

## Раздел 7

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТЕЛ. ДИНАМИКА

Основные теоретические сведения о динамических краевых задачах про НДС тел приведены в Приложении 7.

### 7.1 Общие сведения относительно моделирования динамических краевых задач

В среде NX Nastran матрицы основного уравнения динамического процесса (П7.11) формируются с использованием таких данных:

- матрица жесткости тела  $[K]$  – об упругих характеристиках материала (как и в статическом анализе);
- матрица масс  $[M]$  – о массе материала (через плотность материала „**Mass Density**”); о неконструктивной (дополнительную) массе КЭ „**Nonstructural Mass**” (см. Раздел 3.2); о сосредоточенной массе КЭ типа **MASS** и **MASS MATRIX** (см. разделы П3.4.1 и П3.4.2 Приложения 3);
- матрица вязкого демпфирования  $[C]$  – о коэффициенте конструкционного демпфирования материала „**Damping**”  $G = 2C/C_o$  (см. Раздел 3.1), который определяется при резонансной частоте (здесь  $C$  – коэффициент эквивалентного вязкого демпфирования материала); об общем коэффициенте демпфирования КЭ (типов **SPRING**, **DOF SPRING** и **LAMINATE**); об общем коэффициенте конструкционного демпфирования тела  $G$ .

Демпфирование есть смысл учитывать не всегда, а при:

- колебаниях тел при частотах вынуждающих сил, приближающихся к резонансным;
- при моделировании переходных процессов колебаний тел, которые длятся значительно дольше, чем период колебаний тела.

### 7.2 Задание общих параметров динамических расчетов

Поскольку для разных динамических задач могут использоваться одинаковые диалоговые панели и назначения на них, то такие специфические сведения изложены в этом разделе.

Только для динамических расчетов всем типам факторов, что задаются на диалоговой панели „**Create Loads on ...**” (см. рис.4.3-а) как граничные условия, можно назначить такую дополнительную характеристику, как *фазу* колебаний. Фазу можно задавать или как постоянное значение, или как зависимое от функции типа **1..vs. Time** или **3..vs. Frequency**.


**Внимание:** если в одной степени свободы узла (**DOF**) будут назначены несколько ГУ, зависящих от функций типа **1..vs. Time**, **2..vs. Temperature** или **3..vs. Frequency**, с *несогласованными* характеристиками, то при преобразовании ГУ к элементам конечно-элементной сетки (КЭС) (см. Раздел 4.1.4.6) или при запуске процесса решения задачи появится сообщение с просьбой согласовать ГУ. Если от этого отказаться, можно получить такие варианты реагирования FEMAP и Nastran: игнорирование некоторых назначений или фатальную ошибку, т.е. неудовлетворительный результат.

#### 7.2.1 Диалоговая панель „Load Set Options for Dynamic Analysis”

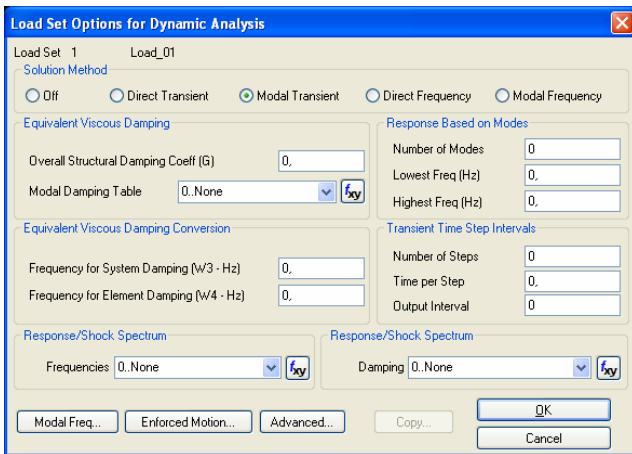
Для всех типов динамических задач нужно командой **Model→Load→Dynamic Analysis...** вызвать диалоговую панель „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (см. рис.7.1-а).

В секциях этой панели указывается:

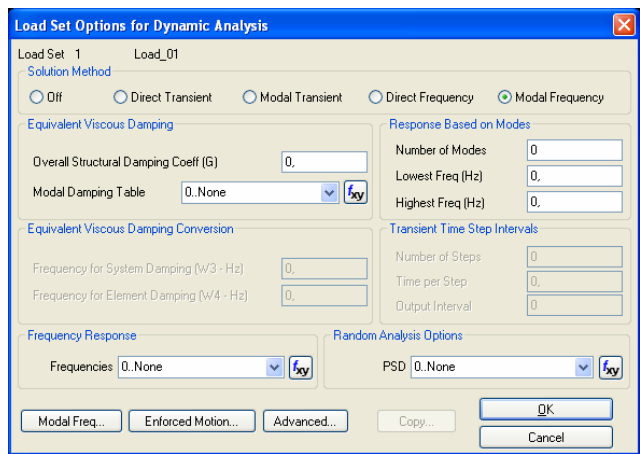
- в „**Solution Method**” – метод решения задачи: прямой (**Direct Transient**) или модальный (**Modal Transient**) переходной (эволюционный) анализ; прямой (**Direct Frequency**) или модальный (**Modal Frequency**) частотный анализ, гармоническое возбуждение;

- в „**Equivalent Viscous Damping**” (эквивалентное вязущее демпфирование) – общий коэффициент конструкционного демпфирования (**Overall Structural Damping Coeff (G)**) или в диалоговом окне „**Modal Damping Table**” выбирается (для создания есть кнопка ) таблица коэффициентов демпфирования (для каждой моды уравнения (П7.29) для методов разложения по формам собственным колебаний, т.е. „**Modal Transient**” и „**Modal Frequency**”). Коэффициент **G** можно не задавать, если его задано для всех КЭ как свойство материала КЭ, или можно задать как дополнительную величину к заданному для материала значению;

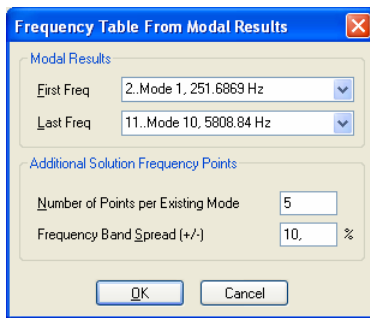
- в „**Equivalent Viscous Damping Conversion**” (превращение в эквивалентное вязущее демпфирование) – частота  $\omega$  (в герцах) для преобразования: общего коэффициента **G (Frequency for System Damping (W3 – Hz))** или заданных в свойствах материала (см. табл.3.1 и рис.3.2-а) КЭ (**Frequency for Element Damping (W4 – Hz)**) по формуле  $G = (2C / C_o) \cdot (\omega / \omega_o)$ , где  $\omega_o$  – частота собственных колебаний. Обычно  $\omega$  задают близкой к первой собственной частоте;



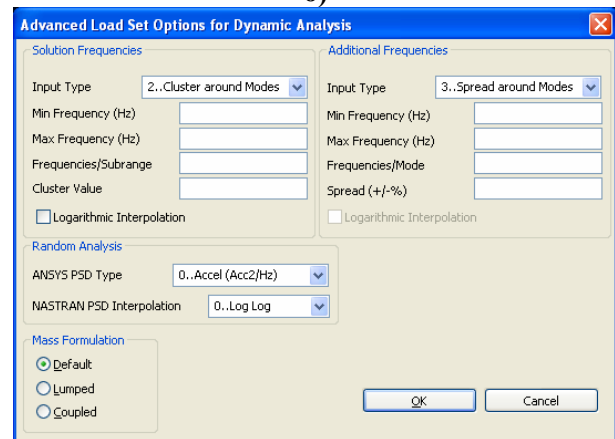
а)



б)



в)




г)


Рис.7.1. Диалоговые панели: а), б) – задания опций и параметров динамического анализа; в) – формирования таблицы собственных и дополнительных частот колебаний; г) – назначения дополнительных параметров


- в „**Response Based on Modes**” (отклик, основан на формах собственных колебаний; для методов **Modal ...**) – количество форм собственных колебаний, которые будут использоваться для расчетов отклика (**Number of Modes**) или (как альтернатива) соответствующий частотный диапазон: нижнее (**Lowest Freq (Hz)**) и верхнее (**Highest Freq (Hz)**) значение;

- в „**Transient Time Step Intervals**” (интервал и шаг расчета, для методов **... Transient**) – количество шагов (**Number of Steps**), временной шаг (**Time per Step**) и интервал для вывода результатов (**Output Interval**) в форме множителя к шагу расчетов (если 0 или 1 – вывод на каждом шаге, если целое число  $N > 1$  – через  $N$  шагов);

- в (левом) „**Response/Shock Spectrum**” (спектр отклика/удара, для методов **... Transient**, см. рис.7.1-а) или в „**Frequency Response**” (частотный спектр, для методов **... Fre-**

quency, см. рис.7.1-б) в поле „Frequencies” можно выбрать (для создания есть кнопка ) таблицу частот (как функцию типа **3..vs. Frequency**, причем используются только значения параметра **X** таблицы). Если предварительно был сделан расчет собственных частот колебаний тела, то такую таблицу можно создать автоматически, поскольку станет активной электронная кнопка „Modal Freq...” (собственные частоты). Она вызывает диалоговую панель „Frequency Table From Modal Result” (см. рис.7.1-в), где можно сформировать таблицу частот собственных колебаний и (в их окрестности) дополнительных частот колебаний (выбрать диапазон частот (первая – „First Freq” и последняя – „Last Freq”), в поле „Number of Points per Existing Mode” указать количество точек в окрестности каждой собственной частоты, в поле „Frequency Band Spread” – ширину частотной полосы в % от абсолютного значения соответствующей собственной частоты). Созданную таблицу целесообразно просмотреть с помощью команд **Modify**→**Edit**→**Function...** (как таблицу) или **View**→**Select...** (как график). Эта таблица используется для построения амплитудно-частотной характеристики модели или для задания собственных частот осцилляторов малой массы, которые связаны с данной точкой конструкции для оценки спектрального отклика при сейсмических или ударных влияниях;

- в (правом) „Response/Shock Spectrum” (для методов ... **Transient**, см. рис.7.1-а) в поле „Damping” можно выбрать (для создания есть кнопка ) таблицу коэффициентов демпфирования осцилляторов (как функцию типа **3..vs. Frequency**);

- в „Random Analysis Options” (расчет случайных колебаний, для методов ... **Frequency**, см. рис.7.1-б) можно задать закон основного движения в форме таблицы (как функции типа **3..vs. Frequency**, для создания есть кнопка )

Электронной кнопкой „Advanced...” можно вызвать диалоговую панель „Advanced Load Set Options for Dynamic Analysis” (см. рис.7.1-г) для назначения дополнительных параметров анализа. В секции „Mass Formulation” можно выбрать один из вариантов описания матрицы масс: „Default”, „Lumped” (сосредоточенная) или „Coupled” (присоединенная). В секции „Solution Frequencies” (только для методов ... **Frequency**, см. рис.7.1-а) можно назначить диапазон вычисления собственных частот („0..Default/List”, т.е. по умолчанию; или „1..Frequency Range”, т.е. диапазон частот: „от и до”, а также общее их количество; или „2..Cluster around Modes” (внутренняя команда **FREQ3**), т.е. амплитудный диапазон частот (**Cluster Value**) вокруг частоты с указанным номером (**Frequencies/Subrange**); или „3..Spread around Modes” (внутренняя команда **FREQ4**), т.е. расстояние (+, – или в процентах) от частоты или формы колебаний с указанным номером (**Frequencies/Mode**)), а также установить опцию „Logarithmic Interpolation” (логарифмическая интерполяция). О назначениях в секции „Random Analysis” – в Разделе 7.3.4.

**Примечание 7.1.** Кроме **FREQ3** и **FREQ4** в NX Nastran еще есть и другие варианты (от **FREQ** до **FREQ5**). С помощью инструментов, описанных в Разделе 4.2.3, можно задать одну из них или любую их комбинацию с нужными параметрами.


С помощью электронной кнопки „Enforces Motion...” можно подключить к телу значительную массу, которая вибрирует или движется по другому закону (см. Раздел 7.3.3), а кнопки „Copy” – скопировать все назначения из другой модели, если она есть.

### 7.2.2 О применении граничных условий типа „несжимаемая жидкость”

В Разделе 6.1.3.4 были рассмотрены граничные условия типа „несжимаемая жидкость” для статической краевой задачи. Однако такие граничные условия можно применять и для динамических задач. Кроме описанных в Разделе 6.1.3.4 назначений, для динамического анализа (для задач: **103**, **107**, **110** (**2..Normal Modes / Eigenvalue**), **109** (**3..Transient Dynamic / Time History** и **5..Response Spectrum**), **108** (**4..Frequency/Harmonic Response**), **111** (**4..Frequency/Harmonic Response** и **6..Random Response**) и **112** (**3..Transient Dynamic / Time History**) – см. табл.4.2) есть такой дополнительный вариант. Если отключить опцию „Z Free Surface OFF” (см. рис.6.9-а), а опции „XY Plane” и „YZ Plane” не будут установлены в „Antisymmetry”, то NX Nastran 7.1 воспринимает „несжимаемую жидкость” как „внешнюю

жидкость” (**external fluid**). При этом необходимо применить систему координат с началом, как можно более близким к геометрическому центру объема „несжимаемой жидкости”.

### 7.2.3 Роторный регион

В SPLMS.Fv10.2.0 есть такой тип динамического объекта, как роторный регион (**Rotor Region**), который создается с помощью диалоговой панели „**Rotor Region**” (см. рис.7.2), вызываемой командой **Connect→Rotor Region** или кнопкой . Этот тип нагрузки может быть применен для краевых задач (см. табл.4.2) типа 110 (**2..Normal Modes/Eigenvalue**, вариант **Modal Complex Eigenvalues** – может иметь до 10 роторов включительно) и 111 (**4..Frequency/Harmonic Response** – только один ротор). NX Nastran определяет собственные комплексные значения для каждой скорости вращения ротора, учитывающие демпфирование

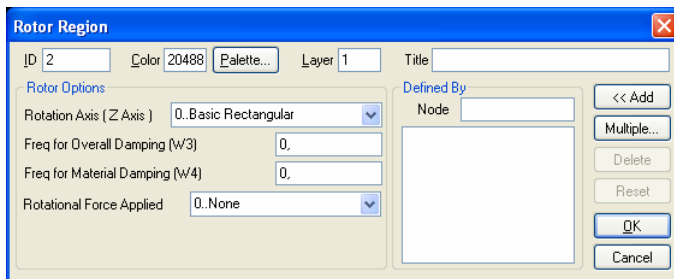


Рис.7.2. Диалоговая панель создания роторного региона

и направление вихря: прямой (**forward**) или обратный (**backwards**) при движении каждого узла роторного региона по эллиптической траектории. Дополнительно NX Nastran определяет: режимы вихря (систему модальных частот, что изменяются в зависимости от частоты вращения), критические скорости вращения, комплексные формы мод колебаний и т.п., которые можно просмотреть в FEMAP (если в секции „**Post Files**” установить опции **CSV** и/или **GPF** (см. пояснение к рис.7.6), то кроме файлов \*.f06 и \*.op2 результаты будут выводиться в форматном виде в файлы \*.CSV (диаграмма Кемпбелла (Campbell)) и/или \*.GPF соответственно).

В секции „**Defined By**” с помощью кнопок „<<Add” (добавить), „**Multiple...**” (множество), „**Delete**” (удалить) и „**Reset**” (очистить) формируется список узлов, которые будут принадлежать к создаваемому роторному региону. **Внимание:** если этот список будет пустым, то программа считает, что в этот роторный регион входят *все* узлы тела.

В секции „**Rotor Options**” устанавливаются опции:

- „**Rotation Axis (Z Axis)**” – система координат, к которой принадлежит ось **Z**, вокруг которой осуществляется вращение;
- „**Freq for Overall Damping (W3)**” – частота  $\omega$  (в герцах) для преобразования общего коэффициента **G** структурного демпфирования по формуле  $G = (2C/C_0) \cdot (\omega/\omega_0)$ , где  $\omega_0$  – частота собственных колебаний. Обычно величину  $\omega$  задают близкой к первой собственной частоте. Эта характеристика для краевых задач (см. табл.4.2) типа 110 может быть установлена на панели „**NASTRAN Modal Analysis**” в поле „**Overall Damping (G)**” (см. рис.7.3 с пояснениями в Разделе 7.3.1), а для задач типа 111 (**4..Frequency/Harmonic Response**) – на панели „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” в поле „**Overall Structural Damping Coeff (G)**” (см. рис.7.1-а), что вызывается командой **Model→Load→Dynamic Analysis...**;
- „**Freq for Material Damping (W4)**” – частота, аналогичная предыдущей, но коэффициент демпфирования задан как характеристика материала (см. табл.3.1 и рис.3.2-а);
- „**Rotation Force Applied**” – набор со статической центробежной силой, которая вычислена для единицы скорости с измерением в рад/сек. Поскольку дальше будет использоваться единица **Hz** (герц), то нужно задействовать множитель  $\pi/2$ . Этот набор нужно создать (с помощью команды **Model→Load→Create/Manage Set...**) отдельно только для одной силы.

## 7.3 Моделирование динамических краевых задач

### 7.3.1 Краевая задача о собственных частотах и формах колебаний

Среди свойств материала достаточно задать модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность материала (см. табл.3.1). Можно вводить демпфирование (что задается, в частно-

сти, и величиной  $2C/C_0$  как характеристикой материала). Обычно вводятся условия закрепления тела, но NX Nastran может находить собственные формы и частоты колебаний для тел, не имеющих закрепления, например, самолета в полете.

Для создания задания для решения задачи командой **Model→Analysis...** вызывается диалоговая панель „**Analysis Set Manager**” (см. рис.4.13-а), инициируется кнопка „**New**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) тип задачи „**2..Normal Modes / Eigenvalues**”.

В разделе „**Options**” панели „**Analysis Set Manager**” появятся несколько подразделов, которые можно настроить, для чего после выбора подраздела инициируется кнопка „**Edit...**”.

Настройка общих панелей раздела „**Options**” рассмотрено в Разделе 4.2. Здесь рассмотрим панели, характерные для данного типа задачи.

Для подраздела „**Modal/Buckling**” вызывается панель „**NASTRAN Modal Analysis**” (см. рис.7.3). На ней можно:

- отменить опцию „**Skip ElGx**” (активизировать диалоговую панель, если она почему-то была не активной);

- изменить внутренний номер (**Method ID**) субнабора назначений (если предполагается многовариантные расчеты);

- выбрать метод определения собственных форм и частот колебаний. Если диссипация энергии не учитывается, то это методы Ланцоша (**Lanczos**) – основной, Гивенса (**Givens**), Хаусхолдера (**Householder**), модифицированные методы Гивенса и Хаусхолдера, а также инверсные методы: энергетической (**Inverse power**) и модифицированный, с последовательностью Штурма (**Inverse Power/Sturm**) – в секции „**Real Solution Method**”. Если диссипация энергии учитывается, то это методы Ланцоша (**Complex Lanczos**) – основной, Хессенберга (**Hessenberg**) и комплексный инверсный энергетический (**Complex Inverse Power**) – в секции „**Complex Solution Method**”;

- в секции „**Range of Interest**” в полях „**From (Hz)**” и „**To (Hz)**” – указать желательный диапазон частот (действительную (**Real**) и комплексную (**Imaginary**) части при комплексном анализе), но это делать не обязательно;

- в секции „**Eigenvalues and Eigenvectors**” – задать желательное количество (**Number Desired**) собственных форм колебаний для нижних собственных частот. А также только для метода „**Inverse power**” – количество оригинальных корней (**Number Estimated**) системы уравнений (см. Раздел П7.3.2). Возможны *парные* значения собственных частот;

- в секции „**Normalization Method**” – установить метод нормирования собственных форм колебаний. Есть три варианта нормирования (к единице): по массе (**Mass**), чтобы выполнялось уравнение (П7.22); по максимальному перемещению где бы то ни было (**Max**) или для указанной степени свободы выбранного узла (**Point**). Обычно применяют первый вариант, но и другие бывают полезны, например, для сравнения с результатами испытаний;

- в секции „**Mass**” – выбрать один из вариантов описания матрицы масс: „**Default**”, „**Lumped**” (сосредоточенная) или „**Coupled**” (присоединенная);

- если диссипация энергии учитывается, то активны еще две секции. В секции „**Solution Type**” выбирается вариант „**Direct**” (код задачи **107**, значение **SEDCEIG**, см. табл.4.2) или „**Modal**” (код задачи **110**, значение **SEMCEIG**, см. табл.4.2), который должен совпадать с типом, указанным на диалоговой панели „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (см.

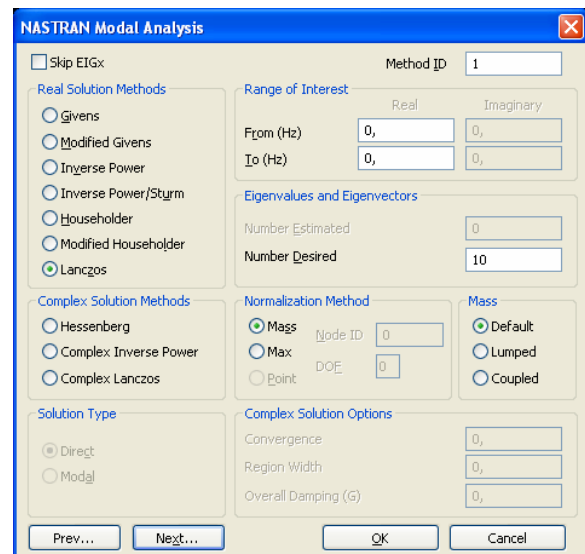


Рис.7.3. Диалоговая панель для изменения параметров частотного анализа



рис.7.1-а). В секции „**Complex Solution Options**” вводятся такие значения: „**Convergence**” – сходимость, по умолчанию для метода „**Hessenberg**” равна  $10^{-15}$ , для „**Complex Inverse Power**” –  $10^{-14}$ , а для „**Lanczos**” выбирается автоматически в зависимости от ЭВМ; „**Region Width**” – ширина региона поиска каждой частоты, по умолчанию равна 1.0); „**Overall Damping (G)**” – общий коэффициент демпфирования.

Для подраздела „**ModalXYPlot**” вызывается панель „**NASTRAN XY Output for Modal Analysis**” (см. рис.6.13-б и пояснения к нему в Разделе 6.3.6).

Для подраздела „**Response Spectrum Application**” иногда необходимо вызывать панель „**NASTRAN Response Spectrum Application**”, описанную в Разделе 7.3.2.5.

Настройка общих панелей раздела „**Master Requests and Conditions**” рассмотрено в Разделе 4.2.

После окончания расчетов будет получено соответствующее количество таблиц с характерными названиями, например, **20..Mode 20, 46.88064 Hz**. Просмотр этих форм целесообразно проводить в режиме анимации перемещений по функции **1..Total Translation** (см. Раздел 9.3).

### 7.3.2 Краевая задача о переходном (эволюционном) процессе при динамическом негармоническом нагружении тела

Граничные условия, изменяющиеся во времени по закону синуса или косинуса, носят название гармонических, а все другие – негармонических.

Обычно негармонические силовые нагрузки задаются переменными во времени с помощью функций типа „**1..vs. Time**”, что создаются и выбираются на диалоговой панели „**Create Loads on ...**” (см. рис.4.3 и другие подобные) в поле „**Time/Freq Dependence**”.

Если задача – линейная, то она может решаться двумя методами.

#### 7.3.2.1 Метод прямого интегрирования, линейная задача

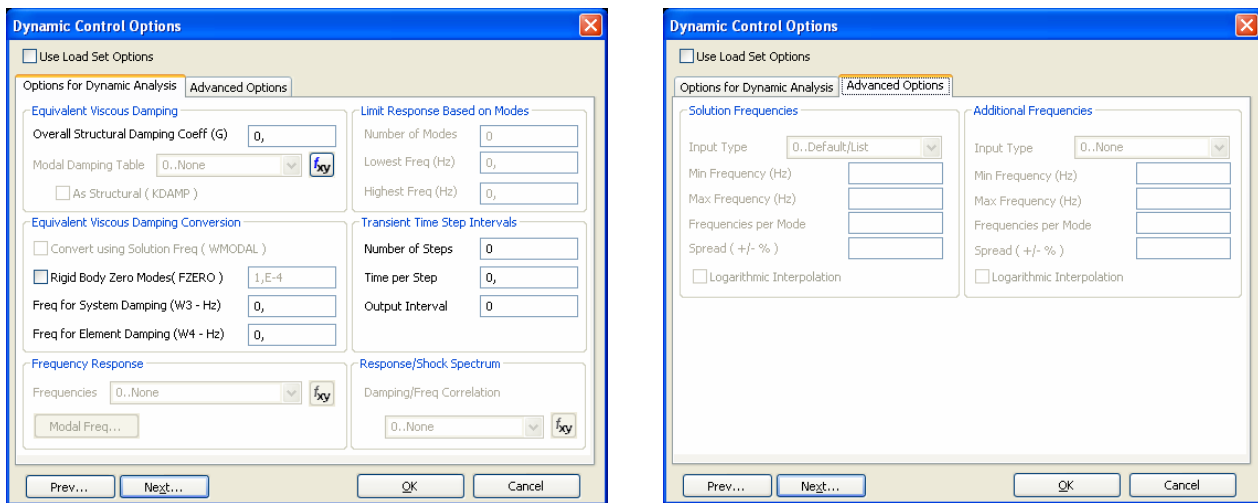
Основное уравнение динамического процесса (П7.11) считается линейным, непосредственно интегрируется с применением метода Ньюмарка (см. Раздел П7.3.1 Приложения 7).

Начальные условия формируются по перемещениям (**Displacement**) и скоростям перемещений (**Velocity**) в отдельном наборе нагрузок обычным способом. Если они – нулевые, то набор с начальными условиями можно не создавать (не подключать). Начальные ускорения – только нулевые.

Обычно для определения временного шага расчета (**Time per Step**) и полного времени действия нагрузки, а также для задания коэффициента конструкционного демпфирования  $G$  (см. Раздел 7.2) нужно знать периоды колебаний тела (**Frequency for System Damping (W3 – Hz)**), т.е. одну (первую) или несколько собственных частот колебаний. Для этого сначала необходимо провести соответствующий дополнительный расчет (см. Раздел 7.3.1). Считается, что для достижения более или менее значительной точности интегрирования уравнения (П7.11) за период должно быть никак не меньше 10 временных шагов, а полное (внутреннее) время расчета должно в несколько раз превышать период колебаний, чтобы можно было проследить значительную часть процесса затухания колебаний, обусловленных быстрым изменением нагрузок. Эти параметры расчета необходимо оценить и установить на диалоговой панели „**Load Set Options for Dynamic Analysis**”, что вызывается командой **Model→Load→Dynamic Analysis...**, в варианте анализа „**Direct Transient**” (см. Раздел 7.2).

Для создания задания для решения задачи командой **Model→Analysis...** вызывается диалоговая панель „**Analysis Set Manager**” (см. рис.4.13-а), инициируется кнопка „**New**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) тип задачи „**3..Transient Dynamic / Time History**” (переходной динамический / процесс во времени); в подразделе „**Dynamic**” раздела „**Options**” можно вызвать диалоговую панель „**Dynamic Control Options**” (см. рис.7.4-а) и изменить некоторые введенные на диалоговой панели „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (см. рис.7.1-а) параметры, или инициировать опцию „**Use Load Set Options**” (т.е. использовать введенные ранее параметры). Есть возможность установить дополнительную опцию: „**Rigid Body Zero Modes (FZERO)**” (введенное значение

отсечет нулевые моды перемещения тела как абсолютно твердого). В подразделе „**Boundary Conditions**” раздела „**Master Requests and Conditions**” необходимо подключить наборы с нагрузками (**Loads**), закреплениями (**Constraints**), начальными условиями (**Initial Conditions**) и другими наборами; в подразделе „**Output Requests**” – установить, какие результаты выводить в таблице.



а)

б)

**Рис.7.4. Диалоговые панели задания (изменения) опций и параметров динамического анализа**

Как результат расчетов возникает столько таблиц, сколько задано временных шагов. Из них можно формировать разные графики, в частности об изменениях во времени выбранной величины в указанном узле (см. Раздел 9.4). Также можно рассчитать коэффициент динамичности в выбранном узле:  $K_{dynamic} = \sigma_{dynamic} / \sigma_{static}$ .

### 7.3.2.2 Метод разложения по собственным частотам

Метод описан в разделе П7.3.3 Приложения 7. Задача решается за два этапа: сначала находится указанное количество *первых* собственных форм колебаний, потом интегрируется не большее количество уравнений.

**Примечание 7.2.** Если для применения первого метода нужно дополнительно провести расчет собственных частот колебаний тела (обычно требуется при первом расчете), то будто бы выгоднее применять второй метод. Но отсечение высокочастотных характеристик отсекает и высокочастотную реакцию. Более того, рекомендуют вычислять не только нижние частоты, а и в 2...3 раза высшие частоты, чем те, для которых нужно определить реакцию.

На первом этапе при иницировании процесса расчета собственных форм колебаний необходимо на диалоговой панели „**NASTRAN Executive and Solution Options**” (см. Раздел 4.2.4 и рис.4.15-а) в секции „**Restart Control**” дополнительно иницировать опцию „**Save Database for Restart**” (сохранить базу данных для последующего расчета).

На втором этапе на диалоговой панели „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (см. Раздел 7.2), которая вызывается командой **Model→Load→Dynamic Analysis...**, необходимо установить вариант задачи „**Modal Transient**” и ввести другие параметры расчета. В частности, указать количество собственных частот (**Number of Modes**), которое будет использовано для получения решения.

В этом варианте появляется возможность задавать в поле „**Modal Damping Table**” коэффициент конструкционного демпфирования  $G$  табличными функциями типа „**6..Structural Damp vs. Freq**” (конструкционное демпфирование), „**7..Critical Damp vs. Freq**” (критическое демпфирование, т.е. величина  $C/C_o$ ) или „**8..Q Damping vs. Freq**” (добротность, или коэффициент усиления – величина  $Q = 1 / \sqrt{1 - (\omega / \omega_o)^2 + G^2}$ , где  $\omega_o$  – частота собственных колебаний). Функцию можно создать с помощью кнопки . При  $\omega = \omega_o$  реализуется соотношение  $G = 2C / C_o = 1 / Q$ . Если  $G$  задается таблицей, то поля для „**Frequency for System**

**Damping (W3 – Hz))**” и **„Frequency for Element Damping (W4 – Hz))**” не заполняются (нулевые). Подробнее об этих величинах – в Разделе 7.2.

Запуск процесса решения задачи, в частности подключение силовых, кинематических и начальных условий, другие действия и полученные результаты – аналогично рассмотренному в Разделе 7.3.2.1. С одним отличием: нужно на диалоговой панели **„NASTRAN Executive and Solution Options”** (см. Раздел 4.2.4 и рис.4.15-а) в секции **„Restart Control”** дополнительно инициировать опцию **„Restart Previous Analysis”** (применить предыдущий анализ, иначе собственные формы колебаний будут рассчитываться вновь) и в поле **„From”** указать (найти в файловой системе) файл рестарта (с расширением имени **.master**).

### 7.3.2.3 Нелинейный переходной процесс

#### 7.3.2.3.1 Нелинейный переходной процесс, малые деформации

Основное уравнение динамического процесса (П7.11) – нелинейное благодаря наличию нелинейности в одной из матриц. Оно непосредственно интегрируется с применением метода Ньюмарка (см. Раздел П7.3.1 Приложения 7). Т.е. задача близка к задаче, рассмотренной в Разделе 7.3.2.1. Но, поскольку задача – нелинейная, есть некоторые отличия (в сравнении с Разделом 7.3.2.1) при ее моделировании. А именно:

- как и в Разделе 7.3.2.1 на диалоговой панели **„Load Set Options for Dynamic Analysis”**, вызываемой командой **Model→Load→Dynamic Analysis...**, необходимо установить вариант анализа **„Direct Transient”** или **„Modal Transient”** и ввести другие параметры расчета (см. Раздел 7.2);

- для *первого* набора нагрузок, что будет создаваться, необходимо на диалоговой панели **„Load Set Options for Nonlinear Analysis”** (см. рис.6.9-а), вызываемой командой **Model→Load→Nonlinear Analysis...**, сначала кнопкой **„Default”** установить типичные значения, потом в секции **„Solution Type”** выбрать вариант **„Transient”**, а также сделать необходимые назначения (см. Раздел 6.2). Эти назначения будут действовать для *всех* наборов нагрузок (**Load**). **Внимание:** значения **„Number of Time Steps”** и **„Time Increment”** не должны противоречить значениям, введенным ранее на панели **„Load Set Options for Dynamic Analysis”**;

- для создания задания для решения задачи командой **Model→Analysis...** вызывается диалоговая панель **„Analysis Set Manager”** (см. рис.4.13-а), иницируется кнопка **„New”**, на панели **„Analysis Set”** выбирается в списке **„Analysis Type”** (см. рис.4.13-б) тип задачи **„12..Nonlinear Transient Response”** (нелинейный переходной процесс); в подразделе **„Dynamic”** раздела **„Options”** можно вызвать диалоговую панель **„Dynamic Control Options”** (см. рис.7.4-а) и изменить некоторые введенные на диалоговой панели **„Load Set Options for Dynamic Analysis”** (см. рис.7.1-а) параметры, или инициировать опцию **„Use Load Set Options”** (т.е. использовать введенные ранее параметры). Есть возможность установить дополнительную опцию: **„Rigid Body Zero Modes (FZERO)”** (введенное значение отсечет нулевые моды перемещения тела как абсолютно твердого). В подразделе **„Boundary Conditions”** раздела **„Master Requests and Conditions”** необходимо подключить наборы с нагрузками (**Loads**), закреплениями (**Constraints**), начальными условиями (**Initial Conditions**) и другими наборами; в подразделе **„Output Requests”** – установить, какие результаты выводить в таблицы. Если необходимо учесть (не учитывать) геометрическую нелинейность, то нужно установить (отключить) на диалоговой панели **„NASTRAN Bulk Data Options”** (подраздел **„Bulk Data”** раздела **„Options”**) опции **„LANGLE”** (большие углы поворотов) и/или **„LGDISP”** (большие деформации) – см. Раздел 4.2.6.

#### 7.3.2.3.2 Нелинейный переходной процесс, большие деформации

Основное уравнение динамического процесса (П7.11) – нелинейное благодаря наличию больших деформаций (но они не должны превышать 2%) и, возможно, нелинейности в одной из матриц. Уравнения непосредственно интегрируется с применением:

- метода Ньюмарка (см. Раздел П7.3.1.1 Приложения 7), тип задачи **„23..Advanced Nonlinear Transient”**;

- явного центрально-разностного алгоритма – CDM (см. Раздел П7.3.1.2 Приложения 7 – с ограничением:  $[C] = \alpha[M]$ ), тип задачи **„24..Advanced Nonlinear Explicit”**.



В отличие от моделирования задачи, рассмотренного в Разделе 7.3.2.3.1, нет потребности в настройке диалоговых панелей „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (вызывается командой **Model→Load→Dynamic Analysis...**) и „**Load Set Options for Nonlinear Analysis**” (вызывается командой **Model→Load→Nonlinear Analysis...**).

Для создания задания на решение задачи командой **Model→Analysis...** вызывается диалоговая панель „**Analysis Set Manager**” (см. рис.4.13-а), иницируется кнопка „**New**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) тип задачи „**23..Advanced Nonlinear Transient**” или „**24..Advanced Nonlinear Explicit**”, в зависимости от выбранного метода.

В зависимости от ситуации, нужно на диалоговой панели „**NASTRAN Bulk Data Options**” (подраздел „**Bulk Data**” раздела „**Options**”) установить опции „**LANGLE**” (большие углы поворотов) и/или „**LGDISP**” (большие деформации) – см. Раздел 4.2.6.

Еще необходимо в разделе „**Options**” настроить опции панели „**NXSTRAT Solver Parameters**” (см. Раздел 6.4.1), в частности, в секции „**Time Steps**” (временные шаги) обязательно ввести значения: „**Number of Steps**” (количество временных шагов), „**Time Increment**” (временной шаг), „**Output Every Nth Step**” (выводить результаты на каждом N–м шаге).

Также есть смысл настроить опции панели „**NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters**” (см. Раздел 6.4.2).

В подразделе „**Boundary Conditions**” раздела „**Master Requests and Conditions**” необходимо подключить наборы с нагрузками (**Loads**), закреплениями (**Constraints**), начальными условиями (**Initial Conditions**) и другими наборами; в подразделе „**Output Requests**” – установить, какие результаты выводить в таблицы.

#### 7.3.2.4 Спектральный отклик тела при ударной нагрузке

Актуальной является задача о снижении амплитуд колебаний тела за счет демпферов (устройств, гасящих динамическую энергию), которые можно прикрепить к нескольким его точкам (узлам). Какие должны быть свойства этих демпферов? Поиск ответа на этот вопрос приводит к проведению многовариантных однотипных расчетов. Это и есть задача о спектральном отклике тела (конструкции). Задача решается за два этапа: сначала для получения вспомогательной информации находится заданное количество собственных форм колебаний (как это описано в Разделах 7.3.1), потом – спектральные отклики. В NX Nastran последнюю задачу можно соединить в одном запуске задания на расчет.

На втором этапе обычно нужно иметь три функций:

- типа **1.vs. Time** для описания динамической нагрузки – удара в виде быстротечного всплеска (см. рис.7.5-а). Потом функция выбирается в диалоговом окне „**Create Loads on ...**” в поле „**Time/Freq Dependence**” для масштабирования во времени амплитудного значения назначаемой нагрузки;

- типа **3.vs. Frequency** в виде столбца таблицы (только аргумент **X**) значений частот актуального диапазона для последующего ее заполнения (по результатам решения задачи) соответствующими значениями перемещений, скоростей и прочее (значения функции **Y**) в узлах, к которым „прикреплены” демпферы, т.е. для создания таблиц спектрального отклика;

- типа **3.vs. Frequency** в виде таблицы значений  $C/C_0$  коэффициентов демпфирования демпферов (только аргумент **X**). Для каждого из этих коэффициентов будет получена таблица (график) спектрального отклика.

Потом обе функции типа **3.vs. Frequency** выбираются на диалоговой панели „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (рис.7.1-а, вызывается командой **Model→Load→Dynamic Analysis...**) в поле „**Frequencies**” левой и в поле „**Damping**” правой части секции „**Response/Shock Spectrum**” соответственно (дополнительную информацию см. в Разделе 7.2). Тип анализа, что устанавливается на этой панели – „**Direct Transient**”, поэтому другие значения должны соответствовать описанному в Разделе 7.3.2.1.

Еще необходимо создать группу (см. Раздел 1.7.2) с перечнем узлов, к которым „прикрепляются” демпферы.

Для создания задания на решение задачи командой **Model**→**Analysis...** вызывается диалоговая панель „**Analysis Set Manager**” (см. рис.4.13-а), инициируется кнопка „**New**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) тип задачи „**5..Response Spectrum**” (генерирование спектра отклика) и проводятся другие назначения (подробнее см. в Разделе 7.3.2.1.). В разделе „**Option**” появится подраздел „**Response Spectrum Generation**”, который настраивается с помощью диалоговой панели „**NASTRAN Output for Response Spectrum Analysis**” (см. рис.7.5-б), где необходимо указать направления перемещений (**T1**, **T2**, **T3**) и/или вращений (**R1**, **R2**, **R3**) трех типов величин: перемещений (**Displacement**), скоростей (**Velocity**) и/или ускорений (**Acceleration**) в демпферах, исследуемых в задаче. Также указывается, какие величины выводить в таблицы: абсолютные (**Absolute**) или относительные (**Relative**). Потом появится простая диалоговая панель для выбора из списка группы с перечнем узлов, к которым „прикрепляются” демпферы.

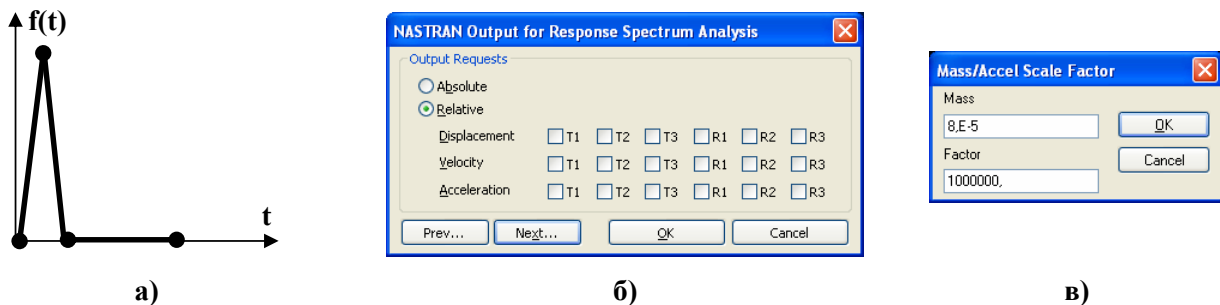


Рис.7.5. График функции нагрузки (а); диалоговые панели для назначения: б) – направлений перемещений (**T1**, **T2**, **T3**) и вращений (**R1**, **R2**, **R3**) трех типов величин; в) – задание массы и масштабного коэффициента для ускорения

В подразделе „**Dynamic**” раздела „**Options**” можно вызвать диалоговую панель „**Dynamic Control Options**” (см. рис.7.4) и изменить некоторые введенные на диалоговой панели „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (см. рис.7.1-а) параметры, или инициировать опцию „**Use Load Set Options**” (т.е. использовать введенные ранее параметры). На вкладке „**Options for Dynamic Analysis**” есть возможность установить дополнительную опцию: „**Rigid Body Zero Modes (FZERO)**” (введенное значение отсечет нулевые моды перемещения тела как абсолютно твердого). А на вкладке „**Advanced Options**” можно выбрать вариант вывода результатов: листинг по умолчанию или частотный диапазон (**1..Frequency Range**).

Полученные таблицы спектральных откликов можно или просмотреть в режиме редактирования функций (команда **Modify**→**Edit**→**Function...**) или в виде графиков (дать команду **View**→**Select**, установить радиокнопку „**XY of Function**”, инициировать кнопку „**XY Functions...**”, выбрать функцию). Название функции – характерное. Например, **ABSDISP1 22 0.05** означает, что это – абсолютные значения перемещений в направлении **T1** для объекта с номером **22** при коэффициенте демпфирования демпфера, равному **0.05**.

Еще один вариант спектрального модального анализа описан в Разделе 7.3.5.

### 7.3.2.5 Динамические задачи при наличии гироскопических сил

Теоретические основы этой задачи изложены в Разделе П7.4 Приложения 7.

Настройка задания (тип задачи 110 (**2..Normal Modes/Eigenvalue**, вариант **Modal Complex Eigenvalues**) идентично изложенном в Разделе 7.3.1. Но есть одно отличие: в подразделе „**Rotor Dynamics Options**” раздела „**Options**” нужно ввести настройки на панели „**NASTRAN Rotor Dynamics**” (см. рис.7.6).

Чтобы сделать панель активной, нужно инициировать опцию „**Enable Rotor Dynamic Analysis**”. Можно установить опцию „**Include Path in All Filenames**” (подключить пути во всех именах файлов).

В секции „**Rotor Selection**” указываются количество роторных регионов: один или несколько (все, что созданы с помощью команды **Connect**→**Rotor Region...**, но для NX Nastran 7.1 не более десяти).

В секции „**Reference System**” указывается тип рассчитываемой системы: с фиксированной осью вращения ротора („**Fixed**”, ускорение Кориолиса не возникает), или с такой, что двигается не поступательно („**Rotating**”, возникает ускорение Кориолиса).

В секции „**Post Files**” опции „**CSV**” и „**GPF**” указываются, какие информационные файлы будет создавать NX Nastran: **rotor.csv** и/или **rotor.gpf**.

В секции „**Rotor Speed**” (скорость ротора) устанавливаются опции: „**Start Value**” (начальное значение,  $\geq 0.0$ ), „**Step Size**” (размер шага увеличения,  $> 0.0$ ) „**Number of Steps**” (количество шагов,  $> 0$ ). Единица измерения скорости устанавливается в секции „**Speed Input Units**”: „**Rev/Minute**” (об/мин), „**Cycles/Sec**” (цикл/сек), „**Hertz**” (герц) или „**Radians/Sec**” (радиан/сек). Аналогичные опции – в секции „**Output Units**” (единицы вывода результатов).

В секции „**Printed Output**” (вывод) можно выбрать варианты: „**None**” (не выводить), „**Generalized Matrices**” (нормализованная матрица), „**Eigenvalue Summary/Eigenvectors**” (собственные частоты и собственные векторы результирующие, в каждом об/мин), „**Both**” (оба варианта).

В секции „**Mode/Whirl Output**” (вывод комплексных мод/вихрей в файлы \*.f06 или \*.op2) можно выбрать варианты: „**None**” (не выводить), „**All RPM**” (для всех скоростей вращения) или „**Rotor Speed**” (для указанного значения ( $\geq 0.0$ ) скорости вращения).

В секции „**Other Options**” (другие опции) можно ввести „**Whirl Threshold**” (предельное значение для определения направления вихря) и активировать опцию „**Steiner Inertia**” (добавить инерцию Штайнера).

**Внимание:** после команды „**OK**” может появиться панель с таким текстом: „**OK to Set Complex Modal Analysis Options? Rotor Dynamic requires a modal complex solution. Review or update changes under NASTRAN Modal/Buckling options**” (Установить комплексный модальный вариант анализа? Динамический ротор требует модального комплексного решения. Просмотрите или отредактируйте опции на панели „**NASTRAN Modal/Buckling**” раздела „**Options**”). Необходимо выбрать „**Yes**” или „**No**” и выполнить соответствующие редактирования.

Все другие опции диалоговой панели применяются лишь для задачи типа 111 (4..**Frequency/Harmonic Response** – модальный частотной анализ / гармонический отклик).

В секции „**Response Calc**” (вычисление отклика динамического ротора) выбирается один из вариантов: „**Synchronous**” (синхронный) или „**Asynchronous**” (несинхронный). В первом случае будут использоваться все три назначения секции „**Rotor Speed**”, а во втором – только значение „**Start Value**” из этой секции. В секции „**Excitation**” (возбуждение) выбирается один из вариантов: „**Mass Unbalance**” (массовая неуравновешенность ( $m \times r$ , потом умножается на  $\omega^2$ ), по умолчанию) или „**Force**” (сила,  $m \times r \times \omega^2$ , что задана на диалоговой панели „**Rotor Region**” (см. рис.7.5)). В секции „**Excitation Order**” (порядок возбуждения) выбирается один из вариантов: „**Default**” (по умолчанию), „**Forward Whirl**” (прямой вихрь) или „**Backward Whirl**” (обратный вихрь). В секции „**Modes for Dynamic Response (Blank=All or i, j, k THRU n, ...)**” (моды для динамического ответа (пусто=все или номера через запятую)) в поле „**Mode IDs**” указываются номера собственных частот.

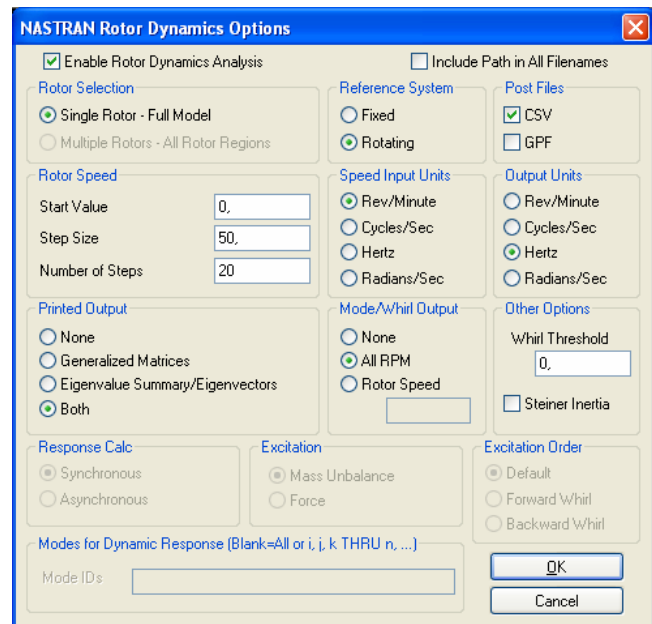


Рис.7.6. Диалоговая панель настраивания опций Rotor Dynamics

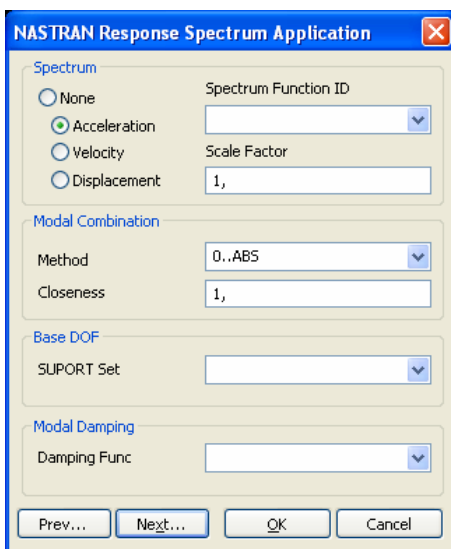
### 7.3.2.6 Расчет полной реакции спектрального отклика тела

В NX Nastran есть возможность проведения расчета полной реакции спектрального отклика тела. На первом этапе находится спектральный отклик тела (как это описано в Разделе 7.3.2.4), на втором проводится расчет реакции.

На втором этапе сначала необходимо создать две дополнительные функции:

- типа **16.. Function vs. Critical Damp**, где два значения параметра **X** являются номером полученной на первом этапе таблицы спектрального отклика, например, таблицы **ABSDISP1 22 0.05**, а параметра **Y** – значения диапазона частот;
- типа **6..Structural Damp vs. Freq**, **7..Critical Damp vs. Freq** или **8..Q Damping vs. Freq** зависимости выбранной характеристики демпфирования от частоты для всего анализируемого частотного диапазона.

Для создания задания на решение задачи командой **Model→Analysis...** вызывается диалоговая панель „**Analysis Set Manager**” (см. рис.4.13-а), инициируется кнопка „**New**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) тип задачи „**2..Normal Modes / Eigenvalues**”.



**Рис.7.7.** Диалоговая панель для подготовки расчета полной реакции спектрального отклика тела

проекту МВФ США) или **3.NRLO** (модальная сумма, старый вариант). В поле „**Closeness**” указывается предельное значение частоты: все методы, кроме **0.ABS**, будут обрабатывать только те частоты, что превышают это значение;

- в поле „**SUPPORT Set**” секции „**Base DOF**” нужно выбрать набор с ограничениями (**Constraint**), предназначенными для тела, а в секции „**Modal Damping**” в поле „**Damping Func**” – ранее созданную функцию типа **6..Structural Damp vs. Freq**.

Результаты расчета – одно число (полная реакция спектрального отклика), которое можно получить, просмотрев стандартным образом как **XY-функции** все таблицы спектрального отклика, которые имеют тот *min* фактора (ускорение, скорость или смещение), что был установлен на панели „**NASTRAN Response Spectrum Application**” (см. рис.7.7). „Старое” наполнение этих таблиц можно просмотреть лишь с помощью команды **List→Model→Function...**, т.е. оно не исчезает.

### 7.3.3 Краевая задача о вынужденных гармонических колебаниях тела

Отдельный, но довольно распространенный случай сил, вызывающих колебания тела – гармонические силы, т.е. изменяющиеся во времени по закону синуса или косинуса.

Большинство действий при создании модели этой задачи – аналогичны изложенным в Разделе 7.3.2. Укажем на некоторые отличия.

В разделе „**Options**” необходимо найти подраздел „**Response Spectrum Application**” и помощью кнопки „**Edit...**” вызвать диалоговую панель „**NASTRAN Response Spectrum Application**” (см. рис.7.7), на которой:

- в секции „**Spectrum**” нужно выбрать один из факторов: „**Acceleration**” (ускорение) „**Velocity**” (скорость) или „**Displacement**” (смещение); в поле „**Spectrum Function ID**” – ранее созданную функцию типа „**16..Function vs. Critical Damp**”, а в поле „**Scale Factor**” – коэффициент масштабирования результата. **Внимание:** типы факторов (ускорение, скорость или смещение), что установлены на панели и помещены в выбранной функции, должны совпадать;

- в окне „**Method**” секции „**Modal Combination**” нужно выбрать один из методов смешивания максимальных чувствительностей в полную реакцию: **0.ABS** (абсолютные величины), **1.SRSS** (среднеквадратичная величина), **2.NRL** (модальная сумма, соответственно

Гармонические силовые нагрузки задаются переменными во времени по закону синуса или косинуса с помощью функций типа „1.vs. Time”, которые создаются и выбираются на диалоговой панели „Create Loads on ...” (см. рис.4.3 и другие подобные) в поле „Time/ Freq Dependence”. Все величины, задающиеся с помощью команды **Model→Load→...**, должны зависеть от функций типа **1.vs. Time** или **3.vs. Frequency**, даже неизменные во времени (тогда значение **Y** такой функции назначается равным единицы во всем диапазоне).

Сначала нужно провести частотный анализ с возможностью дальнейшего рестарта (см. в конце Раздела 7.3.2.2).

На диалоговой панели „Load Set Options for Dynamic Analysis” (рис.7.1-а, вызывается командой **Model→Load→Dynamic Analysis...**) нужно выбрать тип анализа „Direct Frequency” (прямой анализ) или „Modal Frequency” (модальный анализ), ввести нужные данные. **Внимание:** если параметры демпфирования не будут заданы, то при резонансном возбуждении перемещения – бесконечны (теоретически), поэтому NX Nastran может выдать фатальную ошибку.

Таблица частот с названием „Modal Frequency Table” (расчетные точки при частотном анализе, см. Раздел 7.2 и рис.7.1-в) для поля „Frequencies” секции „Frequency Response” создается путем инициации электронной кнопки „Modal Freq”: на панели „Frequency Table From Modal Result”, что появляется, нужно выбрать из списков (из результатов предварительно проведенных расчетов) начальную и конечную частоты, а также в поле „Number of Points per Existing Mode” указать количество точек в окрестности каждой собственной частоты, а в поле „Frequency Band Spread (+/-)” – ширину частотной полосы в процентах от абсолютного значения соответствующей собственной частоты. Эту таблицу потом можно просмотреть обычным способом с помощью команд **Modify→Edit→...** или **View→...**

С помощью электронной кнопки „Enforces Motion...” можно подключить к телу значительную вибрирующую массу. Если эта масса значительно превышает массу рассчитываемого тела, то это фактически будет *кинематическим* возбуждением тела. Сначала вызывается диалоговая панель для назначения точки с „основной массой”, что будет иметь ускорение (для создания вынуждающей силы); потом – диалоговая панель для выбора узлов тела, что будут жестко связаны с этой точкой (КЭ типа **RIGID**). После этого появляется стандартная диалоговая панель задания силовых условий (см. рис.5.2), где задается ускорение основной массы: продольное (**Acceleration**) или угловое (**Rotational Acceleration**), которое может зависеть или от времени, или от функции времени. Потом появляется панель „Mass/Access Scale Factor” (см. рис.7.5-в), где задается масса (**Mass**) и масштабный коэффициент (**Factor**) для ускорения (по умолчанию появляется значение „Mass”, что значительно превышает массу тела). В итоге амплитуда динамической силы, что будет действовать в указанной точке с „основной массой”, рассчитывается как результат перемножения значений „Mass”, „Factor” и „Acceleration”. **Внимание:** если для системы „тело-масса” в задаче условия закрепления задаваться не будут, то при запуске процесса решения задачи нужно „заказать” большее количество собственных частот колебаний, поскольку появляются несколько нулевых или очень малых частот, соответствующих условиям перемещения системы как жесткого целого (эффект численного, всегда приближенного, алгоритма).

Для создания задания на решение задачи командой **Model→Analysis...** вызывается диалоговая панель „Analysis Set Manager” (см. рис.4.13-а), иницируется кнопка „New”, на панели „Analysis Set” выбирается в списке „Analysis Type” (см. рис.4.13-б) тип задачи „4.Frequency / Harmonic Response” (частотный анализ / гармонический отклик) и провести другие назначения (см. Раздел 7.3.2.1.), в частности, применить рестарт.

Также с помощью кнопок „Next...” можно начать процесс дополнительного настраивания решения и данных вывода задачи. Он уже описан в Разделе 4.2. Есть одно отличие: в подразделе „Output Requests” раздела „Master Requests and Conditions” на диалоговой панели „NASTRAN Output Requests” (см. рис.4.19-б, внизу) можно вместо „Magnitude/Phase” выбрать вариант „Real/Imaginary”, т.е. указать, чтобы результаты выводились не как амплитуда и фаза, а как действительная и мнимая часть решения.



В подразделе „**Dynamic**” раздела „**Options**” можно вызвать диалоговую панель „**Dynamic Control Options**” (см. рис.7.4) и изменить некоторые введенные на диалоговой панели „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (см. рис.7.1-а) параметры, или инициировать опцию „**Use Load Set Options**” (т.е. использовать введенные ранее параметры). На вкладке „**Advanced Options**” можно выбрать вариант вывода результатов: листинг по умолчанию или частотный диапазон (**1..Frequency Range**).

При просмотре результатов можно построить, например, графики амплитуд перемещений или напряжений в выбранных узлах тела при резонансном возбуждении.

### 7.3.4 Краевая задача о стохастическом возбуждении тела

Проводится модальный частотный анализ с последующей пост-процессорной обработкой в FEMAP для определения характеристик стохастического возбуждения.

Многие действия – тождественны изложенным в Разделе 7.3.3. Необходимо последовательно:

- провести частотный анализ тела с учетом условий его закрепления (если они есть) и с возможностью дальнейшего рестарта (см. в конце Раздела 7.3.2.2);
- создать функции зависимости нагрузки от частоты (типа **3..vs. Frequency**). Если некоторая нагрузка реально не будет зависеть от частоты, то соответствующая функция должна равняться единице во всем диапазоне. После этого – ввести нагрузку, выбрав созданные функции;
- создать функцию зависимости характеристик демпфирования от частоты (типа **7..vs. Critical Damp vs. Freq**). Если эти характеристики реально не зависят от частоты, то функция должна быть равна единице во всем диапазоне;
- создать функцию спектральной плотности нагрузки (**PSD**)  $S_{\alpha\beta}(\omega)$  (см. Раздел П7.3.4

Приложения 7) в зависимости от частоты (типа **3..vs. Frequency**). Обычно эта функция имеет значения в диапазоне от некоторой незначительной величины до единицы. В таблице П7.1 приведены некоторые аналитические выражения для таких функций, их графический вид. В объяснениях к таблице указаны возможные применения. В NX Nastran функция **PSD** может быть в форме авто– или взаимно– спектральной плотности;

- на диалоговой панели „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (рис.7.1-а, вызывается командой **Model→Load→Dynamic Analysis...**) необходимо:
  - ▣ выбрать тип анализа „**Modal Frequency**” (модальный анализ);
  - ▣ в секции „**Equivalent Viscous Damping**” (эквивалентное вязкое демпфирование) задать общий коэффициент конструкционного демпфирования (**Overall Structural Damping Coeff (G)**), а в диалоговом окне „**Modal Damping Table**” выбрать ранее созданную функцию зависимости характеристик демпфирования от частоты (типа **7..vs. Critical Damp vs. Freq**). Напомним, что коэффициент  $G$  можно не задавать, если он задан для всех КЭ как свойство материала КЭ, или можно задать как дополнительную величину к заданному для материала;
  - ▣ в поле „**PSD**” секции „**Random Analysis Options**” – подключить созданную **PSD**-функцию спектральной плотности нагрузки (входного влияния) при случайном характере изменения амплитудного значения возбуждающей силы;

▣ электронной кнопкой „**Advanced...**” можно вызвать диалоговую панель „**Advanced Load Set Options for Dynamic Analysis**” (см. рис.7.1-г) для назначения дополнительных параметров анализа, в частности, в секции „**Random Analysis**”. В поле „**ANSYS PSD Type**” (характеристики PSD – как в программе ANSYS) есть возможность ввести ускорение: „**0..Accel (Acc2/Hz)**” (через ускорение, в величинах ускорения в квадрате, разделенное на частоту), „**1..Accel (g2/Hz)**” (через абсолютные значения ускорения), „**2..Displacement**” (через перемещение), „**3..Velocity**” (через скорость) или „**4..Force**” (через силу). Есть еще поле „**NASTRAN PSD Interpolation**”, т.е. метод интерполяции функции **PSD**, которая задается в виде таблицы: логарифмический (**0..Log Log**), линейный (**1..Linear**), логарифмически-линейный (**2..X Log, Y Lin**) или линейно-логарифмический (**3..X Lin, Y Log**). Другие опции описаны в конце Раздела 7.2;

- для создания задания на решение задачи командой **Model→Analysis...** вызывается диалоговая панель „**Analysis Set Manager**” (см. рис.4.13-а), инициируется кнопка „**New**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) тип задачи „**6..Random Response**”. Если ранее было создано несколько наборов нагрузок (**Load Set**), то на панели будет активна кнопка „**MultiSet...**” для их подключения, которой нужно воспользоваться и выбрать необходимые наборы нагрузок. Нужно подключить файл рестарта (см. в конце Раздела 7.3.2.2);

- в подразделе „**Dynamic**” раздела „**Options**” можно вызвать диалоговую панель „**Dynamic Control Options**” (см. рис.7.4) и изменить некоторые введенные на диалоговой панели „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (см. рис.7.1-а) параметры, или инициировать

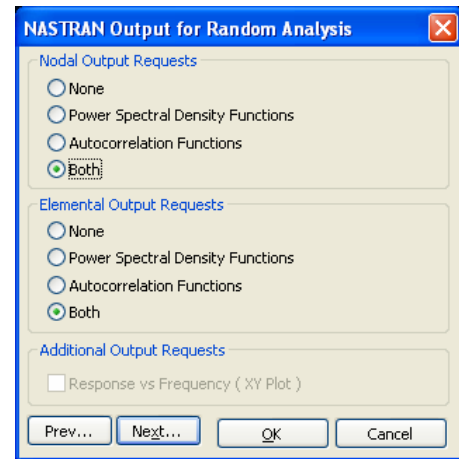
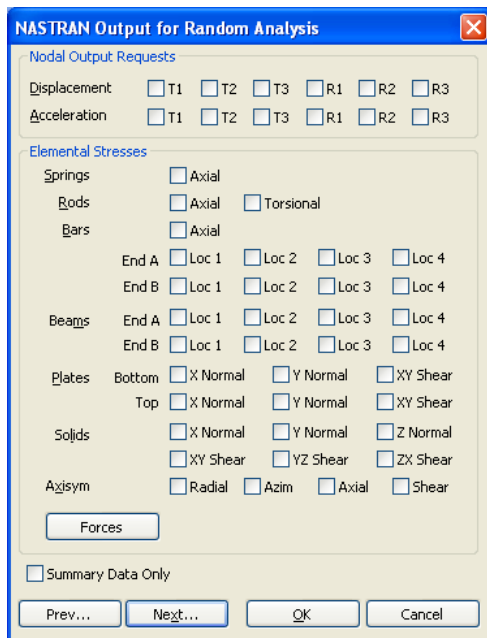
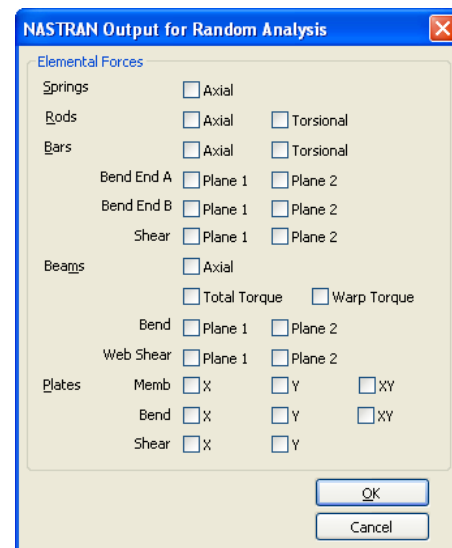


Рис.7.8. Первая диалоговая панель настраивания основного вывода результатов для частотного анализа



а)



б)

Рис.7.9. Вторая и третья диалоговые панели настраивания основного вывода результатов для частотного анализа

опцию „**Use Load Set Options**” (т.е. использовать введенные ранее параметры). На вкладке „**Advanced Options**” можно выбрать вариант вывода результатов: листинг по умолчанию или частотный диапазон (**1..Frequency Range**);

- если в разделе „**Options**” выбрать подраздел „**ModalXYPlot**” и инициировать кнопку „**Edit...**”, появится диалоговая панель „**NASTRAN XY Output for Modal Analysis**” (см. рис.6.13-б), где можно указать некоторый узел для последующего вывода результатов. Потом нужно с помощью кнопки „**Next...**” последовательно настроить диалоговые панели подраздела „**Random Output2**”, что изображены на рис.7.8 и рис.7.9. Сначала появится диалоговая панель „**NASTRAN Output for Random Analysis**” (см. рис.7.8). На ней нужно выбрать один из вариантов стандартного вывода: „**None**”, „**Power Spectral Density Function**” (PSD-функция), „**Autocorrelation Function**” (автокорреляционная функция) или „**Both**” (оба последних варианта). Если будет активной, можно установить опцию „**Response vs. Frequency (XY Plot)**” (реакция как функция частоты). Кнопкой „**Next...**” вызывается другая панель с той же названием (см. рис.7.9-а), где в секции „**Nodal Output Requests**” можно указать степени свободы узлов (нужно заранее создать группу с перечнем этих узлов), для которых бу-

дут выводиться результаты расчета (в виде XY-графика); в секции „Elemental Stresses” – для каких типов КЭ, видов напряжений и точек сечения (**Loc ...**) линейных КЭ выводить результаты (это будут напряжения); можно установить опцию „Summary Data Only” (только суммарные данные). Если инициировать кнопку „Forces”, то появится дополнительная панель с тем же названием (см. рис.7.9-б), где можно назначить: для каких типов линейных КЭ и/или КЭ типа **PLATE** выводить рассчитанные значения сил;

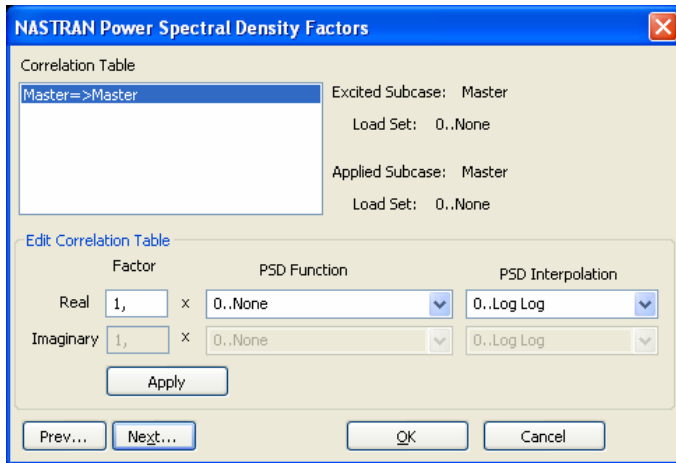


Рис.7.10. Диалоговая панель для задания корреляционных связей

(из списка заранее созданных) только для действительной (**Real**) части. А когда случаи разные (например,  $1 \Rightarrow 2$ ), необходимо определиться, будут коррелировать эти случаи, или нет. Чтобы задать корреляцию, нужно в секции „Edit Correlation Table” задать весовые коэффициенты (**Factor**) и выбрать PSD-функции для действительных (**Real**) и мнимых (**Imaginary**) частей. В поле „PSD Interpolation” (метод интерполяции функции PSD) выбирается один из вариантов: логарифмический (**0..Log Log**), линейный (**1..Linear**), логарифмически-линейный (**2..X Log,Y Lin**) или линейно-логарифмический (**3..X Lin,Y Log**). Кнопкой „Apple” дается команда на обновление поля „Correlation Table”;

- в подразделе „Output Requests” раздела „Master Requests and Conditions” на диалоговой панели „NASTRAN Output Requests” (см. рис.4.19-б, внизу) можно вместо „Magnitude/Phase” выбрать вариант „Real/Imaginary”, т.е. указать, чтобы результаты выводились не как амплитуда и фаза, а как действительная и мнимая часть решения.

Результаты расчета в виде графика изменения, например, общего перемещения (**Total Translation**) можно просмотреть стандартным образом как график: „XY vs Set” – для одного узла во всем диапазоне частот; „XY vs ID” – для всех узлов при выбранной частоте.

### 7.3.5 Модальный анализ методом DDAM

Метод **DDAM (Dynamic Design Analysis Method)** определяет последовательность действий для проведения модального анализа, характерного для реакции оборудования судна на подводный взрыв. Метод имеет внутренний идентификатор **DDAM** и код задачи **187** (см. табл.П9.1 Приложения 9).

Для создания задания на решение задачи командой **Model→Analysis...** вызывается диалоговая панель „Analysis Set Manager” (см. рис.4.13-а), инициируется кнопка „New”, на панели „Analysis Set” выбирается в списке „Analysis Type” (см. рис.4.13-б) тип задачи „2..Normal Modes / Eigenvalues”.

В разделе „Options” необходимо найти подраздел „DDAM”, с помощью кнопки „Edit...” вызвать диалоговую панель „NASTRAN DDAM Solution Options” (см. рис.7.11-а) и инициировать на ней опцию „Enable DDAM Analysis”. Опция „Include Path in All File-names” (подключить пути во всех именах файлов) по умолчанию активирована.

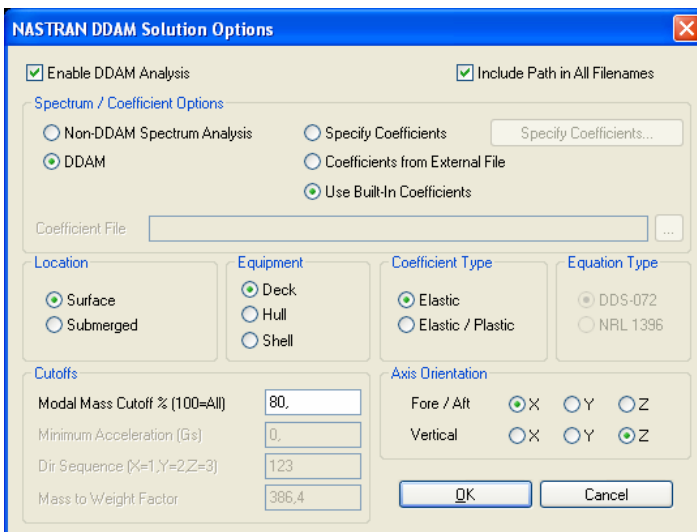
Результаты расчета создаются за три этапа:

- NX Nastran вычисляет собственные частоты, коэффициенты участия и модальные эффективные веса для каждого режима, все это записывается в текстовый файл **OUTPUT4**;
- FEMAP вычисляет модальные ударные реакции конструкции, причем используются: файл **OUTPUT4** и еще три файла, созданные FEMAP с использованием сведений, что введены пользователем с помощью панелей, изображенных на рис.7.11;
- Nastran формирует стандартные файлы результатов, они читаются FEMAP.

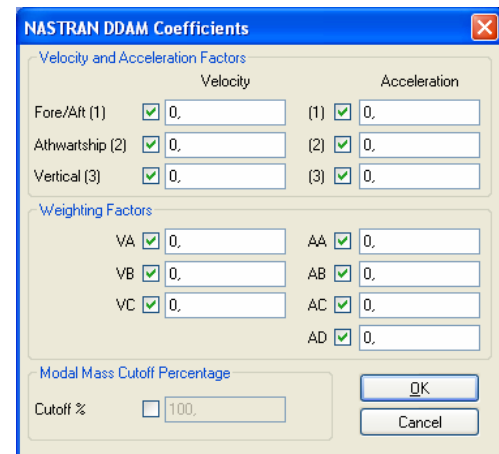
В секции „**Spectrum/Coefficient Options**” (спектр/коэффициенты) диалоговой панели „**NASTRAN DDAM Solution Options**” выбирается один из вариантов: „**Non-DDAM Spectrum Analysis**” (не DDAM спектральный анализ) или „**DDAM**” (DDAM спектральный анализ).

Если выбрать вариант „**Non-DDAM Spectrum Analysis**” или „**DDAM**” и „**Coefficient from Internal File**” (коэффициент из внешнего файла), то становится доступным поле „**Coefficient File**” для выбора соответствующего файла (с помощью кнопки ).

В случае выбора варианта „**Specify Coefficients**” (определение коэффициента) становится активной кнопка „**Specify Coefficients...**”, которая вызывает панель „**NASTRAN DDAM Coefficients**” (см. рис.7.11-б). На ней в секции „**Velocity and Acceleration Factors**” (коэффициенты скорости и ускорение) при необходимости в соответствующих полях задаются значения для: „**Fore/Aft (1)**” (нос/корма), „**Athwartship (2)**” (поперечное направление) и „**Vertical (3)**” (вертикаль). В секции „**Weighting Factors**” в полях с названиями **VA, VB, VC, AA, AB, AC** и **AD** (первые буквы – от **Velocity** и **Acceleration**) необходимо задать соответствующие весовые факторы. При необходимости можно инициировать опцию „**Modal Mass Cutoff Percentage**” и в поле „**Cutoff %**” задать процент (от 0 до 100) уменьшение массы (по умолчанию – 100%).



а)



б)

Рис.7.11. Диалоговые панели для настраивания модального анализа DDAM

В секции „**Equipment**” (оборудование) есть три варианта: „**Deck**” (палуба), „**Hull**” (корпус) и „**Shell**” (оболочка – для субмарины). В секции „**Location**” (локализация) выбирается „**Surface**” (на поверхности) или „**Submerged**” (субмарина на глубине). В секции „**Coefficient Type**” (тип коэффициента) выбирается „**Elastic**” (упругий) или „**Elastic/Plastic**” (упругий/пластический). В секции „**Cutoffs**” назначается „**Modal Mass Cutoff % (100=All)**” – процент (от 0 до 100) уменьшения массы. В секции „**Axis Orientation**” (ориентация осей) в строках „**Fore/Aft**” (нос/корма) и „**Vertical**” (вертикаль) выбираются нужные оси (**X, Y** или **Z**).

Опции секции „**Equation Type**”, а также опции „**Minimum Acceleration (Gs)**”, „**Dir Sequence (X=1,Y=2,Z=3)**” и „**Mass to Weight Factor**” не являются активными (не нужны) для NX Nastran.