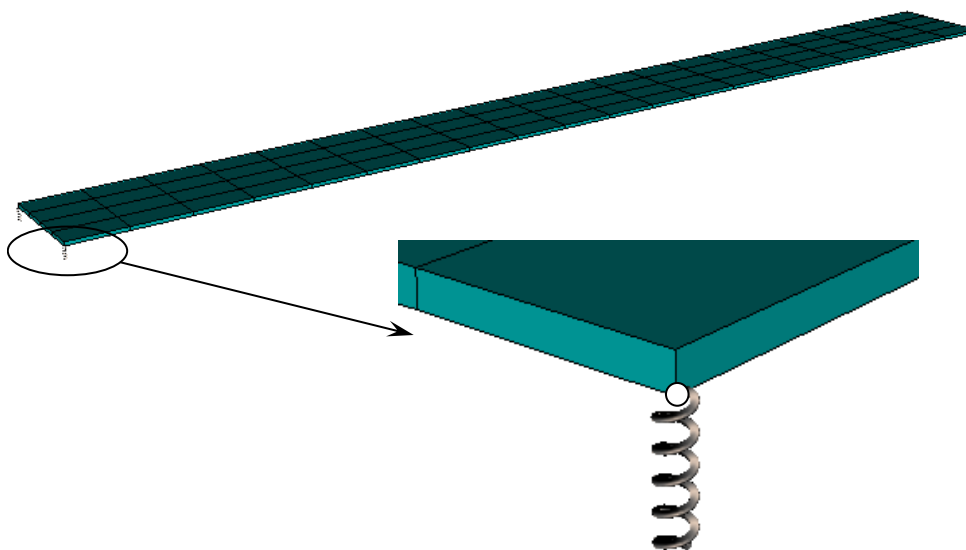


Рис. 1.81. Примеры модели **УМ** с упругой подсистемой

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

- 3) 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.

- 4) 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.
- 5) Если интерфейсный узел имеет менее шести степеней свободы, то во многих случаях уравнения связей строятся некорректно или вообще не могут быть построены.
- 6) 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 ( $\text{keyopt}(3)=0$ ), в **MSC.NASTRAN** – тип **CONM2**.

В программе **ABAQUS** для создания узловых масс можно использовать команду главного меню **Special** → **Inertia** → **Create** модуля **Property** (рис. 1.82). В появившемся окне **Create Inertia** необходимо выбрать тип **Point Mass/Inertia**, нажать **Continue**, выбрать мышью в графическом окне точки, в которых будут располагаться узловые массы, либо выбрать набор узлов (**Set**), содержащий узлы, в которых будут располагаться узловые массы. Затем в появившемся окне **Edit Inertia** (рис. 1.83) указать инерционные параметры узловой массы и нажать кнопку **OK**.

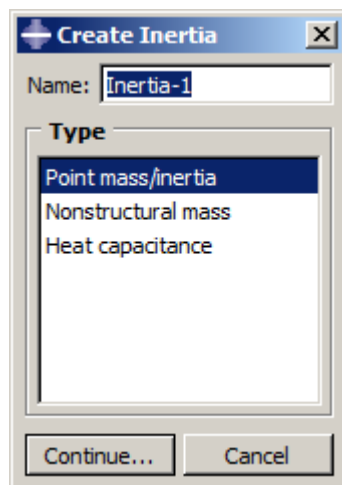


Рис. 1.82. Создание узловой массы в программе **ABAQUS**

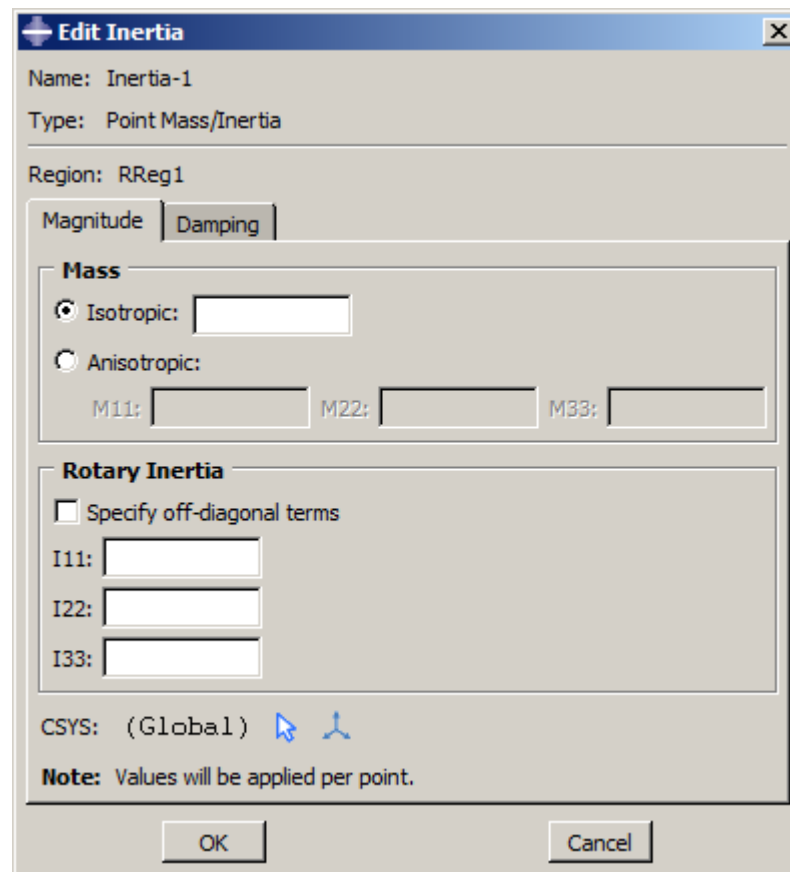


Рис. 1.83. Задание инерционных характеристик узловой массы в программе ABAQUS

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/Ceqn > 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 ABAQUS для этого можно использовать кнопку **Constraints**  из модуля **Interaction**. При нажатии кнопки **Create Constraint** появляется диалоговое окно **Create Constraint** (рис. 1.84), в котором необходимо выбрать тип **MPC Constraint** и нажать кнопку **Continue**. Далее необходимо выбрать интерфейсный узел или набор узлов (Set), включающий интерфейсный узел, а затем выбрать зависимые узлы или набор узлов

(Set), включающий зависимые узлы. После этого должно появиться окно **Edit Constraint** (рис. 1.85), в котором необходимо выбрать **MPC Type** равный **Beam** и нажать кнопку **ОК**.

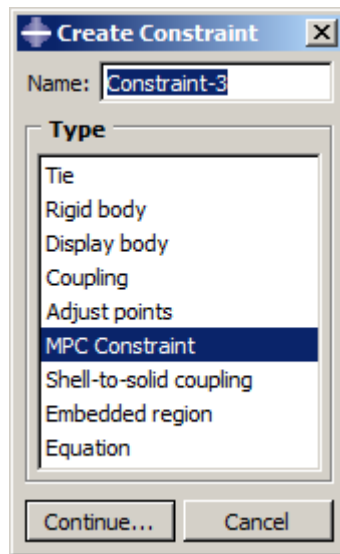


Рис. 1.84. Диалоговое окно Create Constraint

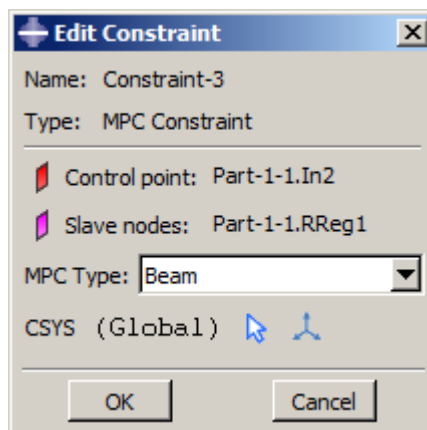


Рис. 1.85. Диалоговое окно Edit Constraint

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, *G<sub>Mi</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 окно, вызываемая кнопкой **Elements** панели инструментов. В окне выбираются следующие значения элементов управления (рис. 1.86):

**Action:** Create

**Object:** MPC (Multipoint Constraints)

**Type:** RBE2

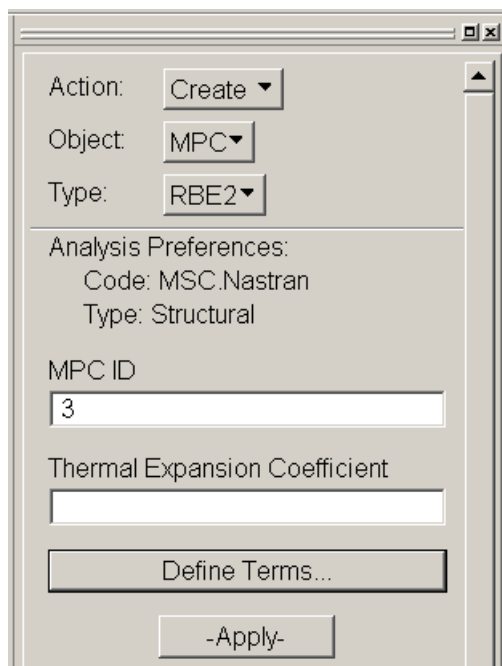


Рис. 1.86. Ввод уравнений связей в MSC.PATRAN

Узлы, входящие в уравнения связей, задаются в окне, вызываемом 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. 1.87) с упругим шатуном (рис. 1.88).

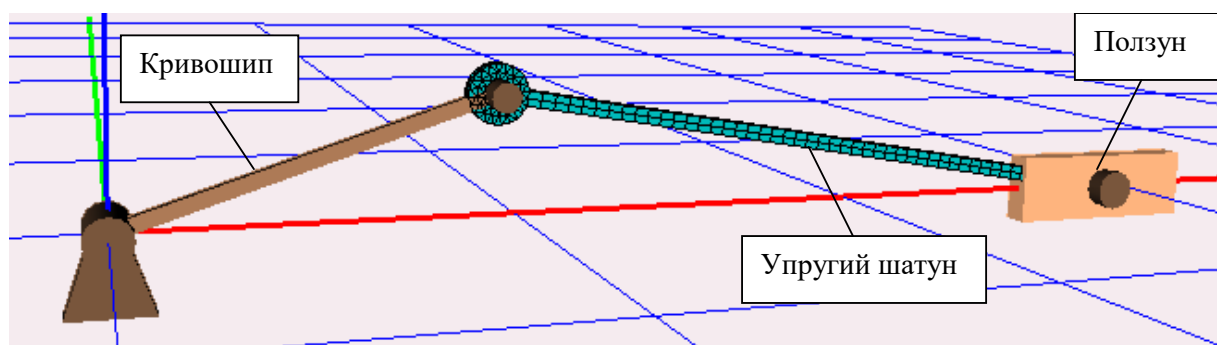


Рис. 1.87. Кривошипно-ползунный механизм с упругим шатуном

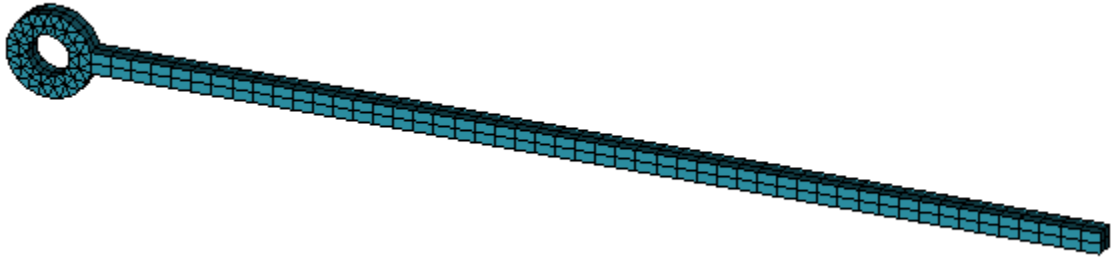


Рис. 1.88. Конечноэлементная модель шатуна

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.

1) *Добавление сосредоточенной массы и уравнений связей.*

Согласно подходу добавим сосредоточенную массу в интерфейсный узел на торце шатуна и уравнения связей (рис. 1.89).

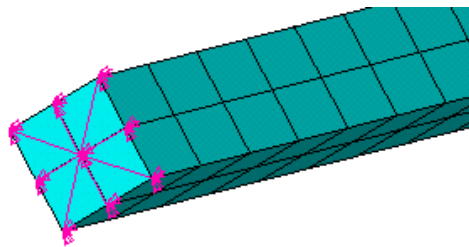


Рис. 1.89. Уравнения связей на торце шатуна

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. 1.90.

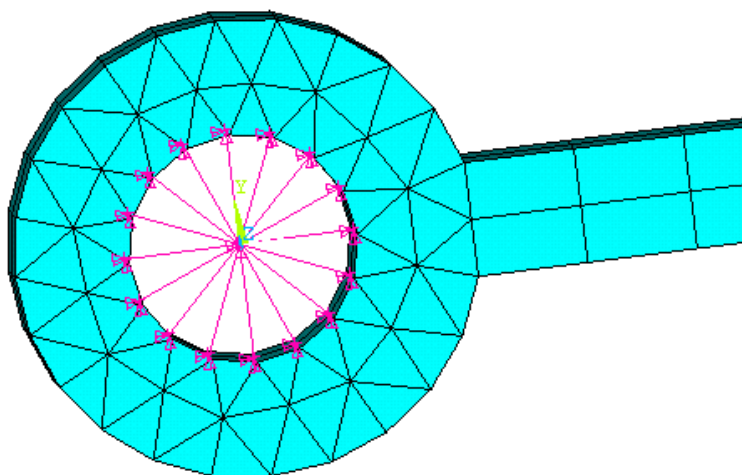


Рис. 1.90. Уравнения связей в цилиндрическом отверстии шатуна

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. 1.91, рис. 1.92.

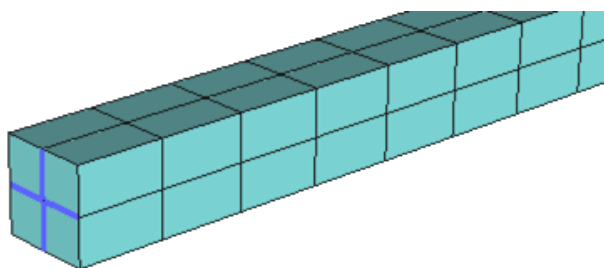


Рис. 1.91. Балочные элементы на торце шатуна

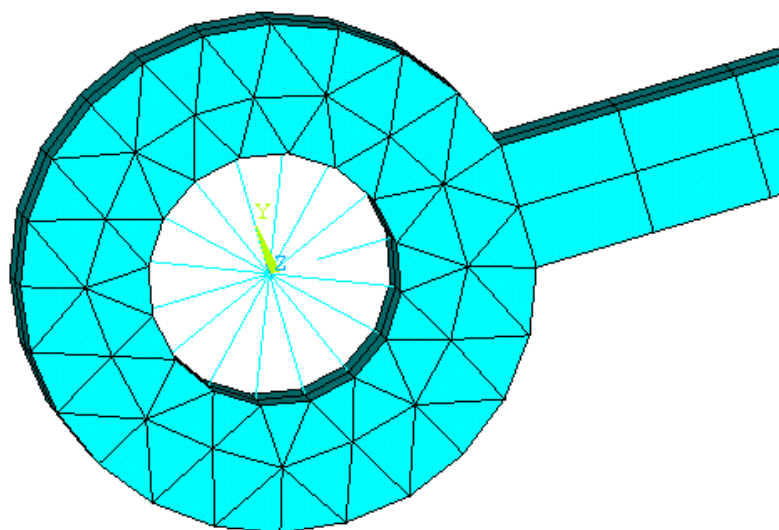


Рис. 1.92. Балочные элементы в цилиндрическом отверстии шатуна

### 1.2.6.2. 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. 0, п. 1.2.2. "Создание модели в среде *MSC.NASTRAN* и обмен данными", с. 1-32). 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. 1.6.3.3. "Напряжения и деформации", с. 1-139). **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.

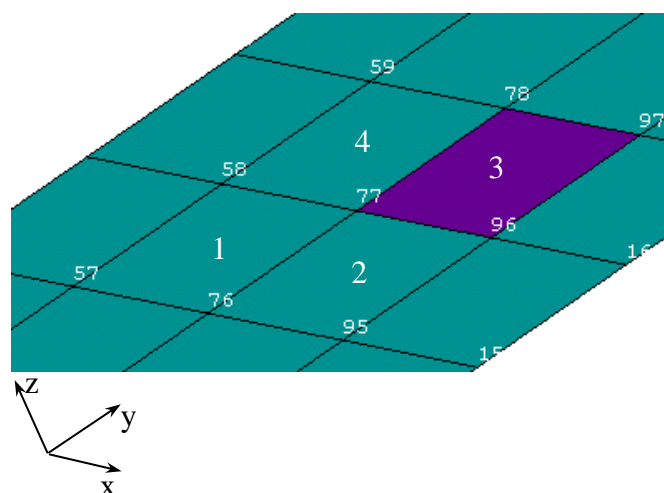


Рис. 1.93. К расчету средних напряжений на поверхностях пластины

Рассмотрим пример расчета средних напряжений в узле на верхней поверхности пластины (рис. 1.93), 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 **UM Simulation** подробно рассмотрено в п. 1.6.3.3. "Напряжения и деформации", с. 1-139.

### 1.3. Мастер упругих подсистем

Мастер подготовки данных упругих подсистем реализован в рамках программы подготовки данных **UM Input** и предназначен для контроля данных, подготовленных с помощью программ конечноэлементного 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 программ-конверторов **ANSYS\_UM** и **NASTRAN\_UM**.

Для вызова мастера подготовки данных используется пункт **Инструменты | Мастер упругих подсистем...** основного меню программы подготовки данных **UM Input**, рис. 1.94.

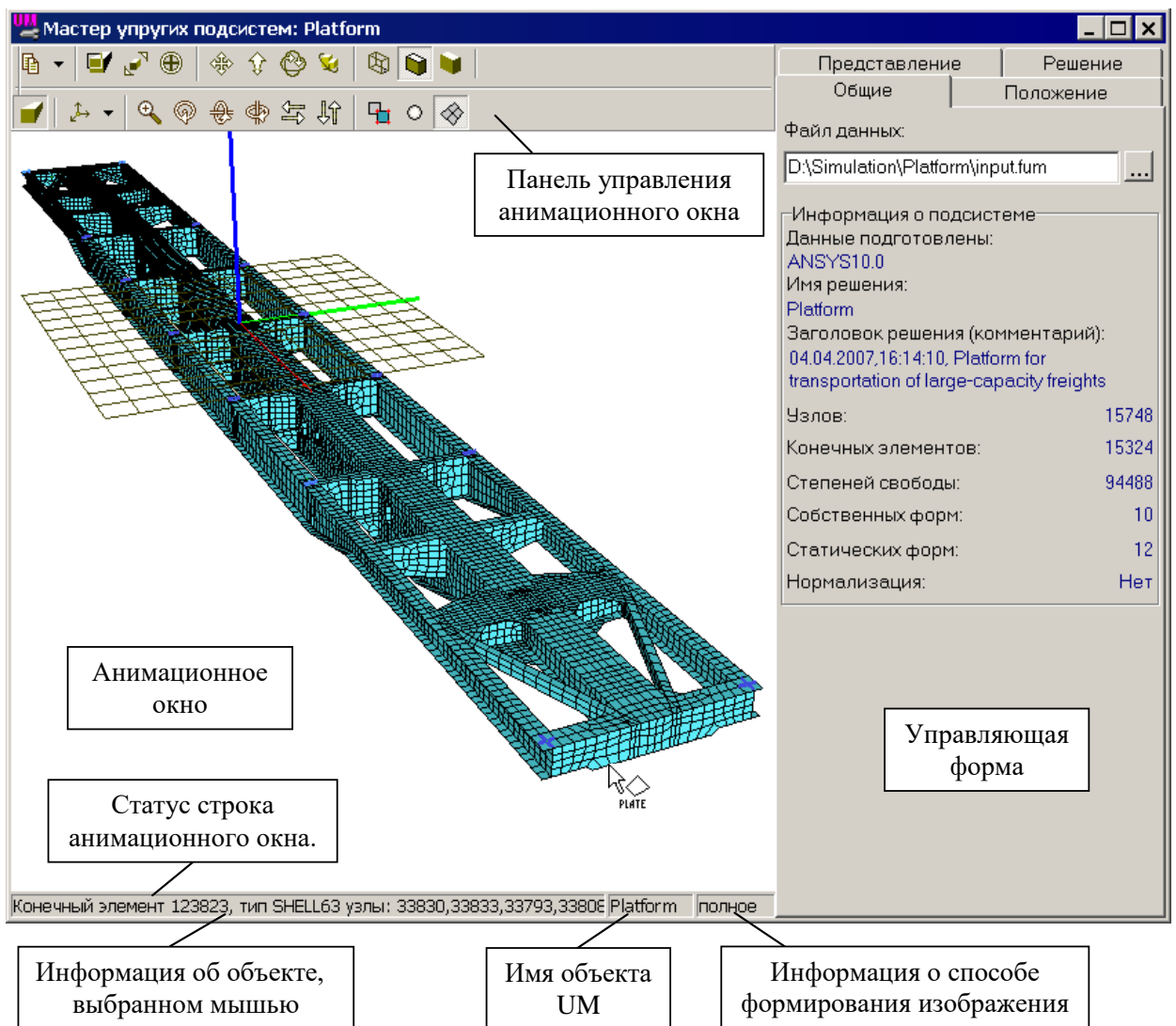


Рис. 1.94. Диалоговое окно мастера подготовки данных упругой подсистемы

### 1.3.1. Анимационное окно

Анимационное окно предназначено для отображения конечноэлементной 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. *Анимационное окно конструктора*, [Глава 3](#) руководства пользователя. Отметим дополнительные функции, связанные с отображением конечно-элементной сетки:

- изменение курсора мыши в соответствии с типом объекта, на который указывает курсор:



– узел конечноэлементной 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 конечноэлементной сетки в строке статуса анимационного окна при наведении на них курсора мыши;
- дополнительные кнопки на панели управления, позволяющие задать некоторые параметры отображения конечноэлементной модели:



– переключение между упрощенным (кнопка нажата) и полным (кнопка не нажата) изображением конечноэлементной 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. 1.95).

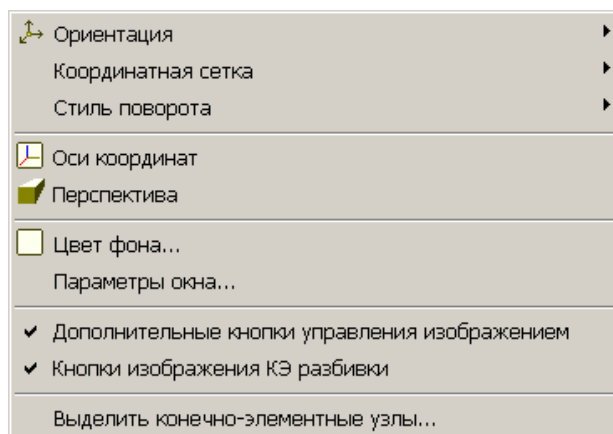


Рис. 1.95.

### 1.3.2. Управляющее окно

Управляющее окно 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 также 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.

1.3.2.1. Вкладка «Общие»

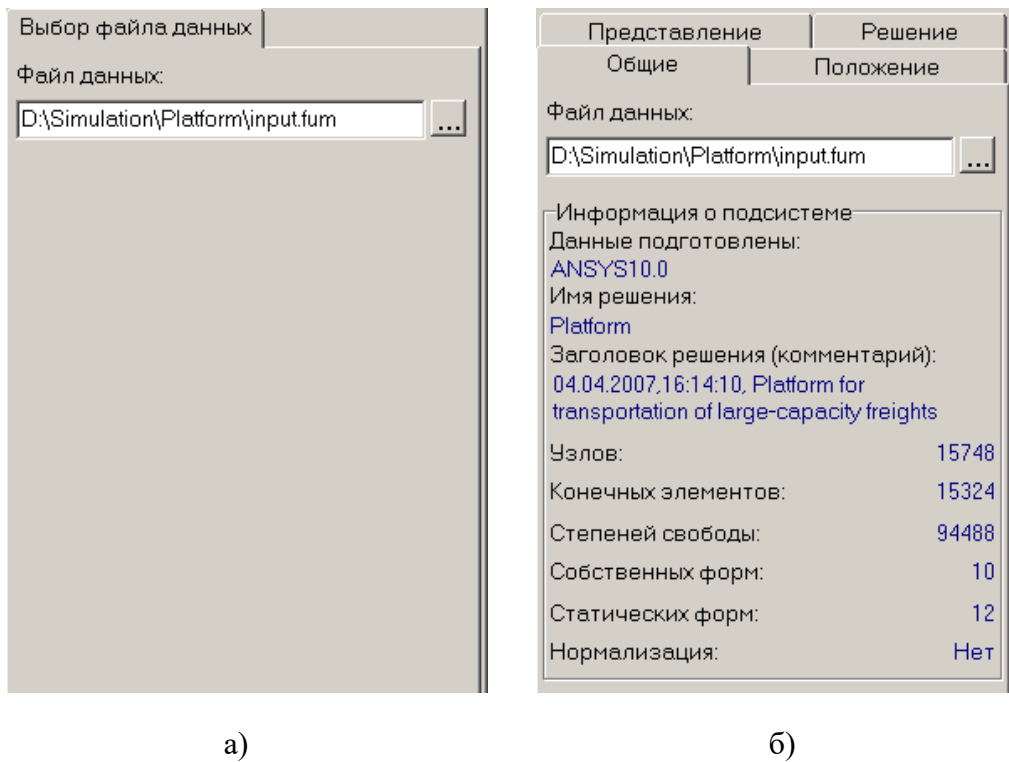


Рис. 1.96. Состояния вкладки **Общие**

После запуска мастера, до выбора файла с данными упругой подсистемы вкладка имеет заголовок **Выбор файла данных** (рис. 1.96, 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. 1.97).

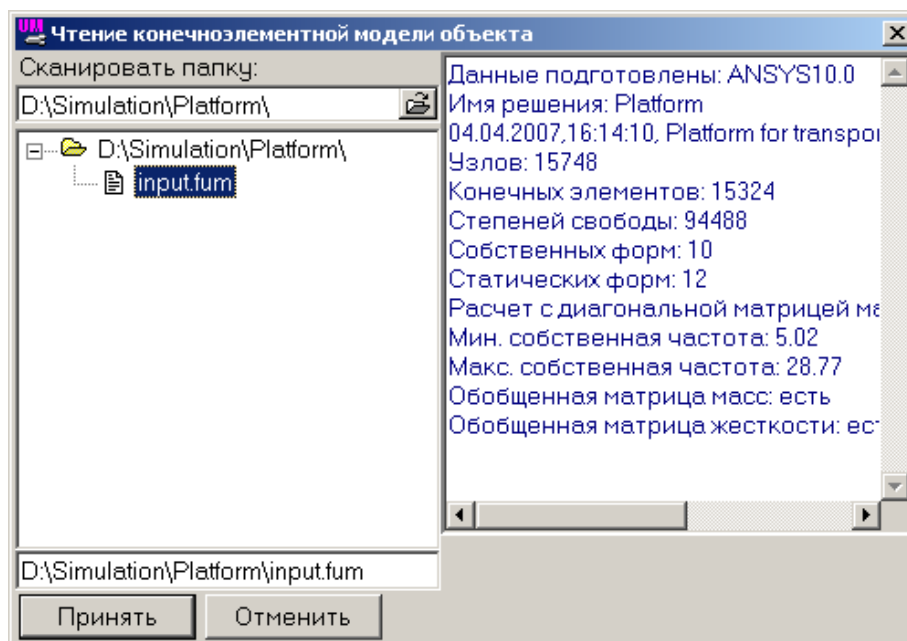


Рис. 1.97.

Функционально это окно похоже на окно выбора объекта, см. п. *Команды главного меню и панель управления – Файл*, [Глава 3](#) руководства пользователя. Оно 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. 1.96, б.

### 1.3.2.2. Вкладка «Решение»

Опишем состав и назначение элементов управления, расположенных на вкладке **Решение** (рис. 1.98).

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

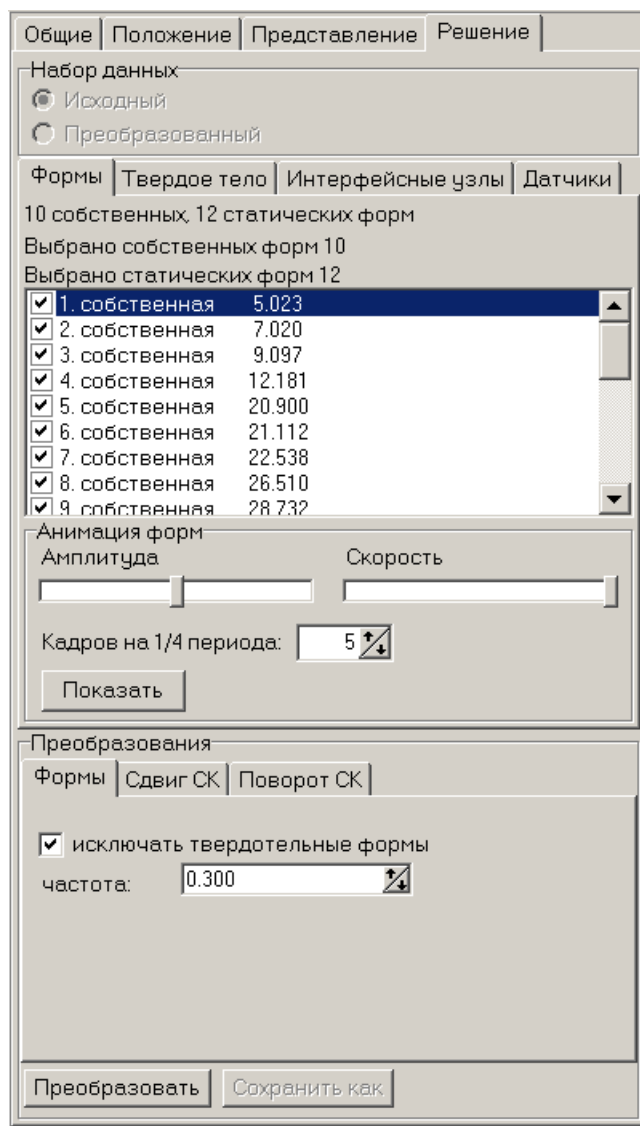


Рис. 1.98.

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

- Вкладка **Формы** (рис. 1.98) 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.

- Информирует 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 всплывающим меню списка (рис. 1.99). Оно позволяет также сохранить индексы выбранных форм в текстовый файл и загрузить их из файла.
- Позволяет выбрать упругую форму для отображения в анимационном окне.

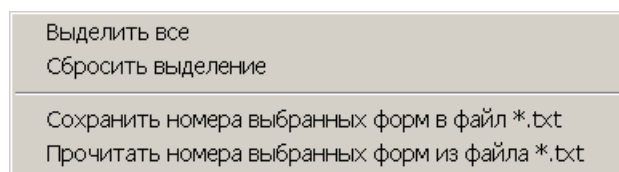


Рис. 1.99. Контекстное меню списка форм исходного набора данных

- 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. 1.100).

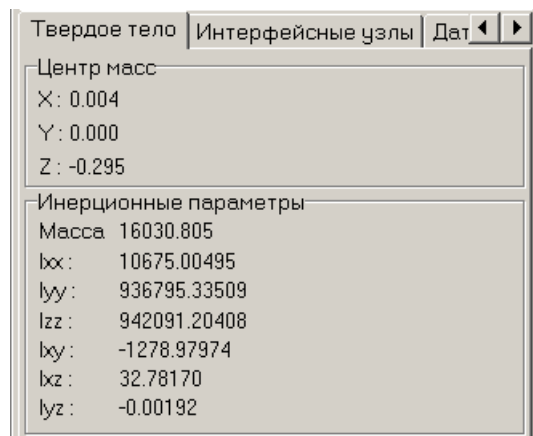
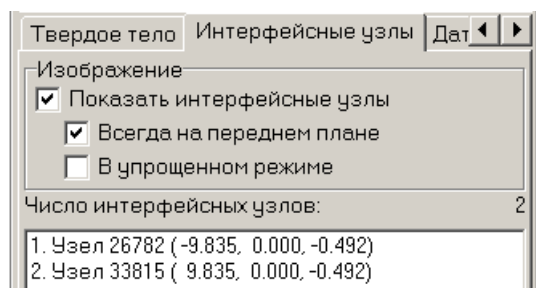


Рис. 1.100. Вкладка **Твердое тело**

- Вкладка **Интерфейсные узлы** (рис. 1.101) содержит список интерфейсных узлов и позволяет настроить режим их отображения в анимационном окне.

Рис. 1.101. Вкладка **Интерфейсные узлы**

- Вкладка **Датчики** (рис. 1.103) 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. 1.102).

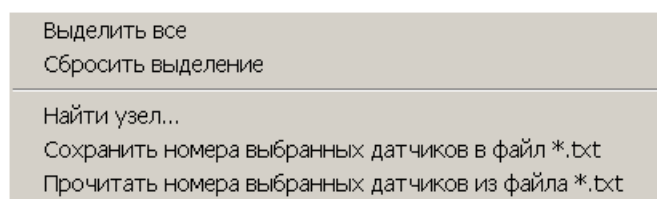
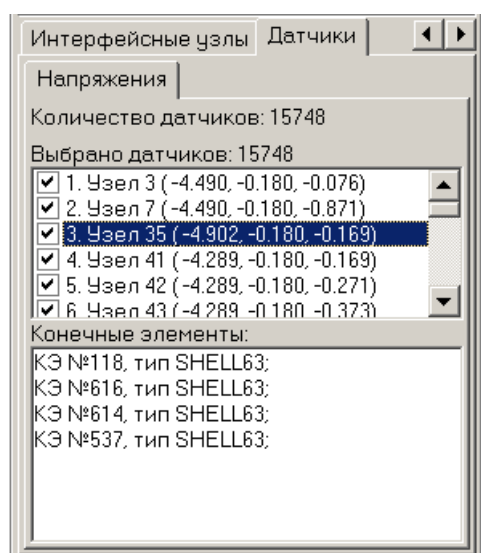


Рис. 1.102. Контекстное меню списка датчиков

Рис. 1.103. Вкладка **Датчики**

- Группа элементов **Преобразования** включает три вкладки: **Формы**, **Сдвиг СК** и **Поворот СК** (рис. 1.104).

Вкладка **Формы** по назначению практически совпадает с вкладкой **Настройки** главного окна программы **ansys\_um** (см. п. 1.2.1. "Создание модели в среде ANSYS и обмен данными", с. 1-15).

- 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 УМ не удается 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. 1.2.1. "Создание модели в среде ANSYS и обмен данными", с. 1-15).

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

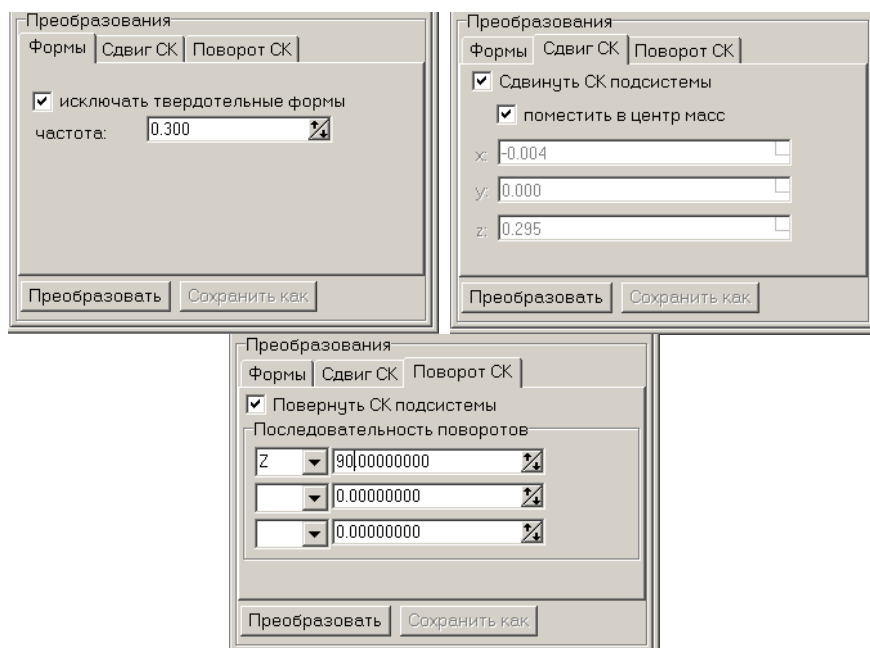


Рис. 1.104. Вкладки, расположенные на панели Преобразования

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 UM 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 конечноэлементной 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. 1.105).

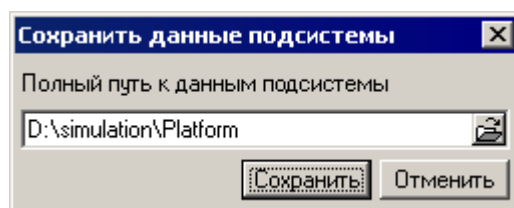


Рис. 1.105.

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.

### 1.3.2.3. Вкладка «Представление»

Элементы управления, расположенные на вкладке **Представление** (рис. 1.106) предназначены для настройки графического вида конечноэлементной схемы упругой подсистемы.

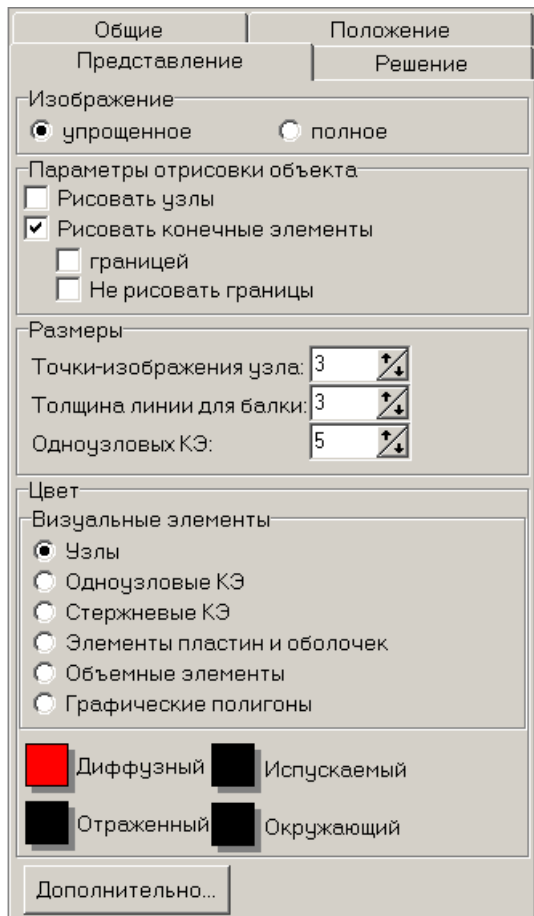


Рис. 1.106. Вкладка Представление

- Переключатель **Изображение** позволяет выбрать способ формирования графического изображения.

При выборе варианта **упрощенное** подсистема отображается как один графический элемент, содержащий набор полигонов, соответствующий конечноэлементной 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 конечноэлементных 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 конечноэлементной модели можно настроить с помощью диалогового окна, которое вызывается кнопкой **Дополнительно...** (рис. 1.107)

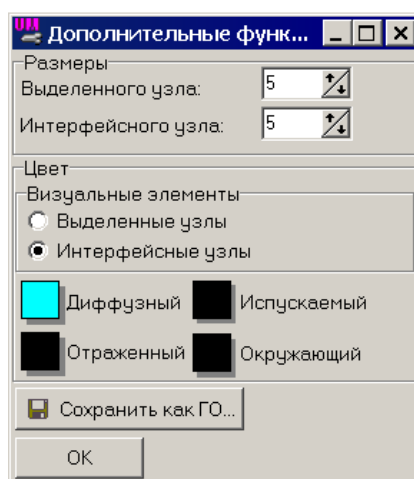


Рис. 1.107. Окно дополнительных настроек изображения КЭ модели

Кнопка **Сохранить как ГО...** позволяет сформировать графический объект типа полиэдр из полигонов поверхности конечноэлементной 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.

#### 1.3.2.4. Вкладка «Положение»

Вкладка содержит элементы управления, позволяющие изменить положение и ориентацию упругой подсистемы относительно базовой системы координат (рис. 1.108). Используется последовательность преобразований: сдвиг, последовательность трех поворотов, сдвиг. Указанные преобразования влияют только на отображение конечноэлементной схемы в анимационном окне.

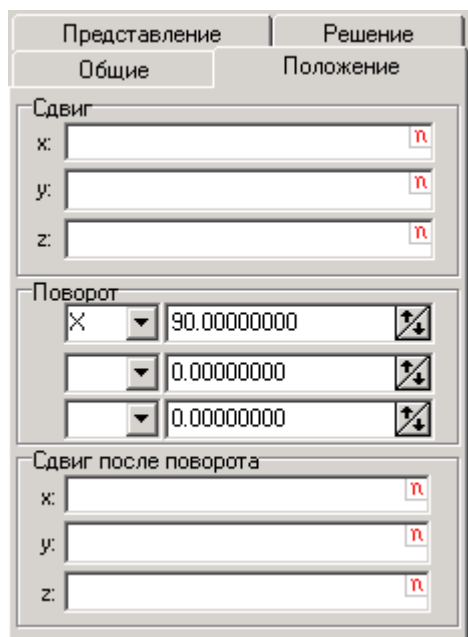


Рис. 1.108.

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 программы **UM Input** (см. раздел 3 руководства).

#### 1.3.3. Окно выбора узлов

Окно выбора узлов (рис. 1.108) 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 **UM Simulation** и пр. Она может быть использована для пометки некоторых узлов (например, узлов датчиков напряжений), чтобы контролировать их положение при сборке объекта.

Опишем диалоговое окно 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, окно может быть вызвана с помощью контекстного меню, пункт **Выделить конечноэлементные узлы...** (рис. 1.95).

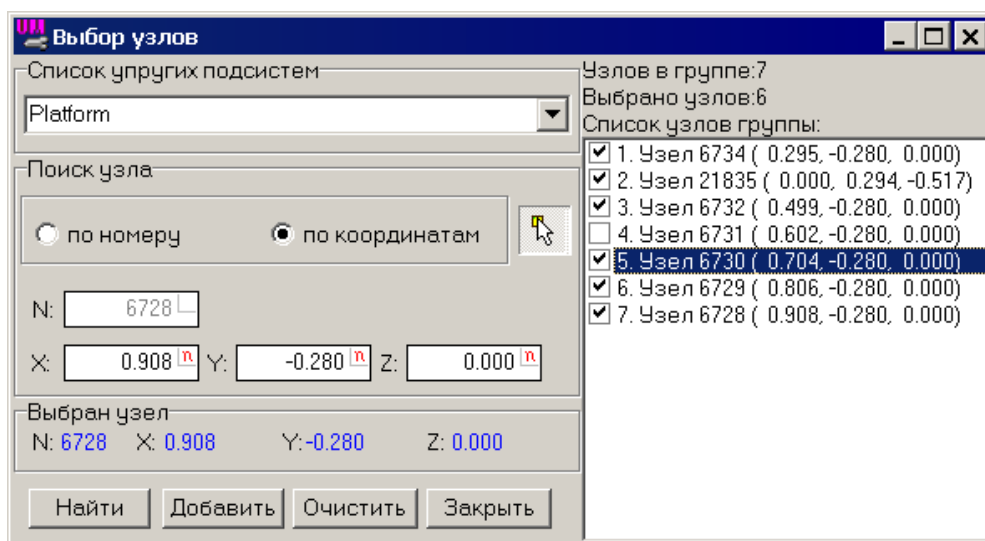



Рис. 1.109.

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

В правой части окна 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 окна расположены элементы, позволяющие найти узел по номеру, координатам или выбрать его в окне с помощью мыши. Режим выбора узлов в окне включает-ся кнопкой .

После закрытия окна активные узлы отображаются на переднем плане, независимо от ориентации подсистемы.

## 1.4. Новый мастер упругих подсистем – UM FEM Wizard

Начиная с версии 10 ПК УМ включает новый мастер упругих подсистем **UM FEM Wizard**, реализованный как отдельное приложение. Исполняемый файл **UMFEMWizard.exe** находится в каталоге исполняемых файлов УМ (по умолчанию *C:\Program Files\UM Software Lab\Universal Mechanism\10\bin*). Мастер может быть запущен из основного меню **UM Input**, пункт **Инструменты - Мастер упругих подсистем (новый)**, аналогично предыдущей версии (Рис. 1.110), а также с помощью ярлыка, файлового менеджера или из командной строки. **UM FEM Wizard** не взаимодействует с программой **UM Input**, вызов из меню реализован просто как дополнительная возможность.

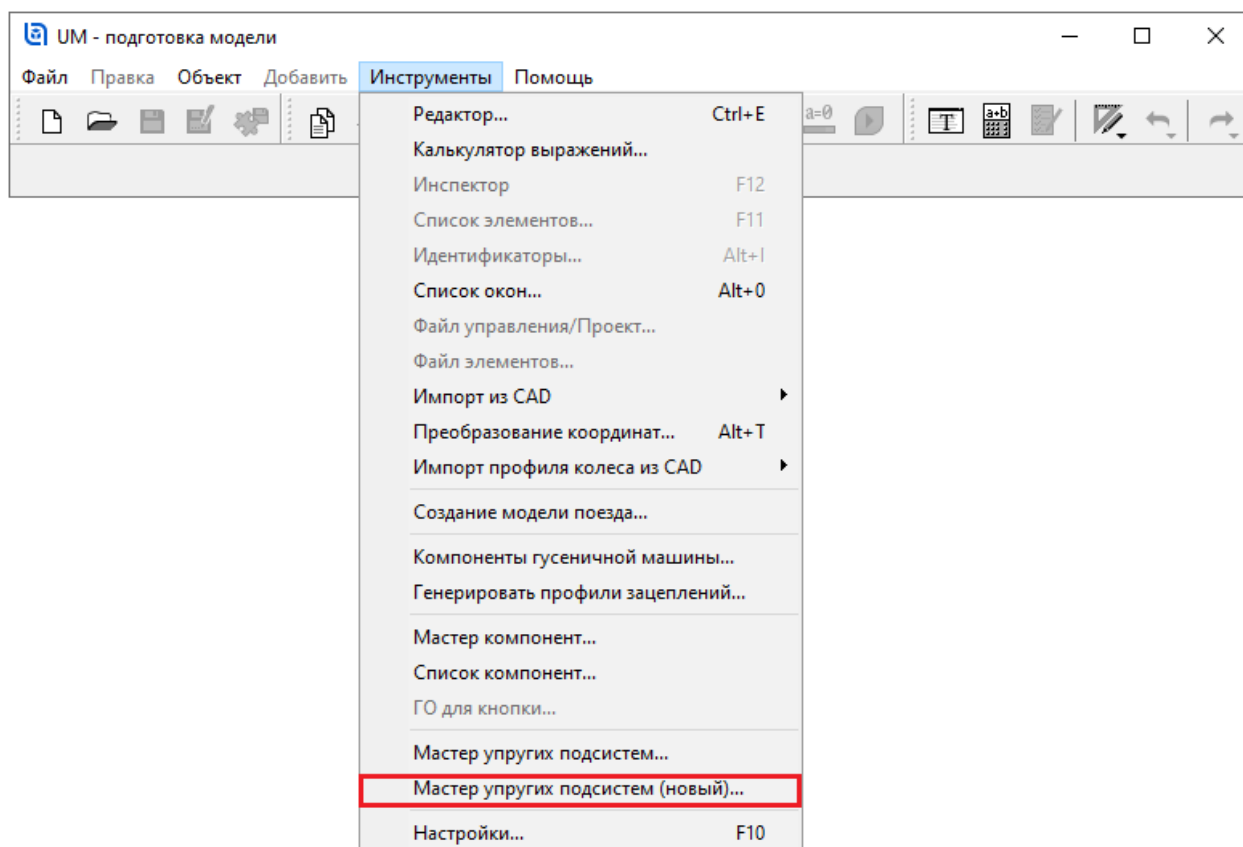


Рис. 1.110.

Вид окна нового **Мастера упругих подсистем** представлен на Рис. 1.111. Основные отличия от предыдущей версии следующие.

1. Мастер содержит новое анимационное окно, разработанное на основе нового более производительного графического ядра. Работа с большими моделями стала гораздо комфортнее, решены проблемы с оцувствлением мыши – получением информации об объекте при наведении на него курсора – которые возникали при использовании предыдущей версии окна. Реализован выбор множества конечных элементов в окне, который используется, в частности, для назначения им свойств.

2. Мастер содержит форму назначения свойств конечным элементам. Это необходимо для расчёта динамических напряжений с применением КЭ-библиотеки УМ (см. пункт 1.1.2.2), поскольку импорт свойств КЭ из внешних программ далеко не всегда возможен.

В текущей версии реализованы только изотропные материалы. Отметим, что для корректного расчета напряжений необходимо задавать свойства, совпадающие со свойствами конечных элементов, введенными в КЭ-программе перед расчётом суперэлемента (перед экспортом в УМ).

Эти и другие более мелкие изменения **Мастера** описаны ниже.

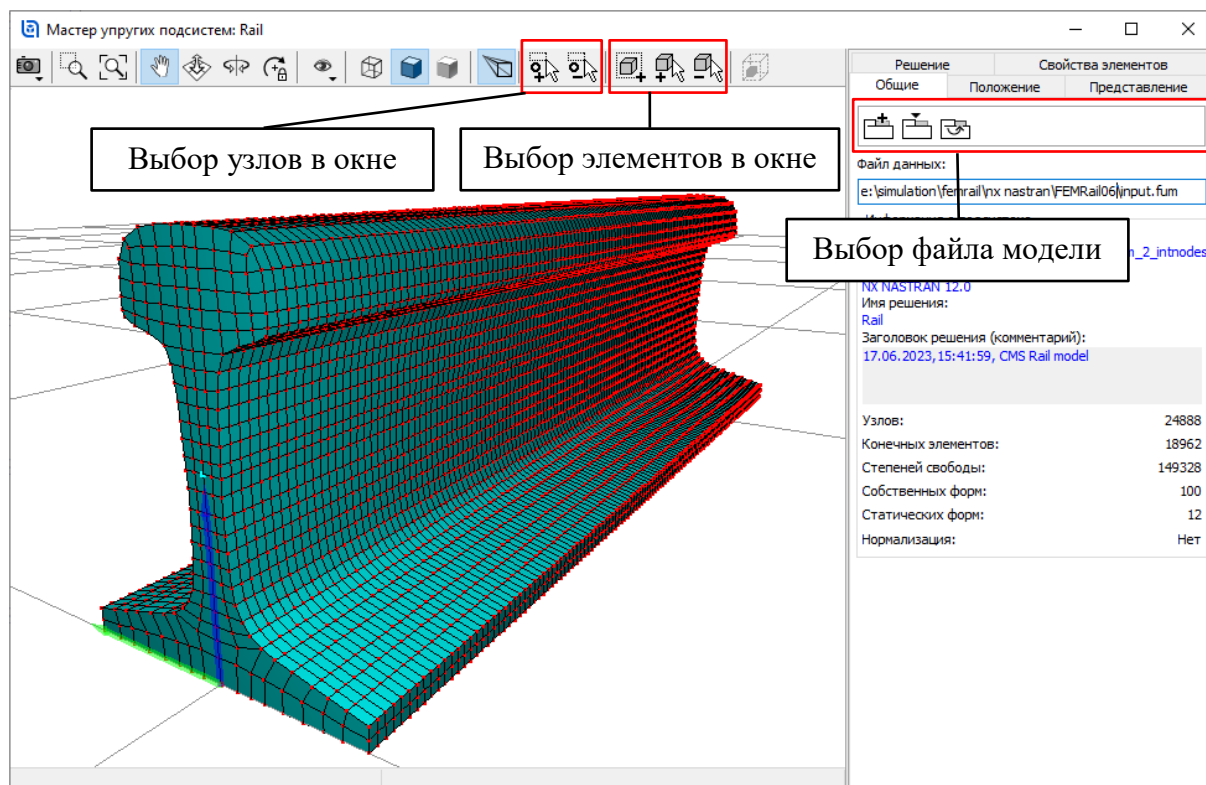


Рис. 1.111. Вид окна нового Мастера упругих подсистем.

### 1.4.1. Выбор файла данных

**Мастер** может загружать файлы трех типов.

- *input.fum* – исходный файл упругой подсистемы. В дополнение к описанным выше преобразованиям можно ввести и сохранить свойства конечных элементов для расчёта динамических напряжений.
- *input.fss* – файл с преобразованными формами упругой подсистемы. Он также может быть дополнен свойствами конечных элементов.
- *\*.mnf* – файл упругой подсистемы в формате программы MSC.ADAMS. Загружается только для визуального контроля исходных данных, в том числе, анимации упругих форм.

На панели выбора файла данных расположены три кнопки, по нажатию которых можно выбрать файл с использованием разных форм диалога.

	Выбрать файл с помощью диалога Windows (Рис. 1.112)
	Выбрать файл из последних открытых (Рис. 1.113)
	Выбрать файл с помощью диалога УМ, дерево каталогов которого включает только каталоги, содержащие файлы упругих подсистем (Рис. 1.114)

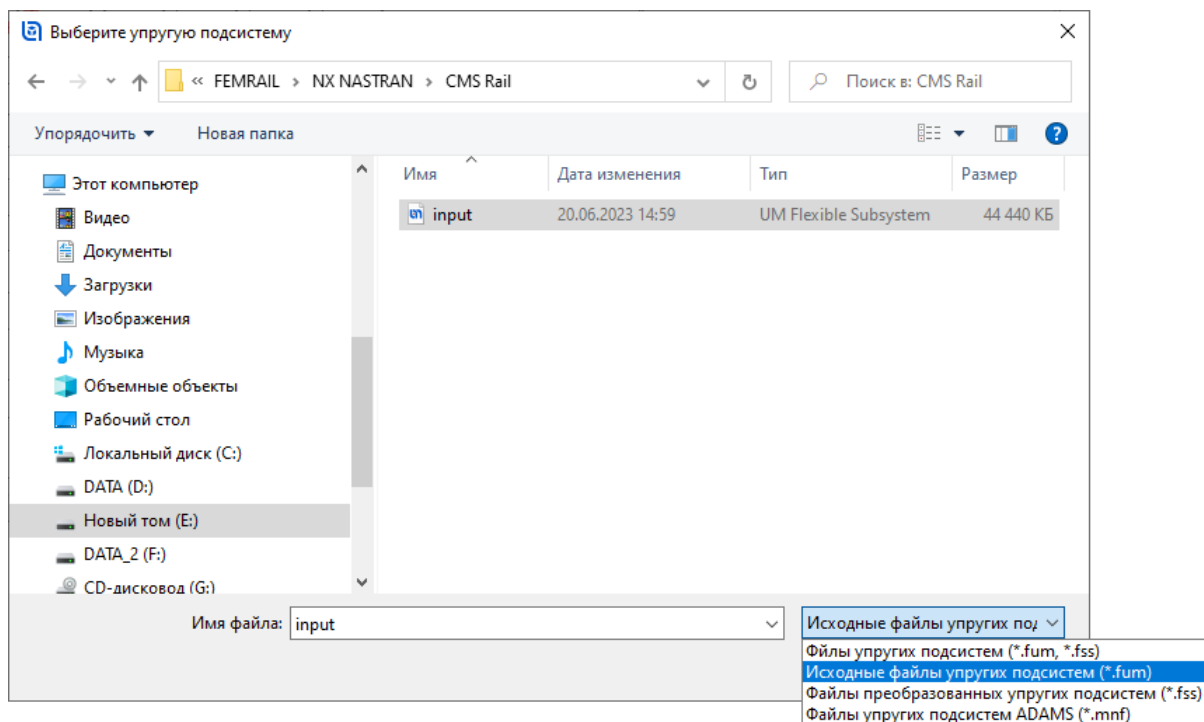


Рис. 1.112. Выбор файла упругой подсистемы с помощью диалога Windows.

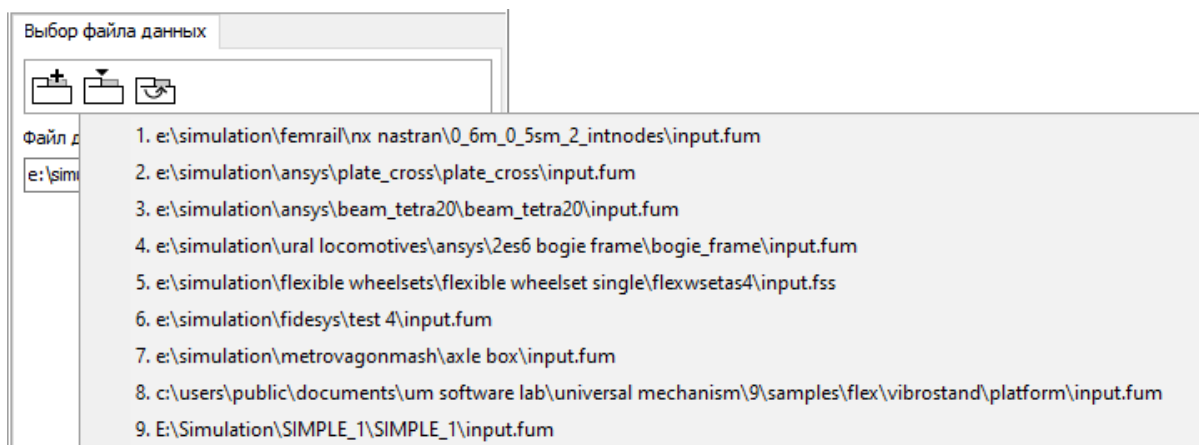


Рис. 1.113. Выбрать файл из последних открытых

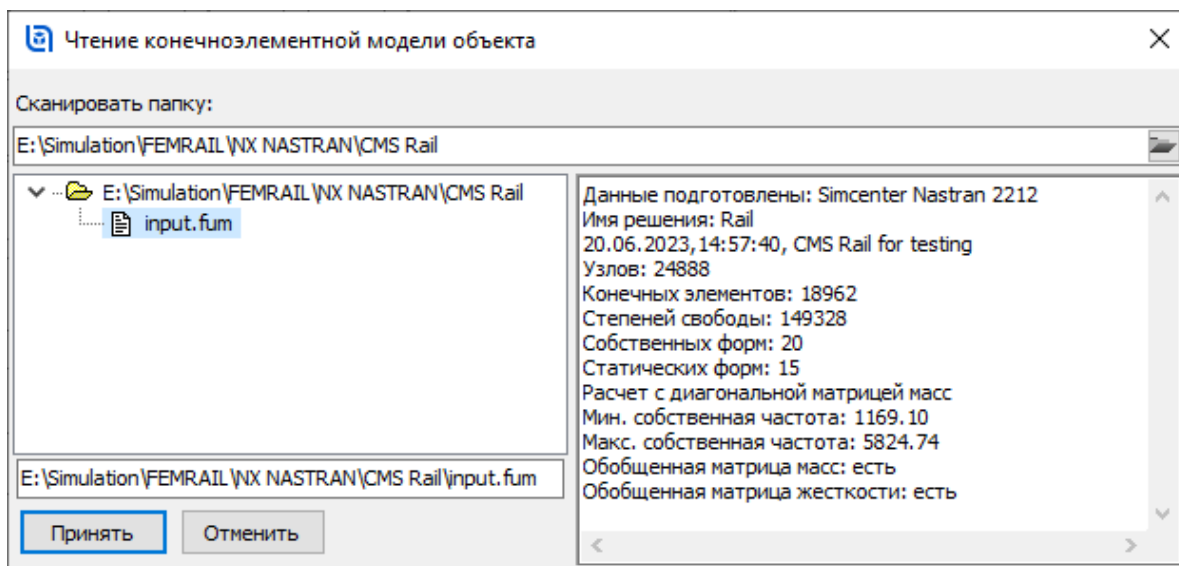


Рис. 1.114. Выбор файла с помощью диалога UM.

## 1.4.2. Выбор объектов в анимационном окне

В новом анимационном окне можно выбрать множество узлов и конечных элементов. Для этого активируется соответствующий режим окна в ситуациях, когда это требуется, например, из формы выбора узлов (см. пункт 1.3.3) или формы выбора элементов (пункт 1.4.4).

### 1.4.2.1. Выбор узлов

Узлы можно выбирать по одному щелчком мыши, или группой с помощью рамки. Списки выбранных узлов формируются, например, в процессе создания датчиков напряжений в опасных зонах при расчёте нагруженности и долговечности упругой подсистемы.

Выбор узлов рамкой доступен, если активны следующие кнопки.



Выделить узлы рамкой.

Отменить выбор узлов рамкой.

Для выделения рамкой необходимо нажать первую кнопку на панели, нажать левую кнопку мыши и, удерживая её, выделить прямоугольную область на экране, в которую попадают выбираемые узлы, после чего отпустить кнопку мыши (Рис. 1.115). Все узлы, которые попали в выделенную область, будут добавлены в список выбранных. Режим выделения рамкой после этого деактивируется, кнопка на панели становится неактивной. Для следующего выделения надо повторить все действия.

Аналогичные действия после нажатия кнопки **Отменить выбор** приводят к удалению ранее выбранных узлов, попавших в область рамки, из списка.

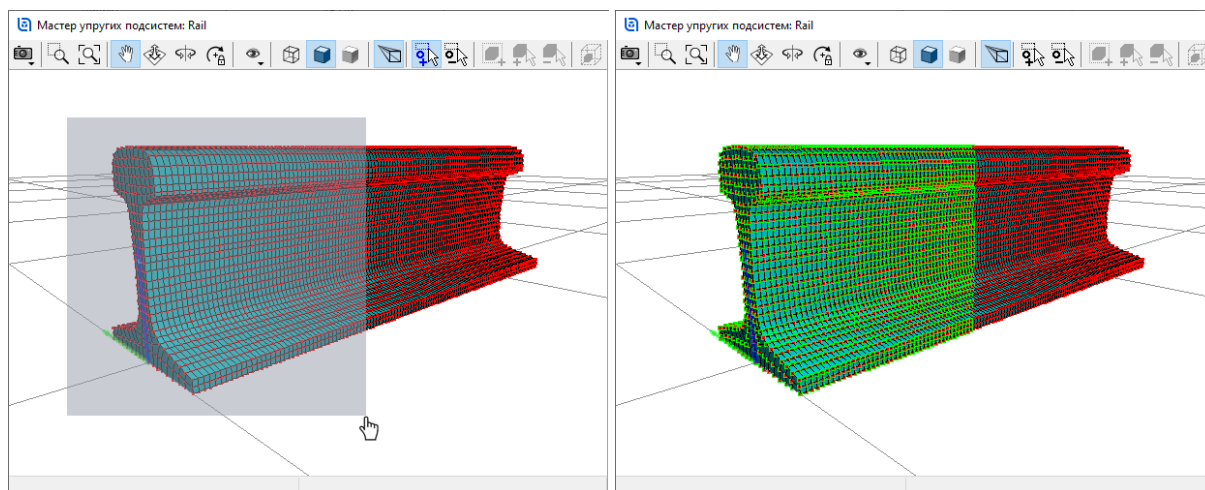


Рис. 1.115. Выделение группы узлов рамкой в анимационном окне (слева) и отображение результат выбора (справа).

### 1.4.2.2. Выбор конечных элементов

Конечные элементы можно выбирать по одному щелчком мыши, или группой с помощью рамки. Списки конечных элементов формируются для назначения им свойств, для создания переменных раскрашивания, если надо раскрасить не всю деталь, и в других случаях.

Выбор доступен, если активны следующие кнопки.



Выделить конечные элементы рамкой.



Выбрать конечные элементы по щелчку.



Отменить выбор конечных элементов по щелчку.

Для выделения рамкой необходимо нажать кнопку на панели, нажать левую кнопку мыши и, удерживая её, выделить прямоугольную область на экране, в которую попадают выбираемые элементы, после чего отпустить кнопку мыши (Рис. 1.116). Элементы, все узлы которых попали в выделенную область, будут добавлены в список. Режим выделения рамкой после этого деактивируется, кнопка на панели становится неактивной. Для следующего выделения надо повторить все действия.

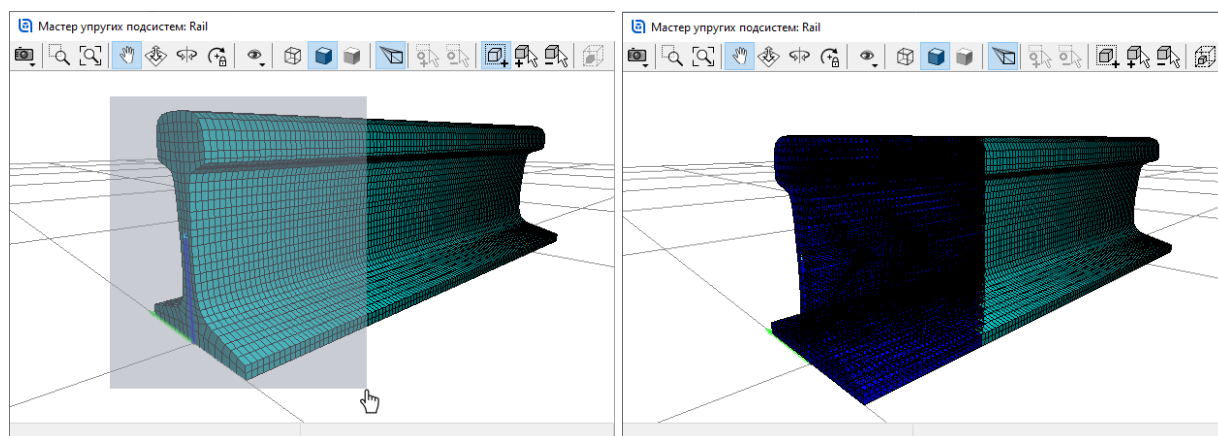


Рис. 1.116. Выделение группы конечных элементов рамкой в анимационном окне (слева) и отображение результат выбора (справа).

Режимы выбора и отмены выбора элементов по щелчку активируются нажатием соответствующей кнопки на панели, после чего можно добавить или удалить элемент из списка щелчком мыши по его изображению. Деактивируются режимы повторным нажатием кнопки на панели.

Режим отмены выбора рамкой пока не реализован.









### 1.4.3. Ввод свойств конечных элементов

Для расчёта динамических напряжений с помощью библиотеки конечных элементов УМ (см. п. 1.1.2.2) необходимо назначить свойства элементам, поскольку импорт свойств чаще всего недоступен. В УМ 10 можно ввести следующие свойства:

- изотропный материал для объемных (трёхмерных) конечных элементов;
- изотропный материал и постоянную толщину для элементов пластин и оболочек.

Если КЭ модель включает анизотропные материалы, расчёт напряжений в УМ будет некорректным.

Свойства вводятся с помощью вкладки **Свойства элементов** управляющего окна для групп элементов, которые могут включать от одного до всех элементов подсистемы, (Рис. 1.117). Панель сверху вкладки содержит следующие кнопки для ввода и редактирования свойств.

-  добавить свойство;
-  удалить свойство;
-  копировать свойство;
-  добавить материал из справочника – вызывает **Справочник материалов** (Рис. 1.118);
-  редактировать список элементов – открывает окно редактирования списка конечных элементов (Рис. 1.120).
-  прочитать свойства из файла \*.prp, в текущем решении свойства назначаются по номеру конечного элемента;
-  записать свойства в файл \*.prp;
-  записать упругую модель с измененными свойствами.

Комментарии.

1. ПК УМ содержит редактируемый справочник материалов, из которого может быть выбран один из элементов списка и назначен как свойство группе конечных элементов. Подробно работа со справочником описана в пункте 13.3.1.3.1, руководства пользователя к модулю расчёта усталостной долговечности.

2. Работа с окном редактирования списка конечных элементов описана ниже в пункте 1.4.4.

3. Запись и чтение свойств реализованы для быстрого их назначения одинаковым или похожим подсистемам. После ввода свойств одной подсистеме сохраняем их в файл \*.prp (properties – свойства), затем открываем похожую подсистему с неназначенными свойствами, переходим на вкладку **Свойства элементов** и читаем ранее записанный файл.

4. Модель с измененными свойствами записывается в исходный файл, перед этим создаётся резервный файл *input.fum.N*, где *N* – порядковый номер копии, например, *input.fum.1*.

5. Имя свойства редактируется после двойного щелчка мыши на соответствующем элементе списка **Свойства элементов**.

6. Если вся подсистема имеет одинаковые свойства, формировать группу конечных элементов не нужно, следует включить галочку **Все элементы**.

7. В группу могут входить элементы разных типов, параметр **Толщина пластины** для объёмных элементов игнорируется.

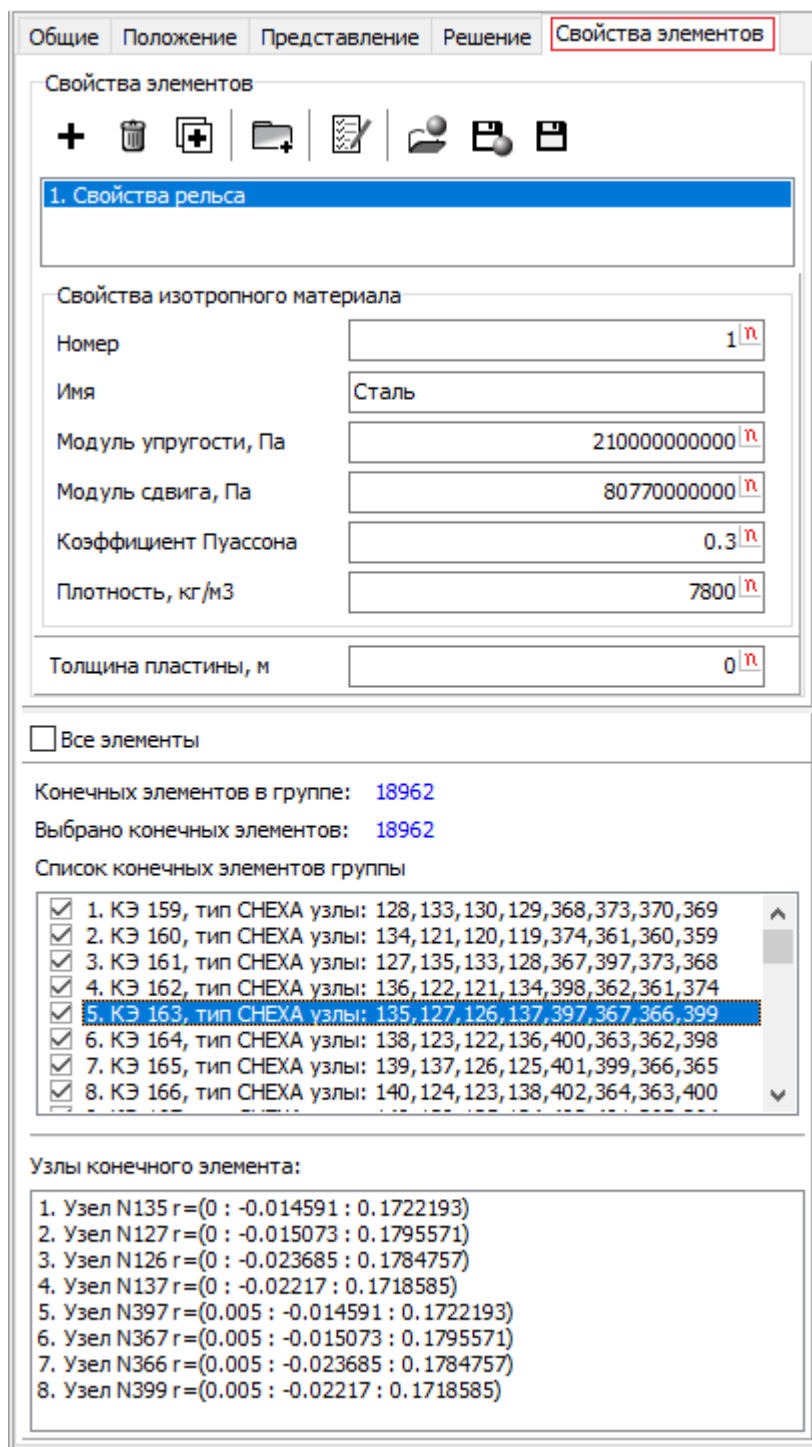


Рис. 1.117. Вкладка **Свойства элементов** управляющего окна.

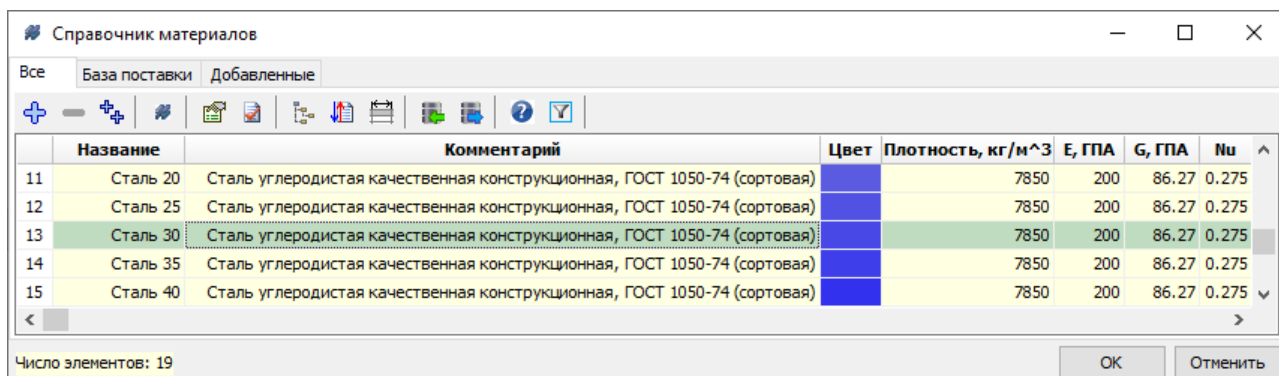


Рис. 1.118. Окно Справочника материалов UM.

### 1.4.4. Окно редактирования списка конечных элементов

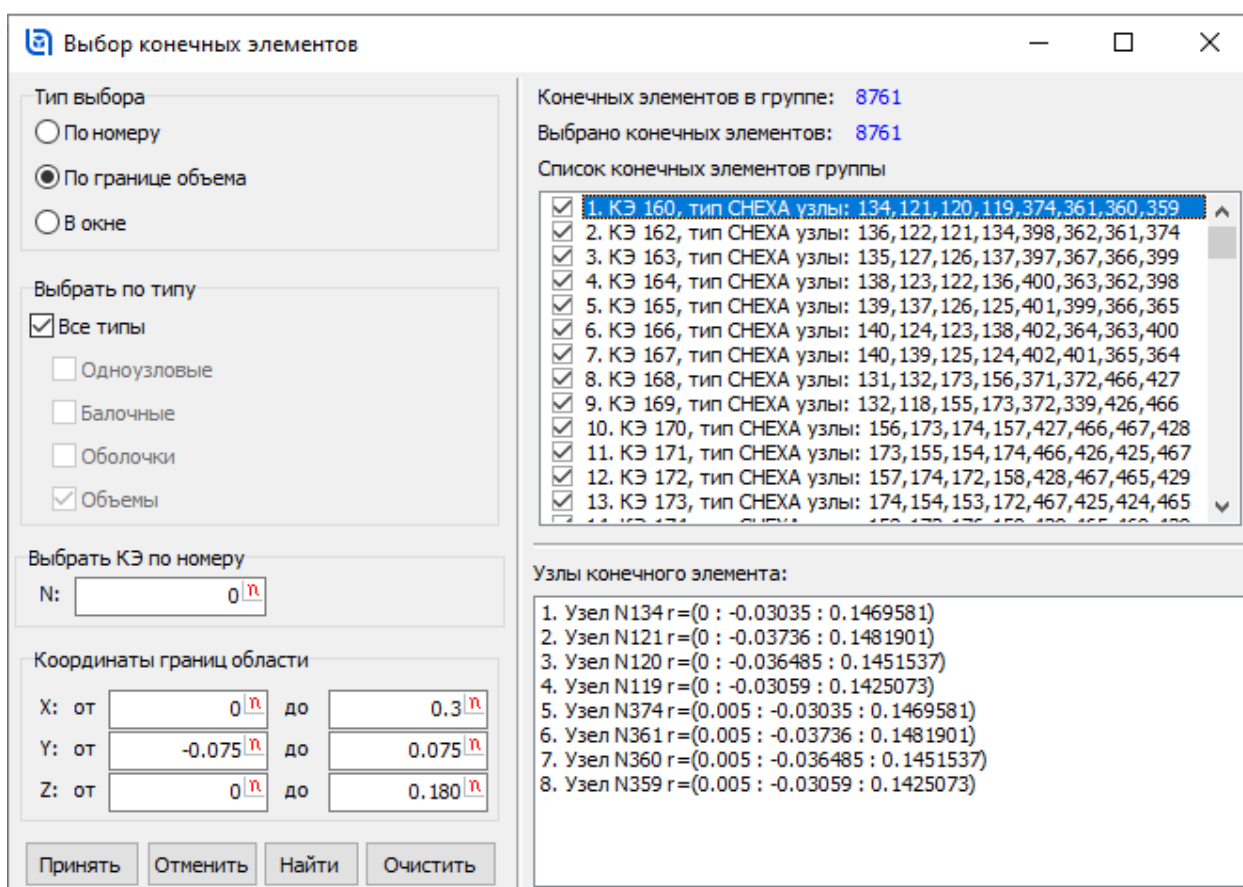


Рис. 1.119. Окно редактирования списка конечных элементов.

Конечные элементы можно выбирать одним из трёх способов, который задаётся текущим значением радиогруппы **Тип выбора**:

- По номеру;
- По границе объёма;
- В окне.

Для выбора по номеру нужно ввести номер элемента в поле **N** и нажать ENTER. Если подсистема содержит КЭ с таким номером, и он отсутствует в списке, то есть не был выбран ранее, он будет добавлен в список. В противном случае будет выдано сообщение.

При выборе варианта **По границе объема** поля **Координаты границ области** заполняются габаритами подсистемы – минимальными и максимальными значениями координат среди всех узлов. Эти значения определяют параллелепипед, грани которого параллельны осям координат подсистемы. Значение любого поля можно отредактировать, после чего следует нажать кнопку **Найти**. Найденные конечные элементы, не выбранные ранее, будут добавлены в список. Элемент выбирается, если все принадлежащие ему узлы лежат в заданном объеме – параллелепипеде.

Выбор может быть сделан с учётом размерности КЭ, фильтр задаётся группой галочек **Выбрать по типу**. Чтобы выбрать элементы определённых размерностей надо снять галочку **Все типы** и установить требуемые размерности.

Если задан тип выбора **В окне**, конечные элементы можно выбрать в анимационном окне как это описано в пункте 1.4.2.2.

#### 1.4.4.1. Контекстное меню списка конечных элементов группы

Контекстное меню (Рис. 1.120) вызывается правой кнопкой мыши. Пояснений требует только первый пункт меню **Показать текущий элемент в окне**. Он работает как включатель/выключатель, меняя состояние на противоположное при каждом выборе. При включенном пункте меню в окне выделяется текущий элемент списка, для него выключается контроль глубины. То есть он будет виден даже если находится внутри тела (Рис. 1.121).

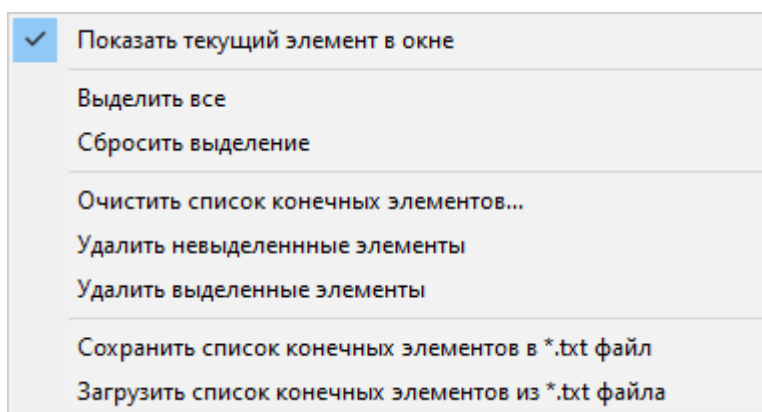


Рис. 1.120. Контекстное меню списка конечных элементов группы.

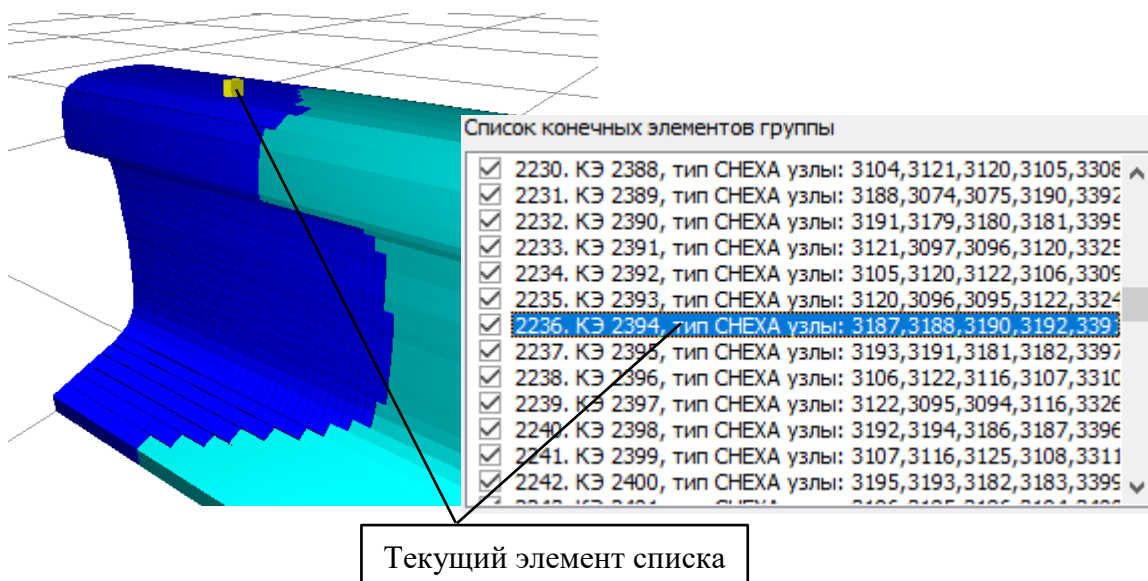


Рис. 1.121. Отображение текущего элемента списка группы.

### 1.4.5. Вкладка Решение управляющего окна

Опишем отличия текущей версии вкладки **Решение** (Рис. 1.122) от предыдущей (см. пункт 1.3.2.2).

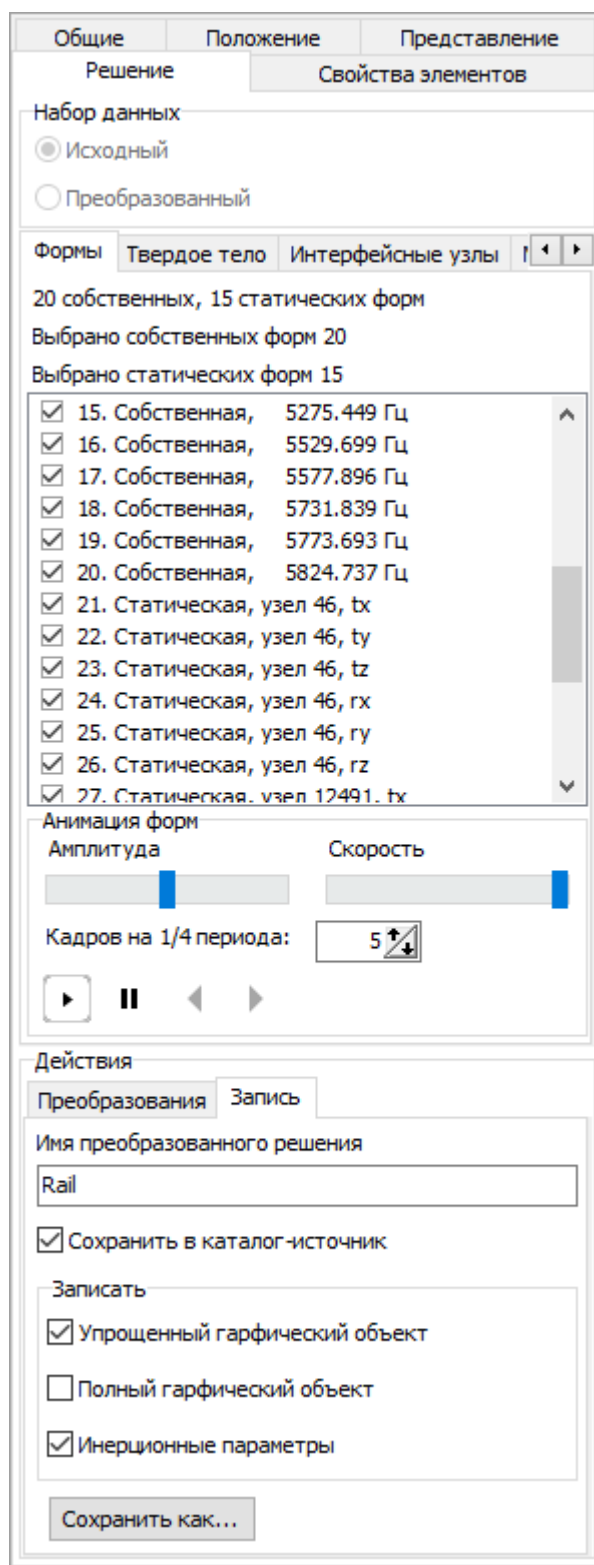


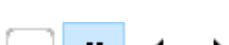


Рис. 1.122. Вкладка **Решение**.

1. Элементы списка форм, соответствующие статическим формам, содержат в наименовании номер интерфейсного узла и степень свободы, для которой они рассчитаны:  $t_x$ ,  $t_y$ ,  $t_z$  – поступательные,  $r_x$ ,  $r_y$ ,  $r_z$  – вращательные.

2. Появились кнопки управления анимацией форм. Вот их состояния и назначение.

	Анимация не запущена, старт по левой кнопке <b>Старт</b> .
	Анимация запущена, можно остановить левой кнопкой <b>Стоп</b> или поставить на паузу кнопкой <b>Пауза</b> , второй слева.
	Режим паузы, кнопками <b>Влево</b> , <b>Вправо</b> можно менять изображение покaдрово. Повторное нажатие кнопки <b>Пауза</b> возобновляет анимацию, левая кнопка <b>Стоп</b> – останавливает.

3. Графический объект и инерционные параметры подсистемы теперь можно записать по желанию пользователя в файл *input.fss* или *input.fum*. Для этого следует включить соответствующие галочки. В противном случае графический объект, как и раньше, будет рассчитан при первой загрузке подсистемы и записан в файл *grinfo.fss*, а инерционные параметры – при первом запуске интегрирования или линейного анализа и записаны в файл *inertia.fss*. Оба файла расположены в каталоге упругой подсистемы. Для больших подсистем упомянутые расчёты могут занять заметное время, поэтому кажется удобнее запускать их заодно с преобразованиями форм в **Мастере**. Заметим, что при этом размер файла *input.fss* увеличивается незначительно.

4. Кнопка **Сохранить как...** всегда доступна, позволяя записать файл *input.fum* с введенными свойствами, изменённым числом выбранных собственных форм без преобразований, добавить графический объект. Инерционные параметры рассчитываются только для преобразованного решения. Изменение данных не контролируется, то есть для исходной подсистемы доступна перезапись, например, в другой каталог.

### 1.4.6. Вкладка Представление управляющего окна

Вкладка изменилась внешне, управляющие элементы сгруппированы по-другому, при этом их функциональность осталась прежней. Актуальный вид вложенных вкладок показан на рисунке ниже.

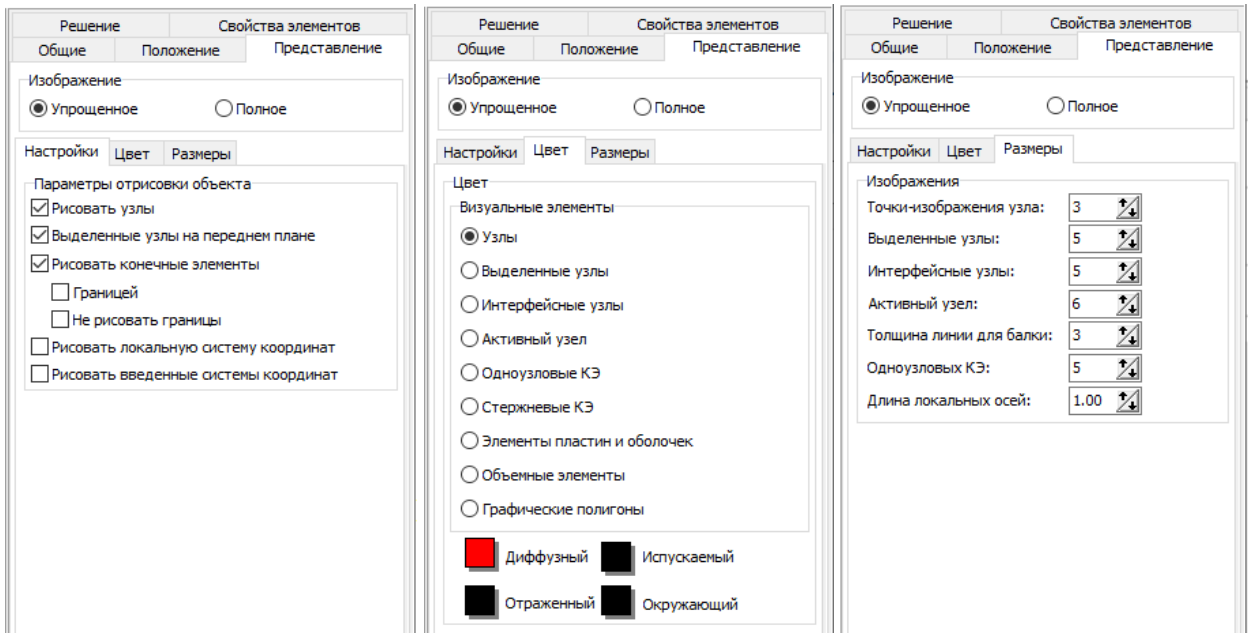



Рис. 1.123. Вкладка **Представление** управляющего окна.

## 1.5. Включение упругой подсистемы в составной объект

### 1.5.1. Добавление упругой подсистемы

Добавление упругой подсистемы в состав модели производится в среде конструктора объекта (программа **UM Input**). 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. 1.124) и выберите упругую подсистему с помощью появившегося диалогового окна (рис. 1.125). Элементами списка данного окна являются каталоги, содержащие файлы input.fss. Выбрав каталог, задайте имя подсистемы в поле **Имя**.

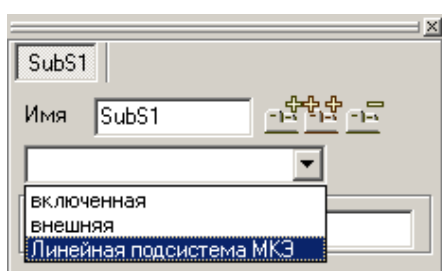


Рис. 1.124.

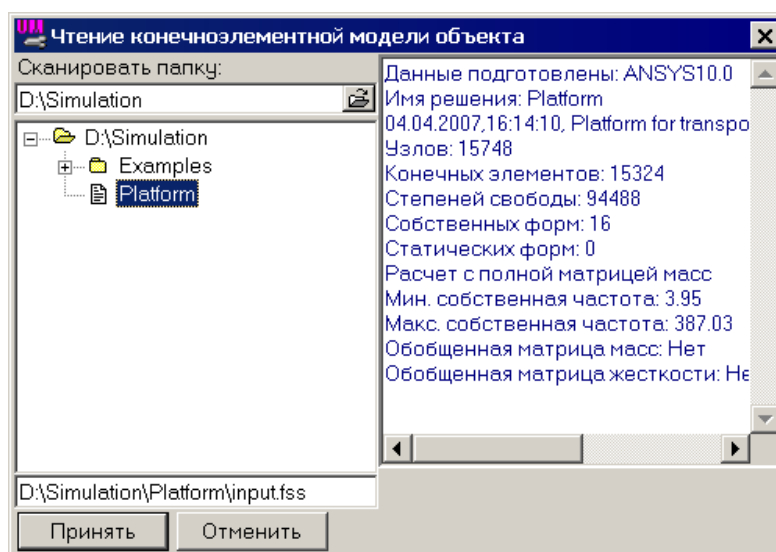


Рис. 1.125.

**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, по-

средством которых подсистема взаимодействует с другими частями объекта.

## 1.5.2. Диалоговое окно упругой подсистемы

После выбора файла упругой подсистемы из списка на панели инспектора появляется диалоговое окно, подобное окну мастера подготовки данных упругих подсистем (п. 1.3.2. "Управляющее окно", с. 1-93). Она содержит дополнительную вкладку **Системы координат**, остальные вкладки обоих окон имеют одинаковые названия. Опишем отличительные особенности каждой вкладки окна конструктора объектов.

### 1.5.2.1. Вкладка «Общие»

Вкладка **Общие** содержит следующие дополнительные поля (рис. 1.126).

- **Идентификатор** для присвоения подсистеме идентификатора, который используется при программировании в среде **УМ**. Правила задания идентификаторов описаны в п. *Идентификаторы*, [Глава 3](#) руководства пользователя.
- 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. 1.127) 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)

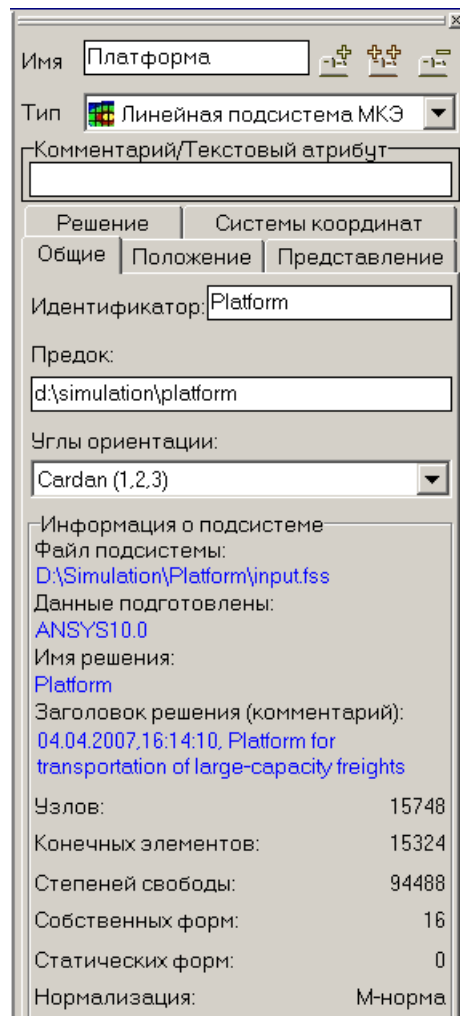


Рис. 1.126.

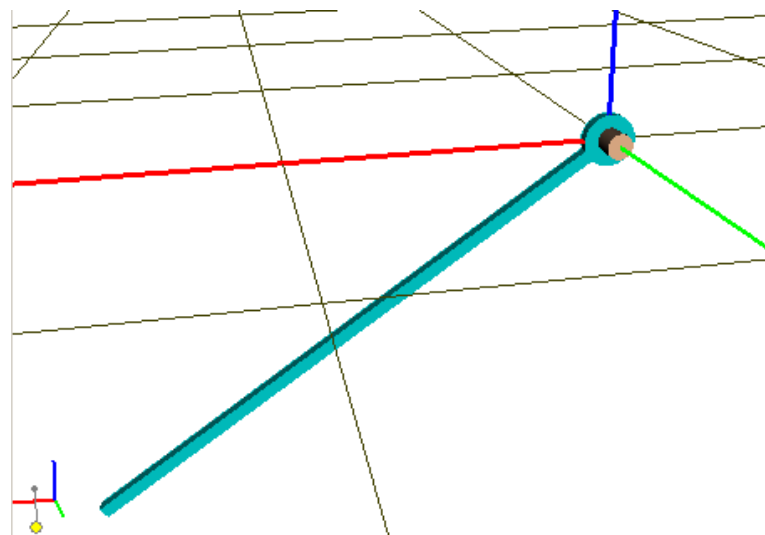


Рис. 1.127. Модель физического маятника

### 1.5.2.2. Вкладка «Положение»

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

### 1.5.2.3. Вкладка «Решение»

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

### 1.5.2.4. Вкладка «Представление»

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

**Примечание.** Настройка изображения конечноэлементной 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** окна упругой подсистемы.

### 1.5.2.5. Вкладка «Системы координат»

На данной вкладке можно задать системы координат (СК), связанные с упругой подсистемой. При этом фактически создаются ориентированные точки, описанные в п. *Добавление ориентированных точек связи* [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. 1.128).

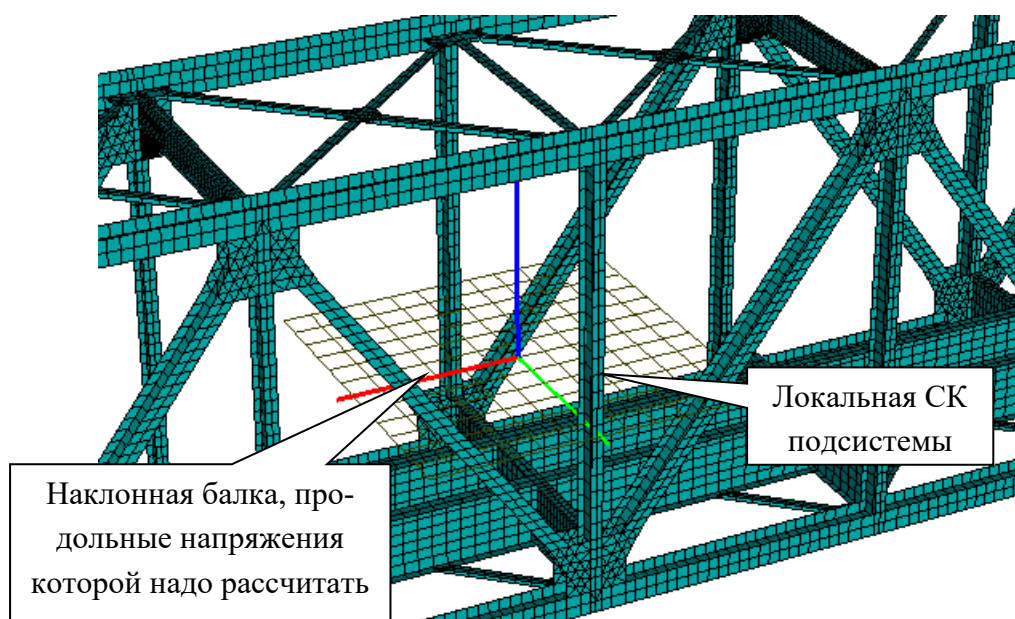




Рис. 1.128. К примеру использования систем координат. Фрагмент модели железнодорожного моста

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 окна подсистемы (рис. 1.130). Другой способ задания СК, «Получить по трем узлам», активизируется кнопкой . После ее нажатия в окне нужно последовательно указать конечноэлементные узлы соответствующие началу отсчета, направлению оси  $X$  и узел определяющий плоскость  $xy$ . Процесс задания СК в анимационном окне показан на рис. 1.130 слева, результат – справа. Направление оси  $x$  созданной системы координат совпадает с осью балки.

Теперь в Мастере переменных программы **UM Simulation** 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. 1.6.3.3. "Напряжения и деформации", с. 1-139.

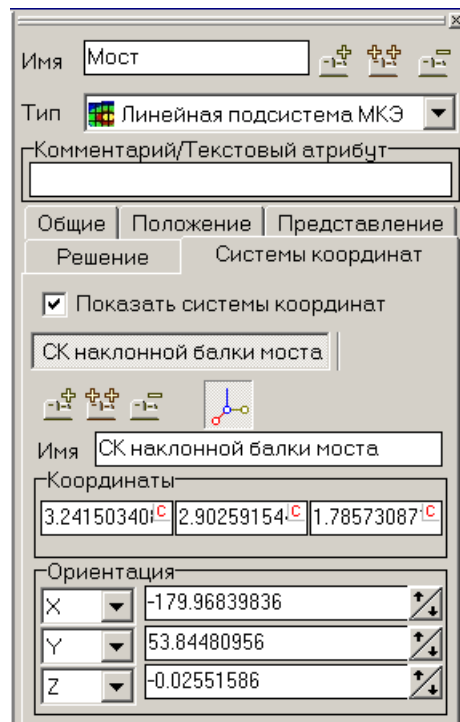


Рис. 1.129. Вкладка Системы координат на окне упругой подсистемы

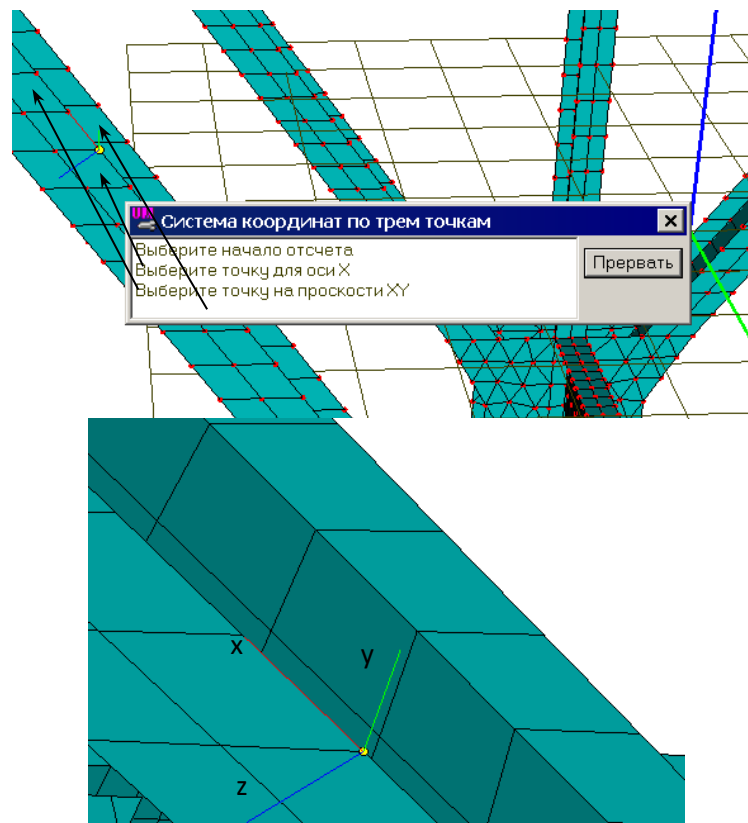


Рис. 1.130. Задание системы координат по трем точкам:  
слева показан выбор точек,  
справа – созданная система координат.

### 1.5.3. Особенности описания взаимодействий с упругой подсистемой

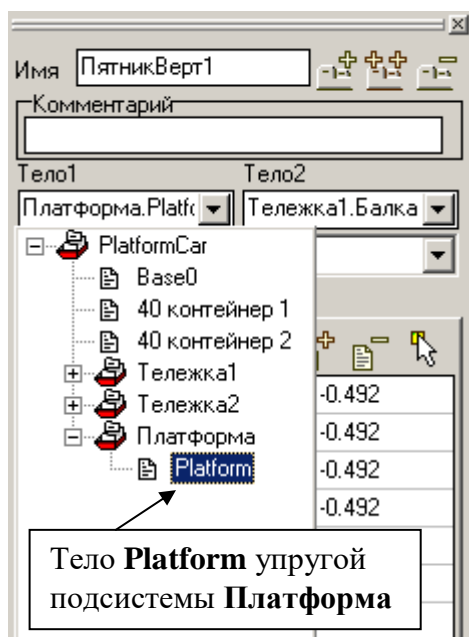


Рис. 1.131.

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.

Отметим следующие особенности.

- При описании шарнира, либо силового элемента одним из пары взаимодействующих тел выбирается фиктивное тело упругой подсистемы, которое имеет имя решения (рис. 1.131).
- 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 конечноэлементной схемой и задавать ее таким образом, что-

бы 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 в диалоговых окнах 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. 1.132).

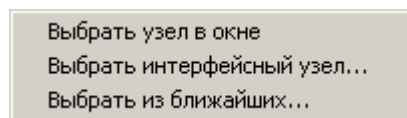


Рис. 1.132.

На рис. 1.133 изображено диалоговое окно, с помощью которой можно выбрать узел, ближайший к точке, координаты которой заданы в окне шарнира или силового элемента. Диалоговое окно 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**).

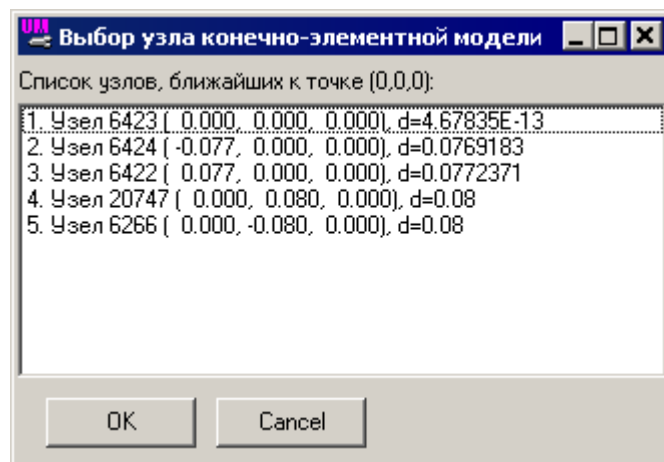


Рис. 1.133. Окно выбора узлов КЭ модели

- 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.

### 1.5.3.1. 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. *Контактный силовой элемент типа Точки-Плоскость* [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.

Контакт типа **Упругое тело-Упругое тело** (рис. 1.134). Математическая модель контакта построена на основе модели контакта типа точки-плоскость, описанной в п. *Тип точка-плоскость (точка – Z-поверхность)* [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. 1.135). Их значения рассчитываются по алгоритму, схема которого представлена на рис. 1.136. Момент силы в контакте отсутствует.

**Примечание.** Успешное моделирование контактного взаимодействия данного вида во многом определяется гладкостью поверхности второго тела, заданной конечноэлементной 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.

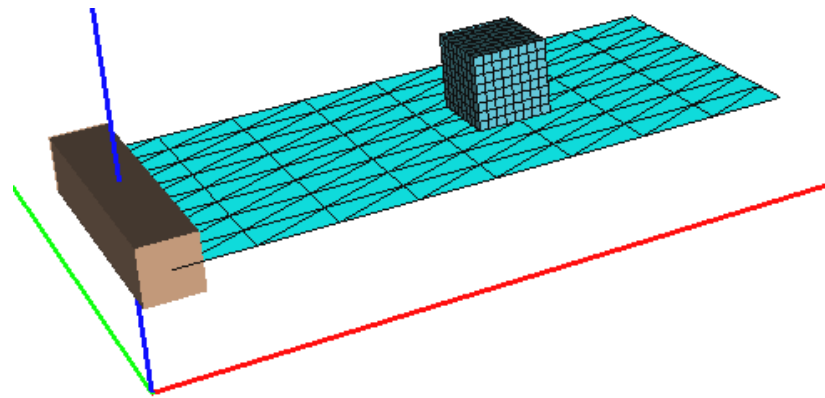


Рис. 1.134. Пример контакта двух упругих тел

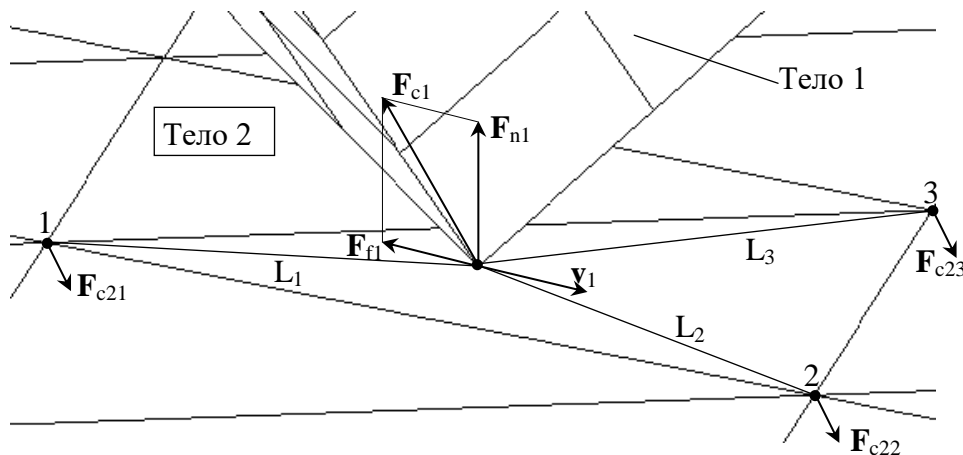


Рис. 1.135. К алгоритму расчета контактных сил.

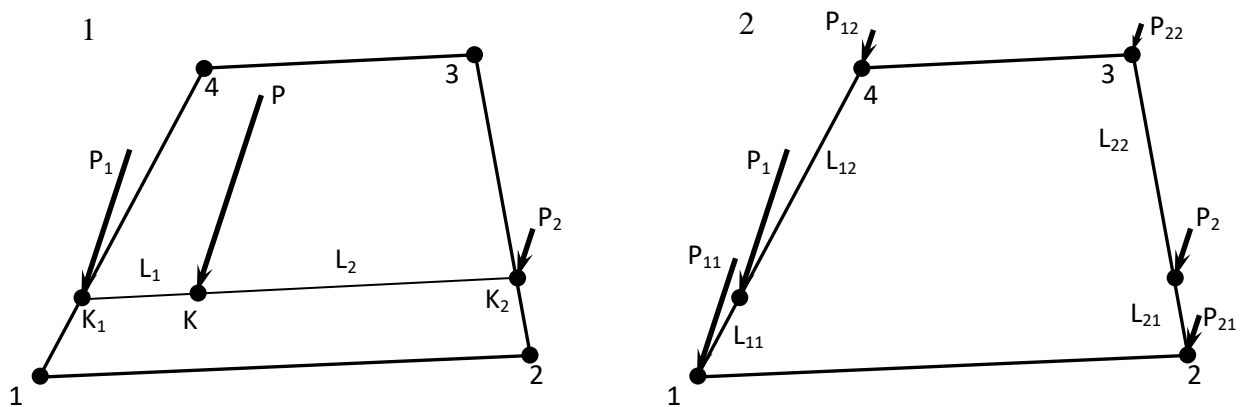


Рис. 1.136. Преобразование силы, приложенной в произвольной точке, к узловым силам.

Алгоритм преобразования силы, приложенной в произвольной точке поверхности, к узловым силам включает два этапа. На первом этапе сила  $\mathbf{P}$ , приложенная в точке  $\mathbf{K}$ , заменяется эквивалентной парой сил, приложенных в точках пересечения  $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{K}_2$ ; прямая  $\mathbf{K}_1\mathbf{K}_2$  параллельна стороне 1-2 полигона. На втором этапе сила  $\mathbf{P}_1$  заменяется эквивалентной парой сил  $\mathbf{P}_{11}$ ,  $\mathbf{P}_{12}$ ; сила  $\mathbf{P}_2$  – парой сил  $\mathbf{P}_{21}$ ,  $\mathbf{P}_{22}$ . При этом выполняются следующие соотношения:


$$P_1L_1 = P_2L_2, \quad P_{11}L_{11} = P_{12}L_{12}, \quad P_{21}L_{21} = P_{22}L_{22}.$$

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

Диалоговое окно контактного силового элемента типа **Упругое тело – Упругое тело** изображено на рис. 1.137.

Вкладка **Параметры**, одинаковая для всех типов контактных сил.

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 окно выбора узлов (рис. 1.109), которое вызывается кнопкой . Это окно может вызываться многократно, при этом узлы, выбранные ранее и узлы, выбранные в текущем сеансе, имеют различную маркировку (рис. 1.138).

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

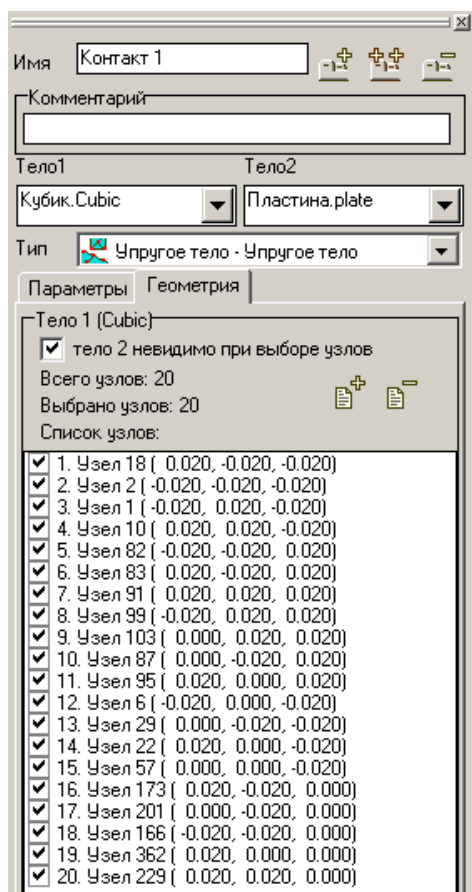


Рис. 1.137. Диалоговое окно контактного силового элемента типа Упругое тело – Упругое тело.

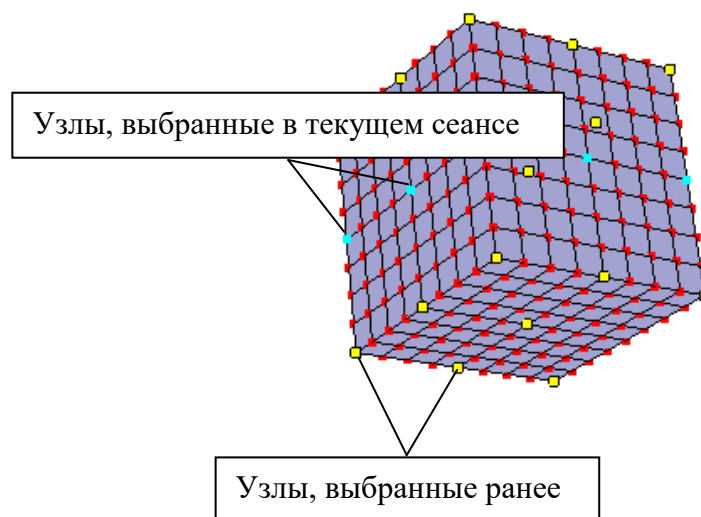


Рис. 1.138. Маркировка при выборе контактных узлов упругого тела

Рассмотрим пример моделирования взаимодействия упругого кубика (тело 1) с упругой консольно-защемленной пластиной (тело 2) (рис. 1.134). 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 При формировании уравнений движения в символьной форме выполните синтез и компиляцию уравнений ([Глава 3](#), п. *Синтез уравнений движения*), при численно-итерационном синтезе уравнений эти действия пропускаются. При отсутствии ошибок можно переходить к моделированию.

## 1.6. 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 **UM Simulation** 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. [Главу 13](#) руководства пользователя **UM**).

Рассмотрим назначение данных инструментов.

## 1.6.1. Специальные инструменты

### 1.6.1.1. Экспорт упругих перемещений в ANSYS

Для анализа напряженно-деформированного состояния упругой подсистемы в **UM** используется модальный подход, представленный соотношениями (1.6). 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 конечноэлементная 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 **UM Simulation**. 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. 1.7. "*Экспорт упругих перемещений в ANSYS*", с. 1-147.

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

- 1) Создать (загрузить ранее созданную) конечноэлементную 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 конечноэлементной 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).

### 1.6.1.2. 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 FEA** позволяет подготовить необходимые данные.

Напряжения в узлах конечного элемента с номером  $i$  рассчитываются по формуле 11.6. (см. п. 1.1.2. "Расчет напряжений и деформаций", с. 1-7):

$$\sigma_i^e = H_i^{e\sigma} w,$$

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

Модуль **UM FEA** 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 следующие поля:

- 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 конечноэлементной модели подсистемы;
- 7) число конечных элементов;
- 8) число модальных координат.

Пример файла tmc.

```
with FEASubSystem;
  ObjectName=PlatformCar;
  name=Platform;
  path=d:\Simulation\PlatformCar\platform_FEA;
```

```
PackDateSolution=20061007;  
PackTimeSolution=155059;  
NodesCount=15748;  
FECount=15324;  
MCCCount=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 окне инспектора моделирования (см. [Главу 4](#) п. *Общие параметры интегрирования* руководства пользователя). 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_FEA`.

Согласно сказанному выше, подготовим два файла input.fss с помощью мастера упругих подсистем. При создании модели в программе **UM Input** 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`.
- 3) 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.

## 1.6.2. Инспектор моделирования объекта

Если в составе модели есть упругие подсистемы, в окне инспектора моделирования появляется вкладка **Подсистемы МКЭ**, которая содержит панель и четыре подчиненные вкладки: **Общие**, **Моделирование**, **Представление** и **Решение** (рис. 1.139).

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. 1.5.2. *"Диалоговое окно упругой подсистемы"*, с. 1-119. Рассмотрим вкладку **Моделирование**.

### 1.6.2.1. Вкладка «Моделирование»

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

Вкладка **Настройки** содержит следующие управляющие элементы (рис. 1.139).

- 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.

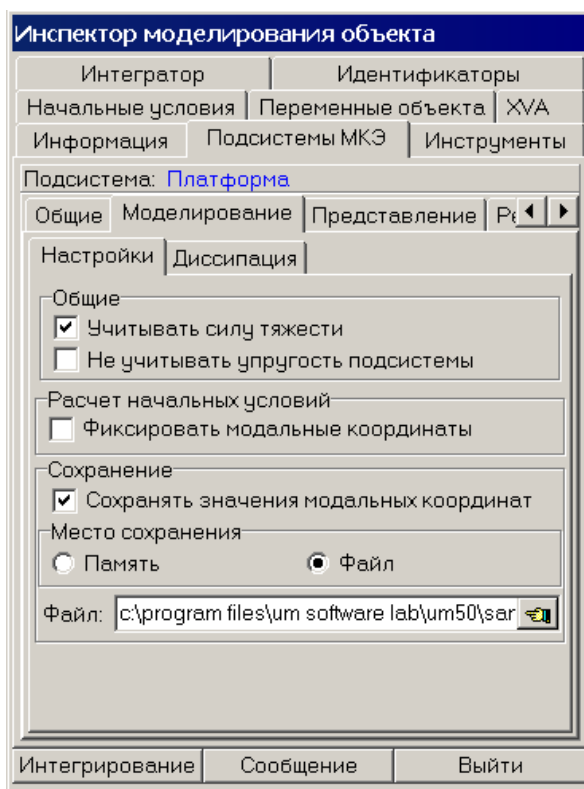



Рис. 1.139. Инспектор моделирования объекта программы **UM Simulation**

- 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. 1.6.1.1. "Экспорт упругих перемещений в ANSYS", с. 1-130, п. 1.6.1.2. "Подготовка данных для UM Durability", с. 1-131). 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 за-

дать, нажав клавиши Ctrl+ENTER клавиатуры, либо кнопкой  в окне. Каталогом хранения файла по умолчанию является каталог упругой подсистемы.

Вкладка **Диссипация** (рис. 1.140) 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.

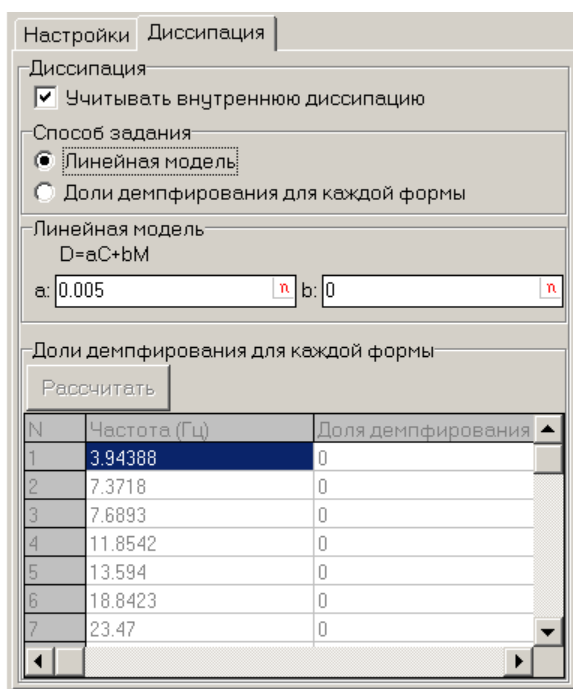


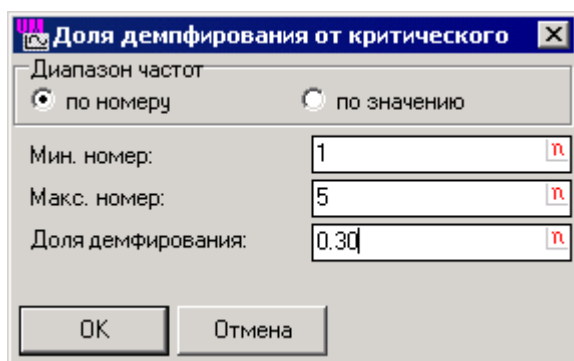
Рис. 1.140. Вкладка **Диссипация** формы упругой подсистемы, расположенной на инспекторе моделирования

- При выборе значения **Коэффициенты для каждой формы** появляется возможность задать диссипацию для каждой формы долей критического значения коэффициента демпфирования (рис. 1.141). Значение равное единице соответствует переходу от затухающего колебательного процесса к апериодическому.

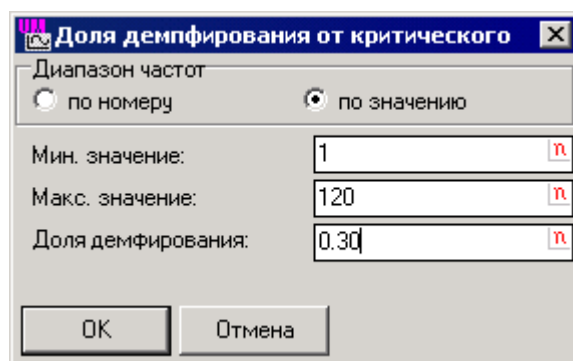
N	Частота (Гц)	Доля демпфирования
1	3.94388	0.3
2	7.3718	0.3
3	7.6893	0.3
4	11.8542	0.3
5	13.594	0.5
6	18.8423	0.5

Рис. 1.141. Задание коэффициентов демпфирования

Значение коэффициентов демпфирования для группы упругих форм, соответствующих выбранному диапазону частот можно задать с помощью диалогового окна, которое вызывается посредством всплывающего меню. При этом диапазон частот может выбираться по порядковым номерам (рис. 1.142, а), либо по значениям в Гц (рис. 1.142, б).



а)



б)

Рис. 1.142. 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. 1.139). В появившемся окне (рис. 1.143) задать значения коэффициентов **a** и **b** линейной модели диссипации и нажать кнопку **Рассчитать**. Рассчитанные коэффициенты отобразятся в правой части окна. При этом доступно редактирование значений коэффициентов.

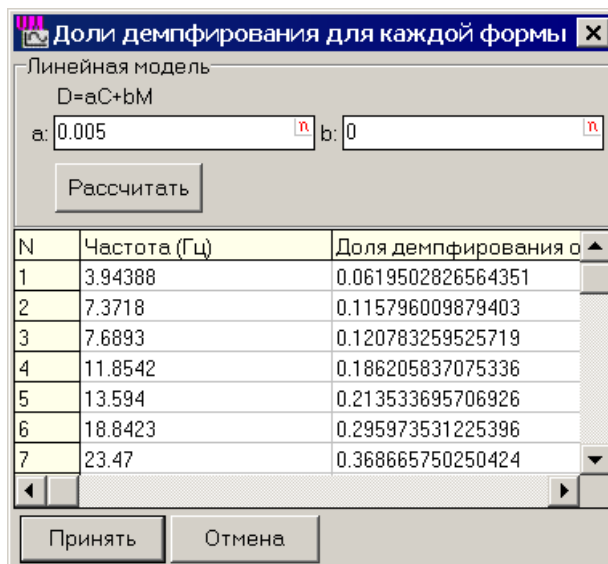


Рис. 1.143. Расчет коэффициентов демпфирования, соответствующих линейной модели диссипации

### 1.6.2.2. Вкладка «Представление»

Вкладка **Представление** идентична по назначению и составу управляющих элементов, соответствующим вкладкам мастера подготовки данных упругих подсистем и диалогового окна конструктора объекта (программа **UM Input**) и подробно описана в п. 1.3.2.3. "Вкладка «Представление»", с. 1-101.

### 1.6.2.3. Вкладка «Решение»

Вкладка **Решение** аналогична одноименной вкладке конструктора объекта, описание которой приводится в (п. 1.5.2.3. "Вкладка «Решение»", с. 1-121).

### 1.6.3. Работа с переменными

Для создания переменных используется мастер переменных (пункт главного меню **Инструменты | Мастер переменных**). Правила работы с ним описаны в [Главе 4](#) п. *Мастер переменных*. Здесь рассмотрим особенности, связанные с наличием упругих тел в составе объекта исследований.

#### 1.6.3.1. Координаты

В списке координат мастера переменных присутствует два элемента, соответствующих упругой подсистеме (рис. 1.144). 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.

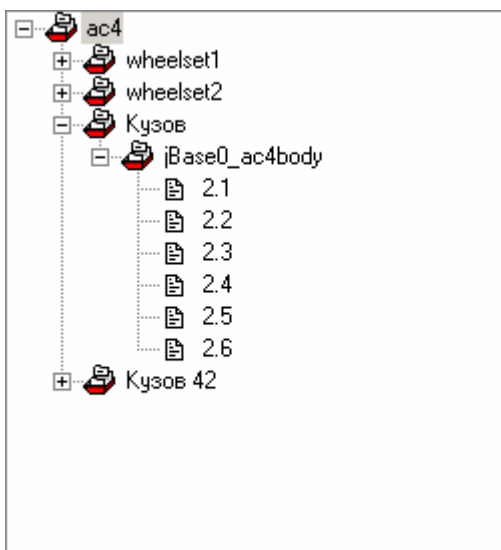


Рис. 1.144. Список элементов вкладки **Координаты** мастера переменных в программе **UM Simulation**

**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.

#### 1.6.3.2. Линейные переменные

При определении линейных переменных следует помнить о том, что кинематические характеристики движения: координаты, скорости и ускорения рассчитываются только для узлов конечноэлементной 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. 1.145. Если выбор подтвержден, выдается запрос на изменения комментария переменной: «Изменить комментарий в соответствии с координатами узла?».

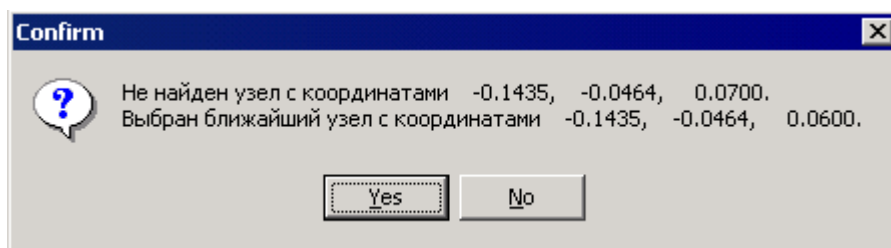


Рис. 1.145.

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

### 1.6.3.3. Напряжения и деформации

Переменные, используемые для исследования напряженно-деформированного состояния упругой подсистемы, создаются с помощью вкладки **Датчики МКЭ** мастера переменных (рис. 1.146).

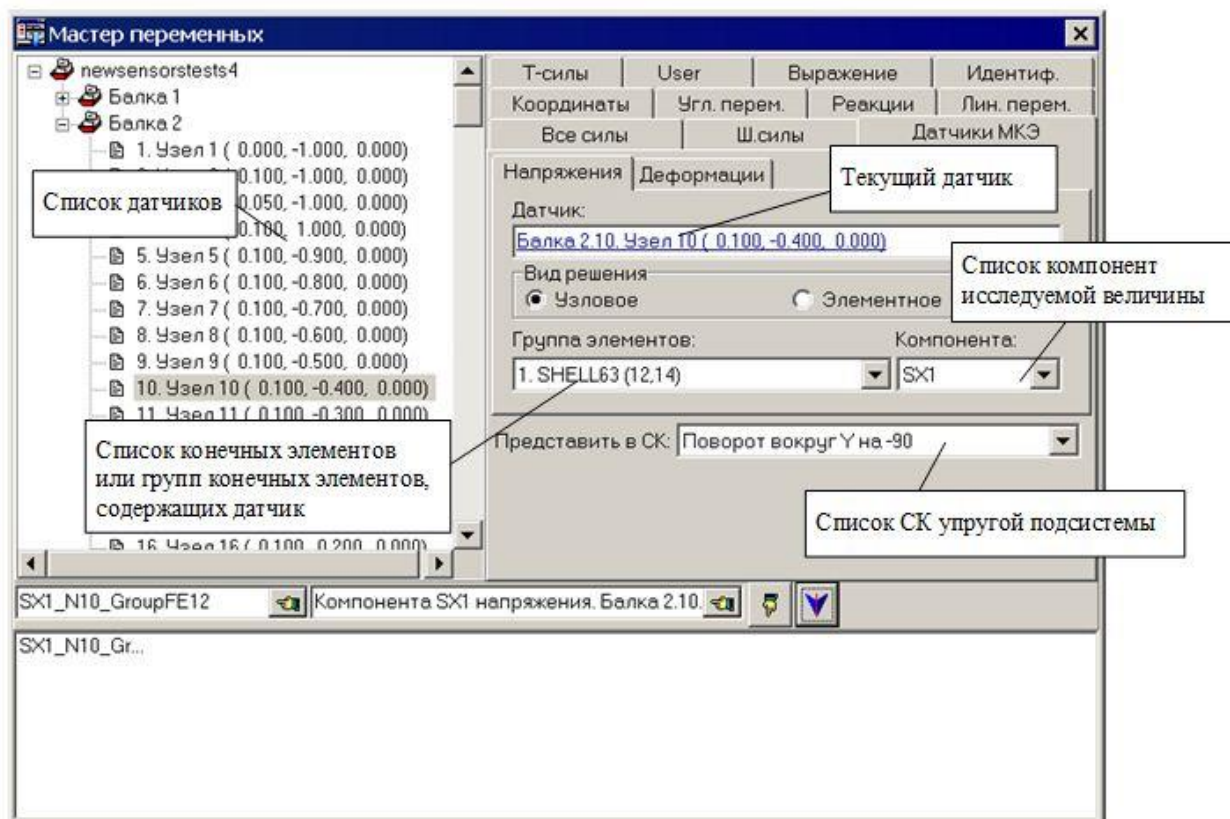


Рис. 1.146. Вкладка **Датчики** мастера переменных

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 п. 1.2.1.2. "Создание датчиков напряжений и деформаций", с. 1-18.

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. 1.146 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 диалогового окна, вызываемого из контекстного меню (рис. 1.147). 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.

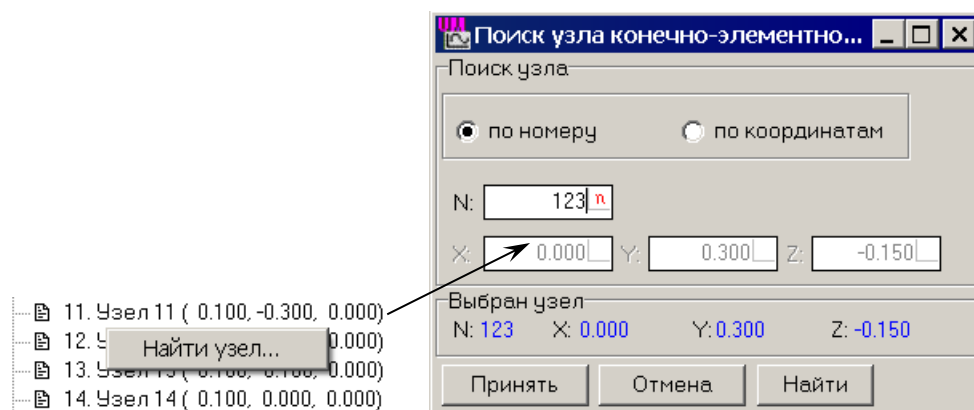


Рис. 1.147. Поиск датчика

- 3) Выбрать вид решения: **Узловое** или **Элементное**. Узловые решения рассчитываются как средние значения решений в элементах, содержащих данный узел (см. п. 1.1.2. "Расчет напряжений и деформаций", с. 1-7). 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) ко-

нечные 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. 1.146 представлен вид окна 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. 1.148. 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 конечноэлементного анализа, из которой импортированы данные.

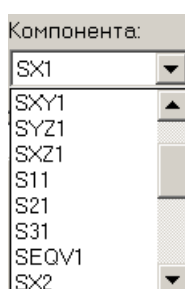




Рис. 1.148. Выпадающий список Компонента

Например, для программы **ANSYS** компоненты напряжений именованы **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.

### 1.6.3.4. Раскрашивание поверхности в соответствии с решением

Раскрашивание поверхности упругой подсистемы в соответствии со значениями решения в узлах конечноэлементной сетки – наглядный способ представить результаты расчётов. Например, он позволяет быстро выявить самые нагруженные зоны при анализе напряжённого состояния и давно применяется КЭ программами.

В УМ раскрашивание реализовано начиная с версии **2023** (10) с помощью переменных специального типа, которые создаются на вкладке **Раскрашивание КЭ подсистем Мастера переменных** (Рис. 1.149) и могут быть добавлены в списки переменных раскрашивания анимационных окон. Далее в этом пункте рассмотрим основные правила работы с переменными раскрашивания.

#### 1.6.3.4.1. Создание переменных раскрашивания

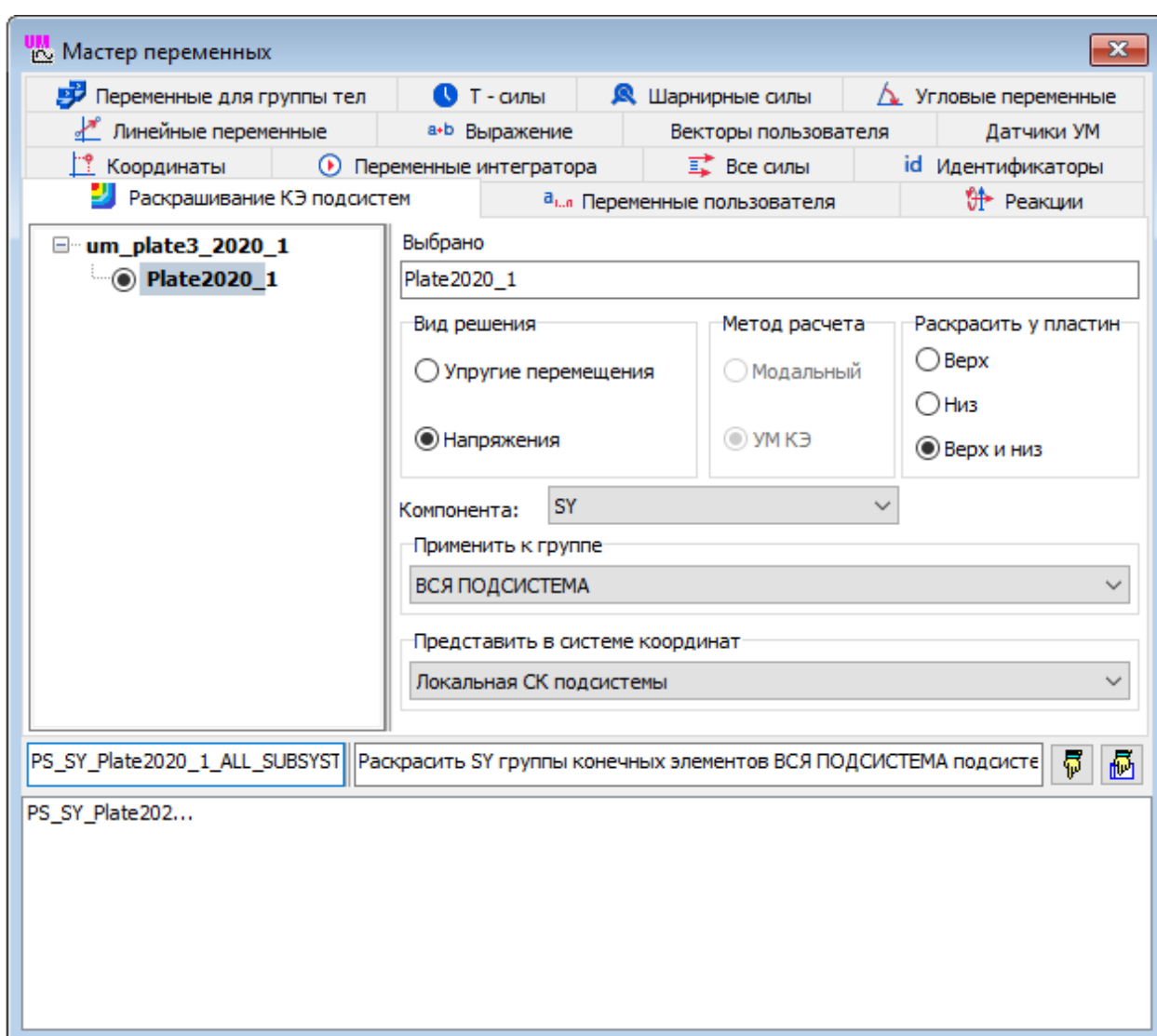


Рис. 1.149. Вкладка **Раскрашивание КЭ подсистем Мастера переменных**

Для создания переменной необходимо последовательно выбрать с помощью элементов экранного интерфейса следующие атрибуты.

1. **Подсистему** в дереве упругих подсистем (пример – **Plate2020\_1**).

2. **Вид решения.** Версия 2023 поддерживает следующие виды решений.
  - 2.1. **Упругие перемещения**, то есть перемещения в узлах за счёт деформаций относительно локальной системы координат без учёта «больших» движений.
  - 2.2. **Напряжения.**
3. **Метод расчёта.** Его можно выбрать только для напряжений в случае, когда подсистема содержит импортированные данные для их расчёта (см. пункт 1.1.2.1).
  - 3.1. **Модальный** – расчёт с применением импортированных данных.
  - 3.2. **УМ КЭ** – расчёт с применением библиотеки конечных элементов УМ (см. пункт 1.1.2.2).
4. Поверхность пластины (оболочки), для которой следует рассчитать напряжения; для перемещений выбор игнорируется (радиогруппа недоступна). В общем случае напряжения на верхней и нижней поверхностях, определяемых направлением нормали, разные. При выборе значений **Верх** или **Низ** в радиогруппе **Раскрасить у пластин** поверхности пластин будут раскрашены одинаково с двух сторон в соответствии напряжениям с выбранной стороны. При выборе **Верх и низ** поверхности пластин в новом анимационном окне будут раскрашены по-разному. Старое окно пока такую возможность не поддерживает, раскрашивание будет соответствовать напряжениям на верхней поверхности.
5. Компоненту решения.
  - 5.1. Компоненты перемещений: проекции X, Y, Z относительно выбранной системы координат (см. пункт 7 этого списка) или модуль перемещения |V|.
  - 5.2. Компоненты напряжений: компоненты тензора относительно выбранной системы координат – SX, SY, SZ, SXY, SXZ, SYZ; главные напряжения – S1, S2, S3; эквивалентные напряжения фон Мизеса – SEQV.
6. Группу узлов или конечных элементов, в области которых будет раскрашиваться поверхность подсистемы. Версия 2023 поддерживает только раскрашивание всей поверхности (то есть выбора нет или группа ВСЯ ПОДСИСТЕМА выбирается автоматически). В следующей версии будет реализована возможность создания групп – списков объектов и раскрашивание только выбранных областей.
7. В выпадающем списке **Представить в системе координат** выбрать ранее введенную для подсистемы СК (см. пункт 1.5.2.5), относительно которой будет представлен результат расчёта.

Автоматически создаваемый идентификатор переменной имеет следующие составляющие, соединенные нижним подчёркиванием «\_»:

- префикс «PS» – сокращение от **P**ainting **S**olution;
- компонент решения;
- имя подсистемы;
- имя группы.

Пример: PS\_SY\_Plate\_2020\_1\_ВСЯ ПОДСИСТЕМА.

В данном случае имя подсистемы включает подчёркивания – Plate\_2020\_1, а имя группы на рисунке выше отредактировано – заменено названием по-английски.

#### 1.6.3.4.2. Добавление переменных раскрашивания в список анимационного окна

Переменные раскрашивания могут быть добавлены в отдельный список анимационного окна путём перетаскивания их мышью из контейнера Мастера аналогично векторным переменным.

Видимость списка переменных раскрашивания настраивается с помощью контекстного меню окна, аналогично списку векторных переменных (Рис. 1.150).

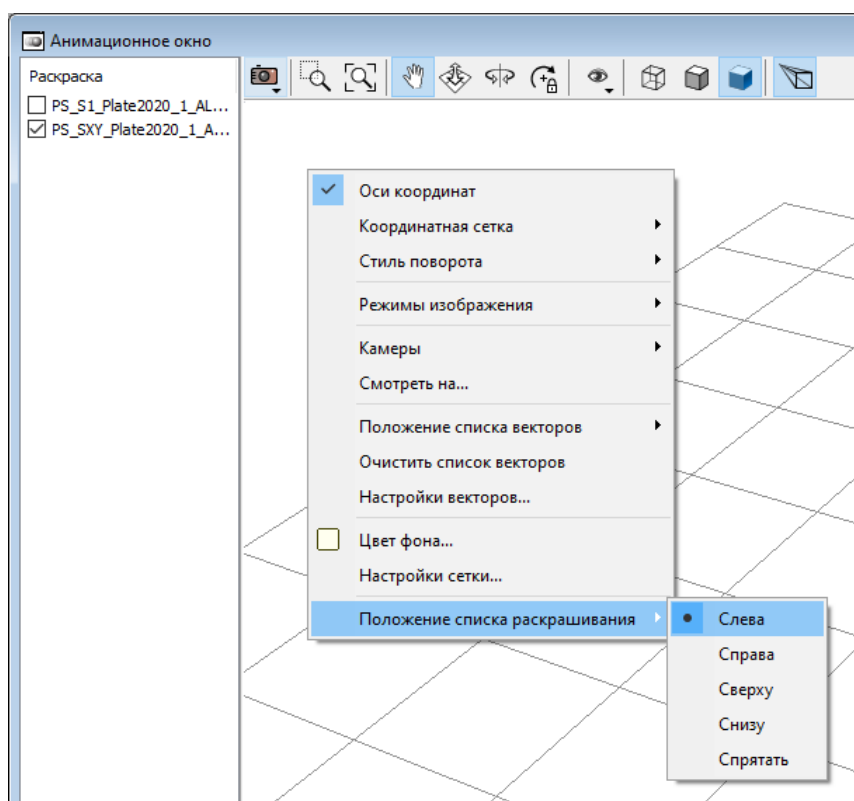


Рис. 1.150. Настройка видимости списка переменных раскрашивания в анимационном окне.

Видимость каждой переменной устанавливается галочкой на соответствующем элементе списка. Невидимые переменные на рассчитываются, то есть вычислительные ресурсы не расходуются, время вычислений не увеличивается.

**Примечание.** В текущей версии УМ держать более одной видимой (включённой) переменной в списке бессмысленно. Поскольку раскрашивается вся поверхность подсистемы, в конце шага анимации она будет иметь цвета, соответствующие последней включённой переменной списка, при этом рассчитываться будут все видимые переменные. Добавлять несколько переменных в список следует только для быстрого переключения между различными решениями с целью их оценки в данный момент времени. Чтобы

получить информацию об этих решениях одновременно, следует поместить видимые переменные раскрашивания в разные анимационные окна.

### 1.6.3.4.3. Настройка переменных раскрашивания

Переменные настраиваются с помощью формы, которая вызывается двойным щелчком мыши по элементу списка раскрашивания (Рисунок ниже).

Параметры раскрашивания

Предельные значения

Минимальное:	-2.1500E+0007
Максимальное:	2.1500E+0007
Последнее минимальное:	-9.1270E+0006
Последнее максимальное:	9.1270E+0006

Значения

Диапазон значений

Автоматически  Задать диапазон

Верхняя граница:

Нижняя граница:

Настройка цвета

Показывать узлы

Рис. 1.151. Форма настройки переменной раскрашивания.

Для раскрашивания применяется трёхцветная шкала. Цвет поверхности соответствует распределению значений решения в узлах на данном шаге интегрирования. Цвета выбираются с применением алгоритма, который настраивается с помощью радиогруппы **Диапазон значений**.

Если выбрана кнопка **Автоматически**, максимальному, минимальному и среднему арифметическому значениям присваиваются соответствующие цвета, заданные в группе **Настройка цвета**. Для значений, лежащих в диапазоне между минимальным и средним значением применяется следующий алгоритм.

1. Заданные минимальный и средний цвета представляются тремя числами в формате RGB (red, green, blue).
2. Обозначим минимальное значение  $min$  среднее –  $mean$ , значение в данном узле –  $vnode$ .
3. Вычислим коэффициент  $k = (vnode - min) / (mean - min)$ .
4. Цвет в узле в формате RGB получим по следующей формуле:

$$Red = Red_{min} + k \times (Red_{mean} - Red_{min})$$

$$Green = Green_{min} + k \times (Green_{mean} - Green_{min})$$

$$Blue = Blue_{min} + k \times (Blue_{mean} - Blue_{min})$$

Аналогичный алгоритм применяется для значений в диапазоне от среднего до максимального. Обратим внимание на то, что если у всех трёх цветов будет отсутствовать, например, зелёный цвет, то его не будет вообще в палитре раскрашенной поверхности.

Автоматический выбор диапазона значений не всегда приводит к наглядному представлению результатов. Например, если на поверхности есть концентратор напряжений, в районе которого сосредоточены близкие к максимальным значения, и при этом они на порядок, а то и на два выше среднего уровня напряжений в детали, поверхность будет раскрашена однотонно и небольшую область концентрации даже не сразу удаётся обнаружить. В этом случае приходится использовать другие инструменты, о которых скажем ниже.

Чтобы оценить распределение напряжений в подобных случаях, можно выбрать радиокнопку **Задать диапазон** и ввести значения **Верхней** и **Нижней границы**. Эти границы теперь будут играть роль максимального и минимального значений. Всем узлам со значениями меньшими нижней границы будет назначен цвет минимальных значений, со значениями, превышающими верхнюю границу – цвет максимальных. Для значений между верхней и нижней границами применяется описанный выше алгоритм.

Группа **Предельные значения** информирует о максимальных и минимальных значениях с начала интегрирования и на последнем шаге, помогая таким образом выбрать границы диапазона при «ручной» настройке.

Галочка **Показывать узлы** управляет видимостью узлов в режиме раскрашивания. При наведении мыши на узел в строке статуса отображается информация о значении решения в узле (Рисунок ниже).

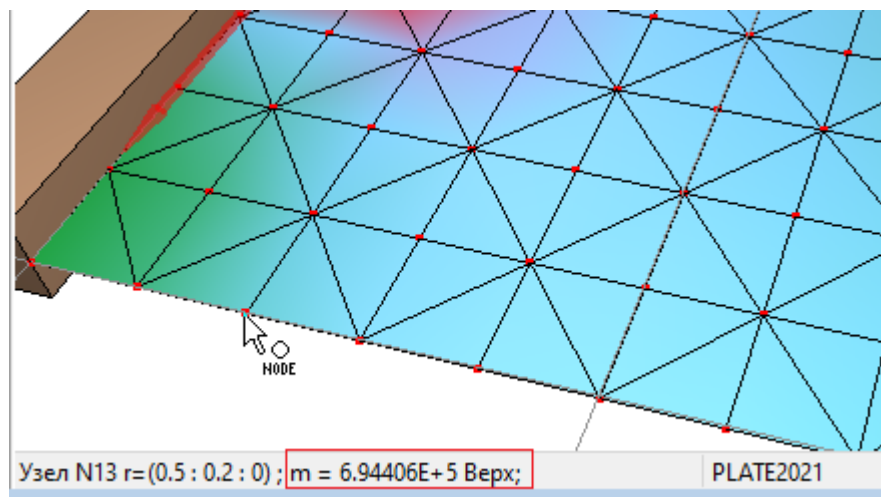



Рис. 1.152. Информация об узловом значении решения в статус-строке анимационного окна.

## 1.7. Экспорт упругих перемещений в ANSYS

Упругие перемещения экспортируются в ANSYS с помощью диалогового окна (рис. 1.154), которая вызывается кнопкой  панели инструментов программы **UM Simulation**. Если данная кнопка отсутствует, включите пункт Упругие подсистемы контекстного меню панели инструментов, чтобы сделать ее видимой (рис. 1.153).

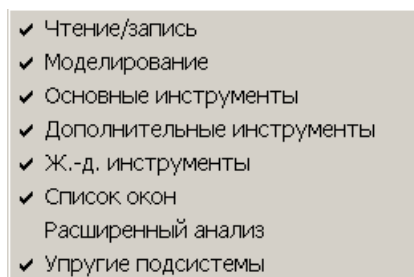


Рис. 1.153. Контекстное меню панели инструментов **UM Simulation**

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 окно экспорта нагрузки (рис. 1.154). Выбранные переменные перетащить мышкой в список переменных данного окна.
- 5) В выпадающем списке **Подсистема** выбрать упругую подсистему, для которой формируется файл нагрузки.

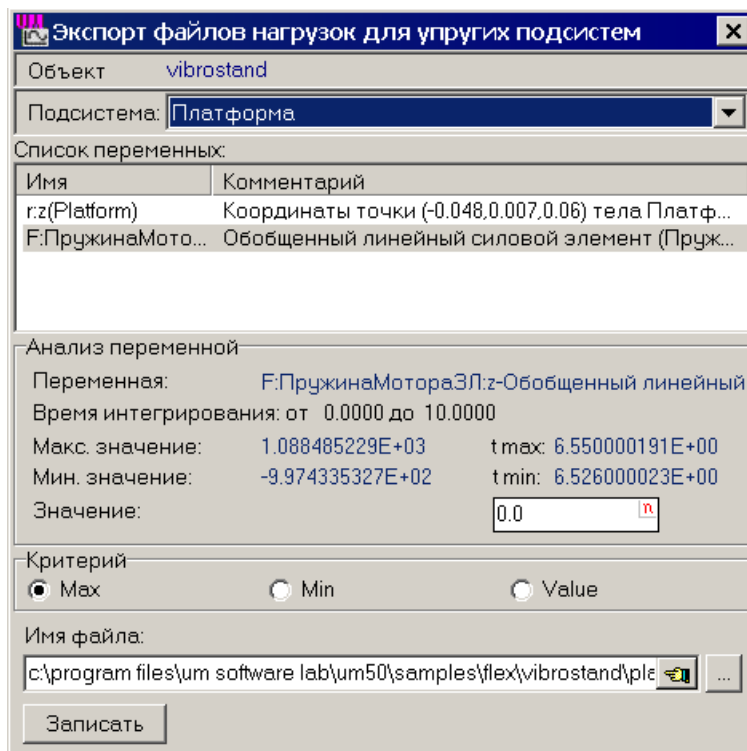


Рис. 1.154. Формирование файла нагрузки ANSYS


- 6) Выбрать переменную в списке переменных окна 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 пере-

менной 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.

## **1.8. Литература**