# МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»

А.В. Дорошин

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САЕ-ПАКЕТА ANSYS В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ КОНСТРУКЦИЙ (КОСМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ)

Издано в рамках выполнения Программы развития Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва» на 2009-2018 годы.

#### УДК 531.01; 531.36; 517.9; 537.8 Д 696

Дорошин А.В. Использование САЕ-пакета ANSYS в задачах динамики конструкций (космическое машиностроение): Электронное учебное пособие / ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)», Самара, 2013.

Рассматриваются конструкций вопросы динамики с применением САЕ-пакета конечно-элементного анализа ANSYS. Материал пособия основывается на известных методах механики деформируемого твердого тела. Излагается методология решения разнообразных задач динамики конструкций: статического напряженно-деформированного расчет состояния, анализ форм и частот конструкции, гармонический анализ, собственных анализ переходных процессов в конструкциях, спектральный анализ.

Материал изучается на конкретных практических примерах, в том числе проводится анализ напряженно-деформированного состояния створки головного обтекателя ракеты-носителя, анализ переходных процессов в панели солнечных батарей, спектральный отклик элементов космического аппарата на возмущение со стороны двигательной установки. Решение задач в пакете ANSYS описывается как подробная последовательность действий, к которым даются необходимые комментарии.

Издано в рамках выполнения Программы развития Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва» на 2009-2018 годы.

ISBN\_\_\_\_\_

© А.В. Дорошин, 2013

### Содержание

Ведение4
1. Расчет статического напряженно-деформированного состояния
створки головного обтекателя при инерциальном движении ракеты5
2. Расчет статического напряженно-деформированного состояния
створки ГО при действии на РН перегрузок и набегающего потока15
3. Анализ собственных форм и частот колебаний створки головного
обтекателя ракеты-носителя23
4. Линейный анализ потери устойчивости конструкции (Buckling)29
5. Гармонический анализ конструкции (Harmonic)40
6. Анализ переходных процессов в конструкции
7. Спектральный анализ отклика конструкции
Заключение
Библиографический список95

#### Введение

В настоящем пособии рассматриваются вопросы динамики конструкций с применением САЕ-пакета конечно-элементного анализа ANSYS. Материал пособия основывается на известных методах механики деформируемого твердого тела. Излагается методология решения разнообразных задач динамики конструкций: расчет статического напряженно-деформированного состояния, анализ собственных форм и частот конструкции, гармонический анализ, анализ переходных процессов в конструкциях, спектральный анализ.

Материал изучается на конкретных практических примерах, в том числе проводится анализ напряженно-деформированного состояния створки головного обтекателя ракеты-носителя, анализ переходных процессов в панели солнечных батарей, спектральный отклик элементов космического аппарата на возмущение со стороны двигательной установки. Решение задач в пакете ANSYS описывается как подробная последовательность действий, к которым даются необходимые комментарии. В этой связи здесь следует отметить, что материал пособия сфокусирован именно на описании применения пакета ANSYS для указанного рода задач, а не на описании общетеоретических основ механики деформируемого твердого тела, которые с достаточной полнотой отражены в соответствующей учебной и методической литературе [1,2]. Необходимо заметить, что настоящее пособие не является справкой по командам пакета и также не предназначено для описания всех его многочисленных возможностей и параметров, включающих объемный содержанию набор реализованных по конечных элементов, разнообразные пути решения задач, и тем более, широкие графические возможности ANSYS как CAD-системы, позволяющей в полной мере осуществлять построение геометрической модели. Для последних целей будут полезны специализированные справочники, пособия [3], web-ресурсы и, безусловно, собственная справочная система пакета.

Пособие предназначено для студентов (бакалавриата, специалистета, магистратуры), изучающих курсы «Динамика космических конструкций (космическое машиностроение)», «Модели и методы механики деформируемого твердого тела».

## §1. Расчет статического напряженно-деформированного состояния створки головного обтекателя при инерциальном движении ракеты

Проведем исследование напряженно-деформированного состояния створки головного обтекателя (ГО) ракеты-носителя (РН) «Протон» (рис.1), закрепленного на ракете-носителе шарнирным креплением и пирозамком, и нагруженного пружинным толкателем (на самом деле на РН «Протон» установлена система пневмотолкателей). Будем полагать, что РН находится на участке инерциального движения с закрытыми створками, поэтому их напряженное состояние определяется условиями закрепления в шарнирном элементе, пирозамке и воздействием сжатого пружинного толкателя.



Рис. 1. Схема ГО РН «Протон»

1. Создаем новый файл для работы с задачей. Переходим в некий пользовательский каталог, например e:\ANSYS\_job: File->Change directory... указывая проводником на директорию e:\ANSYS\_job.

Выбираем имя для файла задачи: File->Change jobname... сохраняя файл, например, с именем "proton\_GO".

 Создаем вид задачи: анализ на прочностные характеристики (свойства структуры):

Preferences->structural

3. выбираем тип конечных элементов для твердого тела:

preprocessor->element type->add/edit/delete/>add-> solid, 10node92 ->close

4. Устанавливаем свойства материала:

Preprocessor->material props->material library->select units->SI (выбор единиц системы СИ)

Preprocessor->material props->material models->favorites, linear static, linear isotopic->EX=2.ell, PRXY=0.3 (модуль Юнга и коэффициент Пуассона, соответственно)->OK

5. Создаем геометрию створки ГО.

Сформируем плоское сечение створки ГО, а затем путем вращения вокруг продольной оси ГО создадим и саму створку как твердое тело. Задаем ключевые точки:

```
Preprocessor->modeling->create->keypoints->on
working plane:
```

Отмечаем "WP coordinates", далее в поле задаем координаты х,у первой точки: 0,0 ->Enter, в том же поле попарно вводим координаты остальных точек, нажимая после каждой пары Enter:

1.15, -2.31;	1.87, -4.42;	1.87, -7.89;	1.5, -10;	

 $1.77, -10; \qquad 2.14, -7.89; \qquad 2.14, -4.42; \qquad 1.15, -2.31; \quad 0.27, 0.$ 

Всего построено десять ключевых точек с номерами с 1 до 10.

На основе построенных ключевых точек формируем многоугольник с вершинами 1-10:

Preprocessor->modeling->create->areas

->arbitrary->through KPs.

Далее последовательно мышью выделяются ключевые точки с номерами 1, 2, 3,..., 10, 1 и нажимается ОК. После чего появляется сплошной многоугольник.



Рис.2

Осуществляем построение створки ГО как твердого сплошного тела путем поворота полученного сечения вокруг оси Y на 180 градусов. Для этого формируем две вспомогательные ключевые точки с номерами 100 и 101 (номера даны с запасом для избежания путаницы с принадлежностью их фигуре), из которых далее составим отрезок оси вращения. Создадим эти точки из командной строки (ANSYS command prompt):

К,100,0,1 <Enter>; К,101,0,-11 <Enter>; Далее осуществляем сам поворот:

Preprocessor->modeling->operate->extrude
->areas-> about axis;

Далее мышью указываем наш многоугольник, нажимаем ОК. При появлении нового диалогового окна мышью выделяются точки 100 и 101, символизирующие собой отрезок оси вращения, нажимаем ОК. В новом окне указываем угол 180 градусов, ОК. После этих операций формируется сплошная створка ГО.

Можно для наглядности немного повернуть координатные оси специальными кнопками на правой панели меню. Удобно также изменять положение осей координат (и построенного объекта) правой кнопкой мыши, удерживания клавиши ctrl.



Рис.3

6. Создаем сетку конечных элементов:

Preprocessor->Meshing->Mesh->Volumes->Free.



Рис.4

Coхраним наши построения в базе данных задачи: File->save as jobname.db. (SAVE\_DB).

Проведем анализ напряженно-деформированного состояния створки, закрепленной на PH традиционным способом посредством шарнирного узла на внешней части нижней кромки и пирозамка на нижней кромке, расположенного на расстоянии половины радиуса кромки (R) от плоскости контакта со второй створкой (см. рис.1). Будем считать, что после раскрытия пирозамка поворот створки вокруг шарнирного узла осуществляется пружинным толкателем с усилием 3 кH, располагаемым на внутренней части нижней кромки.

7. Задаем граничные условия и нагрузки.

Запрещаем узловые перемещения в шарнире в направлениях осей Y, Z и в пирозамке в направлениях X,Y,Z.

```
Solution->Define Loads->Apply->Structural ->
Displacement-> On Nodes
```

Выделяем мышью несколько узлов в середине нижней кромки, где, как мы считаем, расположен шарнирный элемент, вокруг которого створка будет вращаться в процессе раскрытия после освобождения от пирозамков. Нажимаем ОК, далее в диалоговом окне отмечаем UY, UZ и в поле VALUE ставим ноль, что означает запрещение перемещений указанных узлов в направлениях осей X, Z. Нажимаем ОК.

Apply U,ROT on Nodes	
[D] Apply Displacements (U,ROT) on Nodes	
Lab2 DOFs to be constrained	All DOF
Apply as	Constant value 💌
If Constant value then:	
VALUE Displacement value	0
OK Apply	Cancel Help

Рис.5

Далее аналогично закрепляем несколько узлов нижней кромки на расстоянии R/2 от плоскости контакта со второй створкой, дополнительно отмечая в диалоговом окне UX, т.е. считаем, что пирозамок фиксирует узлы во всех направлениях.

Теперь приложим силу пружинного толкателя.

Solution->Define Loads->Apply->Structural->

Force/Moment

Выделяем мышью несколько узлов нижней кромки на расстоянии R/4 от плоскости контакта со второй створкой. Нажимаем ОК. В диалоговом окне выбираем направление силы толкателя FY и величину 3000 Н этой силы. ОК.

Apply F/M on Nodes	$\sim$
[F] Apply Force/Moment on Nodes	
Lab Direction of force/mom	FY 💌
Apply as	Constant value
If Constant value then:	
VALUE Force/moment value	3000
OK Apply Cancel	Help

Рис.6

В итоге получаем следующую расчетную схему (рис.7). Отметим, что можно также приложить симметричные закрепления и силу для второго пирозамка и второго толкателя, чего мы делать не станем.



Рис.7

8. Далее выбираем тип анализа:

Solution->Analysis Type->New analysis->Static

9. Запускаем расчет статического анализа напряженно-деформированного состояния:

```
Solution->Solve->Current LS, OK.
```

Если расчет прошел без ошибок, то появится следующая форма:



Рис.8

10. Далее проводим анализ полученных результатов расчетов.

Например, можно посмотреть полученные перемещения при деформации конструкции:

General Postproc->Plot Results->Deformed



Shape->Def+undeformed

Рис.9.

Как видно, максимальное перемещение равно 0.496Е-04 метров.

Напряжения внутри створки можно отобразить следующим образом:

General Postproc->Plot Results->Contour

Plot->Element Solu,

выбирая далее в диалоге (рис.): Sterss->von Mises stress, что будет соответствовать эквивалентным напряжениям  $\sigma_{_{3KB}}$ , вычисленным по гипотезе энергии формоизменения Рихарда фон Мизеза:

			\Lambda Contour Element Soli	ution Data			]
ANSYS Main Menu	۲	1	Item to be contoured —				
📰 Preferences		DISPLA					-SXS
Preprocessor		STED_1	M Favorites				
Solution		SUB =1	💅 Element Solution				
🖃 General Postproc		TIME=1	🕰 Stress				
🔤 Data & File Opts		DMX =.	💋 X-Compo	onent of stress			
Results Summary     Read Results			🔗 Y-Compo	onent of stress			
			🔗 Z-Compo	onent of stress			
Plot Results			🔗 XY Shear	r stress			
🔜 Deformed Shape			VZ Shear	r stross			
Contour Plot				1 50 655			
🔤 Nodal Solu			🎁 XZ Shear	r stress			
🔜 Element Solu			🧬 1st Princ	tipal stress			
📰 Elem Table			🧭 2nd Prin	cipal stress			
🔜 Line Elem Res			🔗 3rd Princ	cipal stress			
Vector Plot							
Plot Path Item			Toress III	iterisity			
Concrete Plot			🎲 von Mise	es stress		-	
ThinFilm			4			•	
List Results							
Query Results			Undisplaced shape key =				
Options for Outp     Desults Viewer			,				
Write PCP File			Undisplaced shape key	Deformed shape only		<b>•</b>	
Nodal Calcs			Scale Factor	Auto Calculated		10074.616177	
Element Table				,		_,	
Path Operations			Additional Options			ଭା	
E Surface Operations			Additional Options				
🕀 Load Case				OK	Applu	Canaal Hala	
🗄 Check Elem Shape						Help	
Write Deculte							
4	۶.						

 $\sigma_{_{3KG}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\sigma_{_{x}} - \sigma_{_{y}}\right)^{2} + \left(\sigma_{_{y}} - \sigma_{_{z}}\right)^{2} + \left(\sigma_{_{z}} - \sigma_{_{x}}\right)^{2} + 6\left(\tau_{_{xy}}^{2} + \tau_{_{yz}}^{2} + \tau_{_{zx}}^{2}\right)}$ 

Рис.10.

Получим следующую картину распределения напряжений (рис.), из которой очевидно следует, что наибольшие их значения (0.101E+07 Па) достигаются в зонах крепления створки и области приложения силы толкателя.





Аналогичным путем можно построить картину распределения энергии напряжения, выбрав вместо "Sterss->von Mises stress" в диалоге (рис.) "Energy->Strain energy"):





Из последнего рисунка следует, что максимальные величины энергии напряжения достигаются в пирозамке.

## §2. Расчет статического напряженно-деформированного состояния створки ГО при действии на РН перегрузок и набегающего потока

Рассмотрим ситуацию, когда створки ГО закрыты, РН совершает вертикальное движение с перегрузкой 10g, при этом набегающий поток создает давление 10.е6 Па (10 атм.) на верхнюю коническую часть створок.

Геометрия створки ГО и сетка конечных элементов созданы ранее. По сравнению с предыдущим расчетом (см. предыдущий пункт) для решения поставленной задачи необходимо изменить граничные условия и задать плотность материала для учета массовых перегрузок.

1. Зададим плотность материала:

Preprocessor->material props->material models. Выбирается "Density" в поле "Material models available -> Structural"(puc.13).

ANSYS Main Menu	$\otimes$	4		
🔄 Preferences		ELEMENTS		ANSYS
Preprocessor			- Level	
🕀 Element Type		A Define Material Model Be	ehavior	
🗄 Real Constants		Material Edit Favorite Help		
Material Props		- Makeviel Medele Defined	Makeviel Madela Avusilabla	
🗄 Material Library		Material Models Defined	Material Mouels Available	
📰 Temperature Units		🐼 Material Model Number 1	A Eavorites	A
🧱 Electromag Units				
📰 Material Models				
Convert ALPx			📷 Linear	
📰 Change Mat Num			📷 Nonlinear	
🛨 Failure Criteria			😣 Density	
Write to File		6		
📰 Read from File			\Lambda Density for Material Number 1 🛛 🛛 🔀	
		l l l l l l l l l l l l l l l l l l l		
Modeling			Design for Mahadal Markey 4	
Meshing			Density for Material Number 1	
Checking Ctrls				
Numbering Ltris			T1	
H Archive Model			Temperatures 0	-
E Louping / Legn		7	DENS 2700	
Multi-field Set Op     □ Loads				
Path Operations				
Fact operations				
General Postproc			Add remperature Delete remperature Graph	
TimeHist Postpro				
Topological Opt				
TROM Tool				
I Decian Ont	-			
•				



Величина плотности в единицах СИ (кг/м<sup>3</sup>) указывается в поле DENS. В нашем выбрана плотность алюминия 2700 кг/м<sup>3</sup>. Отметим здесь, что модуль Юнга материала остался прежним (2e11), что соответствует стали. В нашем случае таким сочетанием параметров мы имитируем прочностные характеристики композиционного материала створки ГО (истинные характеристики используемых в ГО композиционных материалов можно уточнить самостоятельно).

2. Далее отменим все условия нагружения прежней задачи:

Solution->Define Loads->Delete->All load data->All loads & opts

3. Теперь задаем новые граничные условия. Так как створки ГО закрыты и подвергаются интенсивному симметричному внешнему воздействию, то из соображений симметрии следует запретить узловые перемещения по оси Z на плоскости контакта створок. Для этого выполним команду:

Solution-> Define Loads-> Apply -> Structural-> Displacement -> On Areas.

После этого появляется диалоговое окно (рис.14). Мышью и щелчком левой ее кнопки выделим оба торца створки ГО и нажнем ОК.



Рис.14.

Далее в следующем диалоговом окне укажем UZ и поставим ноль в поле ввода величины, что будет означать запрет узловых перемещений по направлению Z.

Нижняя часть ГО внешними воздействиями прижимается к последней ступени РН, а также крепится к ней шарнирным элементом и пирозамком. Такую ситуацию можно смоделировать полным закреплением узлов нижней грани и запретом их смещений по всем осям. Выполняем команду:

Solution-> Define Loads-> Apply -> Structural-> Displacement -> On Areas.

Мышью выделяем нижнюю грань створки (рис.15) и в появляющемся диалоговом окне выбираем All DOF (все перемещения) и указываем ноль в поле ввода.



Рис.15

Далее зададим внешнее давление на верхнюю коническую часть створки:

Solution->Define Loads -> Apply -> Structural -> Pressure -> On Areas Укажем мышью внешние части верхней конической поверхности створки (рис.16), нажмем ОК и в открывшемся окне введем в поле "VALUE Load PRES value" значение 10.е6, что означает 1МПа (10 атмосфер).



Рис.16

Далее создадим условия массовой перегрузки 10g:

```
Solution->Define Loads -> Apply -> Structural -
>Inertia -> Gravity -> Global
```

и в открывшемся окне введем условия движения с ускорением 98.1 ( $M/c^2$ ) по оси Y (рис.17).

∧ Apply (Gravitational) Acceleration			
[ACEL] Apply (Gravitational) Acceleration			
ACELX Global Cartesian X-comp	0		
ACELY Global Cartesian Y-comp 98.1			
ACELZ Global Cartesian Z-comp	0		
OK Cancel	Help		

Рис.17

Все необходимые для расчета граничные условия и нагружения созданы.

4. Запускаем вычисления:

```
Solution -> Solve -> Current LS
```

После получения сообщения "Solution is done" можно приступать к анализу результатов.

#### 5. Анализ результатов.

Выведем эквивалентные напряжения по фон Мизесу:

General Postproc->Plot Results->Contour Plot-> Element Solu,

выбирая далее в диалоге Sterss->von Mises stress.



Рис.18

Аналогично выбирая "Sterss->Y-Component of stress" и "Energy->Strain energy" вместо "Sterss->von Mises stress", получим картину распределения напряжений по направлению оси Y и энергии формоизменений (рис.19, 20).



Рис.19



Рис.20

Выбирая General Postproc->Plot Results-> Vector Plot -> DOF solution, Translation U, получаем векторную картину для суммарных узловых перемещений.



Рис.21

### §3. Анализ собственных форм и частот колебаний створки головного обтекателя ракеты-носителя

Проведем исследование собственных форм упругих колебаний створки, называемое также модальным анализом.

- 6. Необходимо прежде сбросить результаты предыдущего расчета: Finish.
- 7. Снимем все граничные условия и силовые нагрузки, чтобы посмотреть собственные формы свободных колебаний створки как упругого тела: solution->define loads->delete->all load data->all loads & opts
- Для модального анализа необходимо задать также плотность материала:

Preprocessor->material props->material models. Выбирается "Density" в поле "Material models

available -> Structural"(рис.).

Величина плотности в единицах СИ (кг/м<sup>3</sup>) указывается в поле DENS. В нашем выбрана плотность алюминия 2700 кг/м<sup>3</sup>. Отметим здесь, что модуль Юнга материала остался прежним (2e11), что соответствует стали. В нашем случае таким сочетанием параметров мы имитируем прочностные характеристики композиционного материала створки ГО (истинные характеристики используемых в ГО композиционных материалов можно уточнить самостоятельно).

4. Далее выбирается метод и опции решения:

Solution->Analysis type->New Analysis->Modal (puc.22)

ANSYS Main Menu 🛞	1		
🔜 Preferences 🔄	ELEMENTS		
Preprocessor			
Solution			
Analysis Type			
📅 New Analysis		Thew Allalysis	
ExpansionPass		[ANTYPE] Type of analysis	
Analysis Options		C Static	
Define Loads			
Load Step Opts		Modal	
E Management (CMS)			
Results Tracking		l Harmonic	
H Solve		C Transient	
H Manual Rezoning			
Multi-field Set Up		C Spectrum	
ADAMS Connection		C. Finen Buckling	
Unapridged Menu			
E General Postproc		C Substructuring/CMS	
TimeHist Postpro			
Topological Opt		OK Capcal Help	
E ROM Tool			
🕀 Design Opt			
Prob Desian			
Radiation Opt			
🕀 Run-Time Stats			
🔜 Session Editor			
👿 Finish			

Рис.22

Задаются опции анализа: Solution->Analysis type->Analysis Options (puc.23). Следует выбрать один из методов решения задачи на собственные формы (Block Lanczos, Subspace, PCG Lanczos,...) и ввести число искомых собственных форм (puc.23): в нашем случае их 15.

SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRG			
	A Modal Analysis	X	
ANSYS Main Menu 🛞	[MODOPT] Mode extraction method		
Preferences		Block Lanczos	
Preprocessor		C. Subspace	
Solution		So Sabspace	
🗆 Analysis Type		C PCG Lanczos	
🔜 New Analysis		C Reduced	
ExpansionPass			
Analysis Options		C Unsymmetric	
Define Loads		C Damped	
Evaluate opts     Evaluate opts     Evaluate opts     Evaluate opts			
Results Tracking		C QR Damped	
Solve	No. of modes to extract	15	
🕀 Manual Rezoning	/au.at be an a Sind fau all a ath ada auraat the Daduard a stead		
Multi-field Set Up	(must be specified for all methods except the Reduced method)		
ADAMS Connection	[MXPAND]		
Diagnostics	Expand mode shapes	Vec	
🔤 Unabridged Menu		↓ 163	
General Postproc     Time Hist Destance	NMODE No. of modes to expand	0	
Timenist Postpro     Topological Opt	Elcalc Calculate elem results?		
ROM Tool			
E Design Opt	[LUMPM] Use lumped mass approx?	□ No	
🗄 Prob Design			
🕀 Radiation Opt	[PSTRES] Incl prestress effects?	No	
🕀 Run-Time Stats			
Session Editor	OK Can	cel Help	
📰 Finish			



5. Запускается расчет собственных форм:

Solution->solve->Current LS.

По окончанию вычислений появляется сообщение "Solution is done".

6. Анализ результатов вычислений.

Просмотр полученных собственных частот:

General Postproc->Result Summary (рис.24)

ANSYS Main Menu 🛞	
Preferences	SET,LIST Command
Preprocessor	File
Solution	
🖃 General Postproc	
📷 Data & File Opts	*00000 INDEX OF DHIH SEIS ON RESULIS FILE *00000
🧱 Results Summary	SET TIME/FREQ LOAD STEP SUBSTEP CUMULATIVE
Read Results	
🔜 First Set	
🔜 Next Set	4 0.48074E-04 1 4 4
Previous Set	5 0.81206E-04 1 5 5
🔜 Last Set	
🔜 By Pick	8 58.338 1 8 8
🔜 By Load Step	9 94.231 1 9 9
🔜 By Time/Freq	10 113.05 1 10 10
🔜 By Set Number	12 183.90 1 12 12
E FLOTRAN 2.1A	
🕀 Failure Criteria	15 252.54 1 15 15
Plot Results	
List Results	
Query Results	
Options for Outp	
	1



Анимация собственной формы колебания.

Сначала необходимо загрузить результаты расчета:

General Postproc->Read Results->First Set.

При этом в память загружаются результаты расчетов для первой формы.

Ecли теперь выполнить команду General Postproc->Read Results -> Next Set, то загрузятся результаты для второй формы. Если опять выполнить "Next Set", то загрузятся результаты для третьей формы и т.д.

Результаты для последней (15-ой в нашем случае) формы можно загрузить, выполнив "Last Set" (рис.25).





Анимацию для «загруженной» в память формы можно выполнить следующим образом. Обращаемся в меню "PlotCtrls"->Animate->Mode Shape (puc.26)



Далее в открывшемся диалоге нужно установить число кадров для анимации

\Lambda Animate Mode Shape		
Animation data		
No. of frames to create	20	
Time delay (seconds)	0.5	
Acceleration Type		
	C Linear	
	C Sinusoidal	
Nodal Solution Data		
Display Type	DOF solution Stress Strain-total Energy Strain ener dens Strain-elastic Strain-plastic Strain-plastic Def + undef Def + undef Translation UY Deformed Sh	ape
ОК	Cancel Help	

и временную задержку между ними (в нашем случае 20 и 0.5) (рис.28).

Рис.28

После этого появляется плеер "Animation Contro...", с помощью которого

осуществляется просмотр и анимация собственной формы (рис.29, 30).



Рис.29



Рис.30

Отметим здесь, что при исследовании собственных форм мы не накладывали никаких условий закрепления на створку. Пакет ANSYS при этом нашел первые шесть собственных форм колебаний створки как твердого тела с шестью степенями свободы (три линейные и три угловые). Формы упругих колебаний по этой причине начинаются с седьмой формы (с частоты 45.83 Гц). Относительно шести первых («твердотельных») собственных форм, соответствующих им частот и их найденных ANSYSoм величин (и почему они именно такие) мы не станем давать комментариев в силу того, что эти формы не имеют физического смысла при рассмотрении вопроса об <u>упругих</u> колебаниях.

#### §4. Линейный анализ потери устойчивости конструкции (Buckling)

устойчивости оболочечной Выполним анализ конструкции, соответствующей форме ГО, находящейся под действием внешнего давления на коническую часть. Анализ устойчивости предполагает нахождение величины критической силы, при которой происходит возникновение новых (нетривиальных) форм состояний равновесия при учете работы внешних сил на деформационных перемещениях точек конструкции. Происходит так называемая потеря устойчивости, т.е. когда исходная форма равновесия вследствие увеличения силовых нагрузок меняется на другую ДО критического значения. На практике обычно определяют первую форму, которая и будет реализовываться при увеличении исходной нагрузки (силы) до своего первого критического значения.

В ANSYS исследование на устойчивость конструкции осуществляется с предварительным проведением статического анализа.

Выполним построение оболочечной конструкции, осуществим наложение необходимых граничных условий и нагружения (внешнего давления), и проведем статический анализ.

1. Создадим новый файл задачи:

File->Clear & start new...

File->Change directory... e:\ANSYS job\Buckling GO.

File->Change jobname buckling GO

Укажем тип задачи: Preferences -> Structural

2. Проведем выбор типа элементов и построение геометрии модели. Preprocessor -> Element Type -> Add/Edit/Delete -> add Далее в диалоговом окне (рис.) выбираем тип Shell (оболочка) и четырех узловой элемент Elastic 4node 63 (SHELL63) с шестью степенями свободы в каждом узле (все осевые и угловые смещения).

∧ Library of Element Types	
Only structural element types are shown	
Library of Element Types	Structural Mass Link Beam Pipe Solid Solid Solid-Shell Constraint
Element type reference number	2 Cancel Help

Рис.31

Теперь следует установить толщину конечных оболочечных элементов:

Preprocessor -> Real constants -> Add/Edit/Delete ->
add

Нужно ввести числовое значение (в нашем случае 0.265 метров) в поле ТК(I), что будет означать равномерную толщину элемента. Отметим, что есть возможность задавать неравномерную толщину, указывая ее во всех четырех узлах.

3.1. Строим первые пять ключевых точек (см. первый раздел), с координатами (0,0)...(1.5, -10).

3.2. Соединяем ключевые точки линиями:

Preprocessor -> Modeling -> Create -> Lines -> In Active Coord

Далее мышью указываем пары ключевых точек, на которых строятся отрезки.

3.3. Строим две дополнительные ключевые точки (0,1) и (0,-11). Эти точки нужны в качестве узлов отрезка вращения для получения поверхности.

3.4. Осуществляем построение поверхности вращением:

Preprocessor -> Modeling -> Operate -> Extrude -> Lines -> About Axis Мышью выделяются все построенные отрезки -> OK -> мышью указываем две вспомогательные ключевые точки -> OK -> указываем 360 градусов как величину угла вращения.

На полученной поверхности создаем сетку конечных элементов:

Preprocessor -> Meshing -> Mesh ->

Areas -> Free, Pick all, OK







4. Запрещаем узловые перемещения в узлах нижней кромки и накладываем внешнее давление на верхнюю коническую часть ГО:

Solution -> Define Loads -> Apply -> Structural -> Displacement -> On Lines

Выбираем мышью линии нижней кромки, ОК. Далее указываем All DOF (все степени свободы) и задаем в поле ввода ноль, ОК.

Solution -> Define Loads -> Apply -> Structural -> Pressure -> On Areas

Выбираем мышью все участки верхней конической поверхности, OK. Далее в поле VALUE Load PRESS Value вводим 1 (Па), OK. Единичное значение внешнего давления вводится для удобства определения критического его значения, при котором произойдет потеря устойчивости и будет реализована новая форма равновесия. Так при анализе устойчивости будет найден коэффициент, определяющий во сколько раз надо увеличить исходную силовую нагрузку, и следовательно, т.к. исходная нагрузка равна единице, то будет найдена именно критическая ее величина.

5. Далее осуществляем запуск статического анализа:

Solution -> Analysis Type -> New analysis -> Static, OK.

Далее выполняем команду:

Solution -> Unabridged Menu для вывода «несокращенного» меню в разделе Solution -> Analysis Туре. При этом в последнем появляется пункт «Analysis Options». Выбираем этот пункт, после чего появляется следующее диалоговое окно (рис.33, 34):

∧ Static or Steady-State Analysis	
Nonlinear Options	<u> </u>
[NLGEOM] Large deform effects	□ Off
[NROPT] Newton-Raphson option	Program chosen 💌
Adaptive descent	OFF V
[STAOPT] VT Speedup	No
Linear Options	
[LUMPM] Use lumped mass approx?	I No
[EQSLV] Equation solver	Program Chosen
Tolerance/Level -	
- valid for all except Frontal and Sparse Solvers	
Multiplier -	
- valid only for Precondition CG	
[PRECISION] Single Precision -	☐ Off
- valid only for Precondition CG	
[MSAVE] Memory Save -	☐ Off
- valid only for Precondition CG	
[PCGOPT] Level of Difficulty -	Program Chosen
- valid only for Precondition CG	
[PCGOPT] Reduced I/O -	Program Chosen
- valid only for Precondition CG	
[PCGOPT] Memory Mode -	Program Chosen
- valid only for Precondition CG	
ОК	Cancel Help



В последнем диалоговом окне нужно «добраться» с помощью скроллинга (мышью опуститься в непоказанную зону) до пункта «Stress Stiffness on prestress» и выбрать там значение "Prestress ON". OK.

▲ Static or Steady-State Analysis				
- valid for all except Frontal and Sparse Solvers				
Multiplier -	0			
- valid only for Precondition CG				
[PRECISION] Single Precision -	☐ Off			
- valid only for Precondition CG				
[MSAVE] Memory Save -	Gff Off			
- valid only for Precondition CG				
[PCGOPT] Level of Difficulty -	Program Chosen			
- valid only for Precondition CG				
[PCGOPT] Reduced I/O -	Program Chosen			
- valid only for Precondition CG				
[PCGOPT] Memory Mode -	Program Chosen			
- valid only for Precondition CG				
[PIVCHECK] Pivots Check				
- valid only for Frontal, Sparse and PCG Solvers				
Stress stiffness or prestress	New el			
Note: If NI GEOM ON then get SSTTE ON	None			
[TOFFST] Temperature difference-	Stress stiff ON Prestress ON			
between sheet to zero and zero of active terms calle				
- between absolute zero and zero or active temp scale				
ОК	Cancel Help			
Рис 34				

34

Далее запускаем анализ: Solution -> Solve -> Current LS. Соглашаемся с предупреждениями и дожидаемся сообщения "Solution is done". Можно также ознакомиться с сообщениями о полученном решении (рис.35):

∧/STATUS Command 🛛 🔀				
File				
SOLUTION OPTIONS PROBLEM DIMENSIONALITY	ATE)			
L O A D S T E P O P T I O N S LOAD STEP NUMBER	TEP			

Рис.35

Итак, предварительный статический анализ для анализа устойчивости проведен. Далее закрываем окно с сообщениями и сразу выполняем пункт меню Solution -> Analysis Type -> New Analysis. Соглашаемся с предупреждением и выбираем пункт "Eigen Buckling". ОК.

۸	🗙 Warning					
4	Changing the analysis type is only valid within the first load step. Pressing OK will cause you to exit and re-enter SOLUTION. This will reset the load step count to 1.					
	Close					
	New Analysis	$\boxtimes$				
	[ANTYPE] Type of analysis					
		C Static				
		C Modal				
		C Harmonic				
		C Transient				
		C Spectrum				
		Eigen Buckling				
		C Substructuring/CMS				
	OK	Help				

Рис.36

Eigen Buckling – это тип анализа, который в русскоязычной литературе называют линейным анализом устойчивости. При таком анализе уравнения равновесия составляются с учетом изменения геометрии конструкции в деформированном состоянии (для этого необходим уже проведенный расчет в рамках предварительного статического анализа). Работу внешних сил, обусловленную изменением геометрии конструкции, учитывают с помощью матрицы геометрической жесткости и снова приходят к задаче на собственные формы равновесия конструкции, при этом в качестве результата определяются новая форма равновесия и параметр нагрузки - коэффициент, показывающий во сколько раз необходимо увеличить исходную нагрузку для

реализации новой формы равновесия. Вообще говоря, количество новых форм равновесия не ограничено. Однако считается, что после того как в процессе увеличения нагрузки до первого (наименьшего) критического значения конструкция получила новую первую форму равновесия, она признается аварийной и более не эксплуатируется. Поэтому важна именно первая форма, которая и реализуется на практике (вторая форма смогла бы реализоваться лишь с большим значением критической силы).

6. В пакете ANSYS первая форма потери устойчивости и параметр критической нагрузки успешно определяются после следующих операций. После того как в конце 5-го пункта выбран новый тип анализа "Eigen Buckling", необходимо определить его параметры:

Solution -> Analysis Type -> Analysis Options, после чего появляется диалоговое окно (рис.), в котором выбираем метод решения "Block Lanczos", а в поле "NMODE No. of modes to extract" указываем значение 1 (т.е. номер первой «извлекаемой» формы равновесия), ОК.

∧ Eigenvalue Buckling Options		
[BUCOPT] Buckling Analysis Options		
Method Mode extraction method		
		C Subspace
		Block Lanczos
NMODE No. of modes to extract		1
SHIFT Shift pt for eigenvalue		0
LDMULTE Load multiplier limit		0
- valid only for Block Lanczos		
ОК	Cancel	Help

Рис.37

Выбираем пункт меню Solution -> Load Step Opts -> ExpantionPass -> Single Expand -> Expand Modes и в поле
"NMODE No. of modes to expand" (рис.38) вводим 1 (первая форма). ОК.

🔨 Expand Modes		
[MXPAND] Expand Modes		
NMODE No. of modes to expand		1
FREQB,FREQE Frequency range		0 0
Elcalc Calculate elem results?		No
SIGNIF Significant Threshold		
-only valid for SPRS and DDAM		0.001
ОК	Cancel	Help



Далее запускаем pacчet Solution -> Solve -> Current LS.

- 6. Загружаем полученные результаты для обработки их постпроцессором: General Postproc -> Read Results -> First Set.
- 7. Выводим на экран первую форму потери устойчивости: General Postproc -> Plot Results -> Deformed Shape.

Выбираем, например, опцию "Def shape only" или "Def + undeformed".



Рис.39

Можно также пользоваться удобным инструментом для вращения и перемещения объекта на экране PlotCtrls -> Pan Zoom Rotate...:



Рис.40

Ha экране также представлена следующая числовая информация: FREQ = .374E+11; DMX =.394074. Это, соответственно, параметр критической нагрузки и максимальное узловое перемещение. Таким образом, критическое давление, при котором происходит потеря устойчивости по первой форме, равно 1\*0.374Е+11=374 ГПа, а максимальное узловое смещение при этом 0.394 м.

Можно поменять схему закрепления нижней кромки ГО, разрешив шарнирные вращения в узлах (отказаться от All DOF и запретить только UX, UY, UZ). В итоге получим следующую схему закрепления (рис.41).





Для последней схемы, повторяя аналогичные действия, можно получить следующую первую форму потери устойчивости, почти повторяющую предыдущий расчет (рис.41).



Рис.41

Как видно из результатов расчетов на прежней сетке конечных элементов для шарнирного крепления нижней кромки ГО получены следующие значения критического давления и максимальные узловые перемещения: 361 ГПа и 394 мм, т.е. критическое давление уменьшило свое значение на 13 ГПа, а узловые смещения практически не изменились.

### §5. Гармонический анализ конструкции (Harmonic)

Любое колебательное воздействие на конструкцию производит ее гармонический отклик. Гармонический анализ позволяет предсказать динамическое поведение конструкций, позволяя проверить, действительно ли они успешно преодолеют резонанс, усталость, и другие вредные эффекты вынужденных колебаний.

Рассмотрим механическую систему с динамическим гасителем колебаний, предназначенную для уменьшения амплитуды колебаний каких-либо элементов (тел). На практике такие системы находят применение для подавления колебаний, станков с вибрирующими частями. Идея гашения колебаний хорошо видна их следующей структурной схемы механической системы (рис.42).



Рис.42

Колебания основного тела 1, на которое прикладывается гармоническое воздействие (от вибрирующих или вращающихся элементов), можно подавить за счет выбора соответствующих параметров пружин и массы гасителя 2. В этом случае динамический гаситель 2 будет способен «забирать» на себя колебания, т.к. он вовлекается в такой колебательный процесс, при котором деформирование дополнительной пружины развивает гармоническую силу, действующую на основное тело противоположно вынуждающей силе и уравновешивает ее.

Проведем частотный анализ подобной системы, состоящей из твердой плиты на четырех пружинах, крепящейся к неподвижному основанию и

гасителя, состоящего из собственной пружины, крепящейся к центру плиты и массы, на свободном конце. На плиту приблизительно в центре действует гармоническая сила. Схема системы, построенная далее в ANSYS, представлена на рисунке (рис. 43).



Рис.43

Итак, приступим к реализации поставленной задачи.

- 1. Как и ранее сначала необходимо выбрать каталог и имя задачи, что описывалось выше.
- Далее необходимо определить типы конечных элементов, которые мы будем использовать при построении системы. В нашем случае будет использоваться три типа элементов: для твердой плиты, для пружины, для массового элемента гасителя.

```
Main Menu-> Preprocessor-> Element Type-> Add/Edit/Delete, Add.
```

Для пружинного элемента (тип 1) выбираем (скроллингом) "Combination" и справа указываем "Spring-damper 14" (рис.44). Apply.

▲ Library of Element Types	
Library of Element Types	Visco Solid Contact Gasket Combination Thermal Mass Link Solid Shell
Element type reference number	1
OK Apply	Cancel Help

Рис.44

Для массового элемента гасителя (тип 2): "Structural Mass",

"3D mass 21"	(рис.45).
--------------	-----------

A Library of Element Types	
Library of Element Types	Structural Mass     A       Link     Beam       Pipe     Solid       Shell     Solid-Shell       Constraint     3D mass       21
Element type reference number	2
OK Apply	Cancel Help

Рис.45

Для твердотельного элемента плиты (тип 3): "Solid", "10node 92" (рис.46).

∧ Library of Element Types		$\overline{\mathbf{X}}$
Library of Element Types	Structural Mass Link Beam Pipe Solid Shell Solid-Shell Constraint	<ul> <li>▲ layered 46 layered 191 aniso 64 concret 65 Tet 10node 187 10node 92</li> <li>▲ 10node 92</li> </ul>
Element type reference number	3	
<u></u>	Apply Cancel	Help

Рис.46

3. Определяем наборы констант (Real Constants) для выбранных типов конечных элементов.

Preprocessor-> Real Constants.

Add, Type 1, OK.

Выбираем COMBIN14. Задаем в поле (К) жесткость пружин крепления плиты к фундаменту: 1000 (Н/м). Мы создали набор констант set1. Add.

Снова выбираем COMBIN14. Задаем в поле (К) жесткость пружины гасителя: 2000. Add.

Выбираем MASS21. Вводим в поле Y 10 кг. ОК.

Для материала плиты вводим модуль Юнга = 2e11, коэффициент Пуассона=0.3, плотность материала устанавливаем=3000. (Material Props... - см. предыдущие пункты).

4. устанавливаем как текущий тип конечных элементов твердотельный тип

Main Menu-> Preprocessor-> Modeling-> Create-> Elements-> Elem Attributes. Вводим 3 для типа элементов.

С помощью построений прямоугольника и операции extrude...along axis (как и ранее) строим сплошной прямоугольный параллелепипед с главной диагональю {-0.15,0,-0.15}-{0.15,0.1,0.15}.

Далее строим сетку элементов на параллелепипеде:
 Meshing -> Mesh>Volumes>Free (рис.47).



Рис.47

## 2. Строим узлы для пружинных и массового элемента:

Предварительно узнаем сколько узлов уже построено в рамках сплошного параллелепипеда: List->Nodes->OK

Выводится список узлов и их координат. Последний номер узла в нашем случае оказался равен 719, поэтому наши новые узлы будут иметь номера 720 и т.д.

Coздаем узлы: Main Menu-> Preprocessor-> Modeling-> Create-> Nodes-> In Active CS.

Узлы пружин крепления опорных пружин: 720 {-0.15,-0.15,-0.2}; Apply; 721 {0.15,-0.15,-0.2}; Apply; 722 {0.15,0.15,-0.2}; Apply; 723 {-0.15,0.15,-0.2}; Apply; узел для пружины-гасителя 724 {0,0,0.5} ОК.

7. Строим пружинные и массовый конечные элементы:

Пружина тип 1: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Elements> Elem Attributes. Задаем Set 1 для набора констант (рис.48).

▲ Element Attributes	×
Define attributes for elements	
[TYPE] Element type number	1 COMBIN14
[MAT] Material number	1
[REAL] Real constant set number	1
[ESYS] Element coordinate sys	0 💌
[SECNUM] Section number	None defined
[TSHAP] Target element shape	Straight line
OK Cancel	Help

Рис.48

Для формирования пружины «по двум концам» выполняем

Preprocessor-> Modeling-> Create-> Elements-> Auto
Numbered-> Thru Nodes.

Чтобы увидеть узлы и пружинных и твердотельных элементов необходимо выполнить команду utility menu (располагается на самом верху): Plot->Nodes

В графическом окне мышью указываем узел 720 и ближайший угловой узел плиты. ОК. Далее аналогично для остальных трех опорных пружин (узлы 721, 722, 733 и соответствующие углы плиты).

Формируем пружину гасителя: выполняем Main Menu->

Preprocessor-> Modeling-> Create-> Elements-> Elem
Attributes.

Устанавливаем набор констант Set 2 (аналогично рис.48).

Preprocessor-> Modeling-> Create-> Elements-> Auto
Numbered-> Thru Nodes.

Выбираем мышью узел 724 и центральный узел плиты. ОК.

Чтобы увидеть сами пружинные и твердотельные элементы необходимо выполнить команду utility menu (располагается на самом верху): Plot->Elemets. В итоге получаем следующую систему (рис.49).



Рис.49

## Строим массовый элемент-гаситель колебаний

Bыбираем Main Menu-> Preprocessor-> Modeling-> Create-> Elements-> Elem Attributes. Выбираем для поля "Element type number" MASS21 и устанавливаем set 3 как набор параметров "Real constant set number" (рис.50).

▲ Element Attributes	×
Define attributes for elements	
[TYPE] Element type number	3 MA5521 💌
[MAT] Material number	1
[REAL] Real constant set number	3
[ESYS] Element coordinate sys	0 🔽
[SECNUM] Section number	None defined
[TSHAP] Target element shape	Straight line
OK	Help



Строим сам массовый элемент:

Preprocessor-> Modeling-> Create-> Elements-> Auto Numbered-> Thru Nodes. Мышью указываем узел 724 (он же свободный конец пружины), в котором хотим разместить массовый элемент. OK.

8. Накладываем закрепления и внешнюю силу, которая считается гармонической (частота силы будет выбираться из диапазона, который мы укажем позднее).

Закрепляем All DOF узлы 720-723. Закрепляем узел 724 по UY, UX, разрешая колебания только по Z (процедура закрепления описывалась выше).

Прилагаем силу: Solution-> Define Loads-> Apply-> Structural-> Force/ Moment-> On Nodes.

Щелкаем мышью в узле, где хотим приложить силу (на плите ближе к центру). ОК. Указываем величину силы и направление: поле "FY", значение "-10000" ОК.

В итоге получаем следующую модель (рис.51):



Рис.51

## 9. Выполняем анализ.

Solution-> Analysis Type-> New Analysis.

Выбираем тип анализа "Harmonic". ОК.

Настраиваем опции анализа:

Solution-> Analysis Type-> Analysis Options:

"Full", "Amplitud + phase" (см. рис.52)

∧ Harmonic Analysis		
[HROPT] Solution method		Ful
[HROUT] DOF printout format		Amplitud + phase
[LUMPM] Use lumped mass approx?		─ No
ОК	Cancel	Help

Рис.52

Выбираем опции вывода внутренних результатов:

Solution-> Load Step Opts-> Output Ctrls-> Solu Printout:

"Last substep" (последний подшаг). ОК.

Задаем диапазон частот, для которых будет проходить анализ. Т.е. задаются величины частоты, которые последовательно назначаются как частоты вынуждающей гармонической силы (на каждом шаге ищется отклик на определенную частоту из указанного диапазона):

Solution-> Load Step Opts-> Time/Frequenc-> Freq and Substeps.

Введем 0 и 10 (Гц) для диапазона частоты вынуждающей силы.

Введем число подшагов: 100.

Одним щелчком выберем "Stepped" для «пошагового» изменения граничных условий (в нашем случае только частоты вынуждающей силы). OK.

Теперь запускаем pacчет: Solution-> Solve-> Current LS.

10. Проведение анализа результатов.

Выбираем построцессор анализа временных зависимостей (его в

ANSYS также называют POST26): TimeHist Postpro

Выбираем пункт для задания интересующей нас зависимости от времени. Имеется в виду предварительное создание переменной (в смысле

программирования) для некоторой исследуемой величины, зависящей от времени, например, перемещение по оси X для узла номер N.

Выполняем TimeHist Postpro -> Define Variables.

Щелкаем мышью Add. Выбираем (это стоит по умолчанию в виде выбранной радио-кнопки) "Nodal DOF result", что означает наш дальнейший выбор просмотра результатов узловых перемещений. В окне модели щелчком мыши указываем на узел плиты с номером 439 (к нему прикреплена пружина гасителя). ОК. После этого заполняем новую появившуюся форму (рис.53). Номер формируемой переменной будет 2 (1 занято в ANSYS для времени или, как в нашем случае, частоты). В поле "user-specified label" можно ввести пользовательское название для определенной переменной; в нашем случае мы введем "VIBR\_439\_UZ". В правом поле выбирается какое именно перемещение нас интересует: UZ.



Рис.53

Можно аналогично создать еще несколько переменных. Их номера будут 3, 4, ... Мы создадим еще одну переменную для просмотра результатов перемещения UZ узла 724 (массы на свободном конце пружины гасителя). Эта переменная будет иметь номер 3, и мы назовем ее "VIBR\_724\_UZ".

Далее можно вывести графики для созданных переменных.

Предварительно настраиваем окно графика, выбирая в верхнем меню PlotCtrls-> Style-> Graphs. Далее пролистываем до "X and Y lines". OK.

Теперь строим графики: TimeHist Postpro> Graph Variables

В появившейся форме (рис.54) вводим 3 в первое свободное поле "1st variable to graph", что означает, что мы вибираем график для переменной с номером 3.

∧ Graph Time-History Variables	X
[PLVAR] Graph Time-History Variables	
NVAR1 1st variable to graph	3
NVAR2 2nd variable	
NVAR3 3rd variable	
NVAR4 4th variable	
NVAR5 5th variable	
NVAR6 6th variable	
NVAR7 7th variable	
NVAR8 8th variable	
NVAR9 9th variable	
NVAR10 10th variable	
OK Apply Cancel	Help

Рис.54

Отметим здесь, что если заполнить номерами сформированных переменных другие поля ("2nd variable to graph" и т.д.), то в окне вывода будет построено несколько графиков (для каждой запрошенной переменной). В нашем случае выводится следующий график для амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) колебаний по оси Z узла 724 (массы гасителя):





Аналогично строится АЧХ колебаний по оси Z узла плиты 439:



Рис.56

Из сравнения результатов видно, что обе АЧХ практически идентичны и, следовательно, при таком способе приложения вынуждающей гармонической силы отклик обоих узлов происходит на одинаковых частотах – примерно 2 и 3.3 Гц.

Рассмотрим еще один случай. Пусть гармоническая сила 1000 Н в направлении Z действует на тело 2, которое мы считали ранее гасителем. Сила приложена в узле 439. Пусть пружина «гасителя» имеет жесткость 1000 (выбираем в пункте real constants->add/edit/delete->set2, edit и ставим 1000 в поле К), пружины опор - 10000. Пусть также имеется действие гравитационной перегрузки 10 по Z (solution->define loads-inetia->gravity->global->).

Apply (Gravitational) Acceleration	
[ACEL] Apply (Gravitational) Acceleration	
ACELX Global Cartesian X-comp	0
ACELY Global Cartesian Y-comp	0
ACELZ Global Cartesian Z-comp	10
OK Cancel	Help

Рис.57

Расчетная схема в этом случае имеет вид:





Проводя исследования, подобные описанным выше, получим следующие АЧХ колебаний по Z для узлов 439 и 724 (рис.59)





Из последних результатов исследований видно, например, что силовое гармоническое воздействие на диапазонах частот 0.1-2 Гц, 2.5-3.2, а также 3.6 и выше почти не оказывает влияния на плиту (узел 439), что видно по амплитуде колебаний, близкой к нулю. Напротив, на частотах 2.2 и 3.4 Гц происходит рост амплитуды «отклика» плиты на гармоническое воздействие. Последние частоты опасны для эксплуатации системы.

Таким образом, на рассмотренном примере проведен частотный (гармонический) анализ отклика системы на периодическое внешнее возмущение.

### **§6.** Анализ переходных процессов в конструкции

Динамический анализ переходных процессов предназначен для определения динамического отклика конструкции при действии на нее нагрузок, зависящих от времени. Этот анализ используется для исследования изменяющихся во времени деформационных перемещений, напряжений и сил в качестве отклика конструкции на какие-либо комбинации статических, кратковременных и гармонических нагрузок. При этом рассматривается интервал времени, на котором принципиально важным является учет инерционных сил и эффектов демпфирования.

Отметим, что если при проведении анализа можно отказаться от учета инерционных сил в конструкции и сил конструкционного демпфирования, то в этом случае выполняют обычный статический анализ, описанный в параграфе 1.

Основными уравнениями, изучаемыми при анализе переходных процессов являются следующие уравнения:

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F(t)\},\$$

где [M] - матрица масс, [C] – матрица коэффициентов сил демпфирования, [K] – матрица жесткости, {u} – вектор узловых перемещений, {F(t)} – вектор узловых сил.

В некоторый дискретный момент времени *t*, это матричное дифференциальное уравнение может быть рассмотрено как уравнение статического равновесия, если принять в качестве статических нагружений также силы инерции и силы демпфирования. ANSYS использует метод Ньюмарка (Newmark) интегрирования по времени или улучшенный метод, называемый HHT-метод для решения указанного уравнения в дискретные моменты времени. Интервалы изменения значения времени *t* называют шагом интегрирования по времени.

Имеется возможность проведения анализа переходных процессов тремя методами: 1). Full, 2). Reduced, 3). Mode superpos'n.

1). Full – это самый главный метод проведения анализа. Он позволяет учитывать разного рода нелинейности (пластичность, большие перемещения, большие напряжения) и использует «полные» матрицы системы без всякого рода аппроксимаций. И перемещения и напряжения вычисляеются одновременно. Недостатком метода является его требование к ресурсам компьютера и самый длительный расчет.

2). Reduced – этот метод «понижает» проблему размерностей, используя уплотненные матрицы. ANSYS использует процедуру *Guyan Reduction* уплотнения матриц, на чем мы не будем останавливаться. Этот метод более быстрый с вычислительной точки зрения, но обладает рядом ограничений на использование нелинейностей и некоторых видов нагружений.

3). Mode superpos'n – этот метод для определения отклика конструкции использует разложения по собственным формам колебаний. Он более быстрый, чем оба предыдущих метода, но также имеет ряд ограничений на использование нелинейностей.

Рассмотрим использование метода full – самого эффективного метода анализа переходных процессов.

Прежде всего необходимо пояснить одно из самых важных понятий, необходимых для проведения анализа переходных процессов в ANSYS – шаг нагружения "Load Step" (LS). Пусть конструкция подвергается некоторому силовому воздействию так, что прикладываемая сила линейно достигает

своего конечного значения за конечный промежуток времени и далее не изменяется (рис.60).



Рис.60

В этом случае можно считать, что в начальный момент времени сила была равна нулю. Это начальный шаг нагружения номер один. Далее сила имеет временной интервал своего линейного роста до конечного значения – это второй шаг нагружения, и т.д. Вообще говоря, мы собирались описывать ситуацию, когда сила начинала расти непосредственно с момента t=0, но в ANSYS первый шаг нагружения должен «хоть сколько-нибудь длиться» во времени, например 0.001 с (по умолчанию это 1с). В этой связи для первого шага нагружения (когда была нулевая сила) нужно назначить некоторое время  $t_1$ . Далее для второго шага назначают время  $t_2$ . И в нашем случае именно на втором шаге нагружения происходит линейный рост величины силы.

Очевидно, что можно моделировать любую зависимость силы от времени, заменяя ее на серию коротких участков шагов нагружения с линейным изменением величины силы.

Анализ переходных процессов собственно и описывает отклик системы на такое временное «переходное» силовое воздействие, поэтому в ANSYS анализ сводится к назначению и расчету серии шагов нагружения. Итак, рассмотрим переходный процесс в конструкции, представляющей собой прямоугольную пластину из аллюминия, консольно закрепленную за одну из своих сторон. Длина, ширина и толщина пластины соответственно равны 0.8, 0.3 и 0.001 м. На одну из свободных вершин по перпендикуляру к пластине действует сила, растущая с нулевого значения до 1 Н за 5с. Проследим за колебаниями на интервале времени 10 с второй свободной вершины пластины.

- 1. Как и ранее назначаем какие-либо имена каталога и задачи.
- 2. Назначаем тип конечных элементов SHELL63 (см. параграф 4).
- Назначаем константы для конечных элементов: Real Constant -> Add/Edit/Delete -> ...TK(I)=0.001 (рис.61), что означает толщину. (сформирован набор параметров set1)

∧ Real Constant Set Number 1, for SHELL63	×
Element Type Reference No. 1	
Real Constant Set No.	1
Shell thickness at node I TK(I)	0.001
at node J TK(J)	0
at node K TK(K)	0
at node L TK(L)	0
Elastic foundation stiffness EFS	0
Element X-axis rotation THETA	0
Bending mom of inertia ratio RMI	0
Dist from mid surf to top CTOP	0
Dist from mid surf to bot CBOT	0
Added mass/unit area ADMSUA	0
OK Apply Cancel	Help

Рис. 61

- 4. Назначаем свойства материала (см. предыдущие параграфы):
   Мщдуль Юнга = 7е10, коэффициент Пуассона = 0.3, плотность = 2700 (кг/м<sup>3</sup>).
- Рисуем прямоугольник: Modeling >Create -> Areas -> Rectangle -> By Dimensions (рис.62)

∧ Create Rectangle by Dimensions	X
[RECTNG] Create Rectangle by Dimensions	
X1,X2 X-coordinates	-0.15 0.15
Y1,Y2 Y-coordinates	-0.4 0.4
OK Apply	Cancel Help

Рис.62

6. Строим сетку конечных элементов: Meshing -> Mesh -> Areas ->free



Рис.63

7. Выбираем новый тип анализа: Solution -> Analysis type -> New Analysis

New Analysis		X
[ANTYPE] Type of analysis		
		C Static
		C Modal
		C Harmonic
		• Transient
		C Spectrum
		C Eigen Buckling
		C Substructuring/CMS
ОК	Cancel	Help

Рис.64

И выбираем метод full (рис.65)

\Lambda Transient Analysis	$\overline{\mathbf{X}}$
[TRNOPT] Solution method	
	(* Full
	C Reduced
	C Mode Superpos'n
[LUMPM] Use lumped mass approx?	, □ No
ок	Cancel Help

Рис.65

- 8. Убеждаемся, что пункт меню Solution -> Unabridged menu (несокращенный) был выполнен и получил статус abridged menu. Тогда будут доступны некоторые скрытые изначально пункты.
- Задаем закрепления All DOF для нижней стороны (вершины {-0.15,-0.4}-{0.15,-0.4}) прямоугольника (см. пред. параграфы).
- 10. Начинаем формировать условия первого шага нагружения:

Во-первых, зададим силу по Z в узле вершины {-0.15,0.4}, причем ее величину положим равной нулю: Solution -> Default loads -> Structural -> Force/Moment -> On Node ... FZ=0.

Во-вторых, выбираем временн<u>ы</u>е параметры первого шага нагружения.

Выполняем Solution -> Analysis Type -> Sol'n Controls и назначаем Time at end of loadstep = 0.001 и Time step size = 0.001 (при включенном выборе радио-кнопки Time increment) (рис.66)

∧ Solution Controls	×
Basic       Transient       Sol'n Options       Nonlinear       Advar         Analysis Options       Small Displacement Transient       Image: Calculate prestress effects         Time Control       Time at end of loadstep       0.001         Automatic time stepping       Prog Chosen       Image: Calculate prestress         Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress         Image: Calculate prestress       0.001       Image: Calculate prestress         Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress         Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress         Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress         Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress         Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress         Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress         Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress       Image: Calculate prestress         Im	nced NL Write Items to Results File All solution items Basic quantities User selected Nodal DOF Solution Nodal Reaction Loads Nodal Velocity Nodal Acceleration Element Solution Frequency: Write last substep only where N = 1
	OK Cancel Help

Рис. 66

Далее выполняем Solution -> Load Step Opts -> Output Ctrls -> Solu Printout и выбираем Every substep (рис. 67)

∧ Solution Printout Controls	
[OUTPR] Solution Printout Controls	
Item Item for printout control	Basic quantities
FREQ Print frequency	
	C None
	C Last substep
	Every substep
	C Every Nth substp
Value of N	
(Use negative N for equally spaced data)	
Cname Component name -	All entities
- for which above setting is to be applied	
OK Apply	Cancel Help

Рис.67

Solution -> Load Step Opts -> Output Ctrls -> DB/ Result file и выбираем Every substep (рис. 68)

∧ Controls for Database and Results File Writing		
[OUTRES] Controls for Database and Results File Writing		
Item Item to be controlled	All items	
FREQ File write frequency		
	C Reset	
	C None	
	C At time points	
	C Last substep	
	Every substep	
	C Every Nth substp	
Value of N		
(Use negative N for equally spaced data)		
Cname Component name -	All entities	
- for which above setting is to be applied		
OK Apply	Cancel Help	

Рис.68

Выполняем еще одну временную настройку: Solution -> Load Step Opts -> Time/ Frequenc -> Time-Time step и назначаем длительность первого шага нагружения и шаг его итегрирования, равными 0.001 (рис.69). Оставляем радио-кнопку ramped (наклонный), что означает дальнейшее изменение параметров нагружения по линейным законам до величин, которые мы укажем на следующем шаге нагружения.

▲ Time and Time Step Options	
Time and Time Step Options	<u> </u>
[TIME] Time at end of load step	0.001
[DELTIM] Time step size	0.001
[KBC] Stepped or ramped b.c.	
	Ramped
	C Stepped
[AUTOTS] Automatic time stepping	
	C ON
	C OFF
	Prog Chosen
[DELTIM] Minimum time step size	
Maximum time step size	
Use previous step size?	Ves
[TSRES] Time step reset based on specific time points	
Time points from :	
	No reset
	C Existing array
	C New array
Note: TSRES command is valid for thermal elements, thermal-elect	ric
elements, thermal surface effect elements and FLUID116,	
or any combination thereof.	
OF	Cancel
	<b>▼</b>

Рис. 69

Теперь первый шаг нагружения готов. Запишем его параметры файл, для чего выполним:

Solution -> Load Step Opts ->Write LS File

и дадим ему имя-номер 1 (рис.70)

\Lambda Write Load Step	File		$\overline{\mathbf{X}}$
[LSWRITE] Write Load :	Step File (Jobname.Sn)		
LSNUM Load step file nu	umber n		1
ОК	Apply	Cancel	Help

Рис.70

11. Формируем второй шаг нагружения:

Назначаем силу по Z в вершине прямоугольника с величиной 1000 H

(та, что на первом шаге была равна нулю).

Далее задаем временные параметры второго шага нагружения:

Solution -> Load Step Opts -> Time/ Frequenc -> Time-Time step и назначаем длительность второго шага нагружения 5 с и шаг его итегрирования 0.01 (рис.71).

per construction of the second s		
∧ Time and Time Step Options		
Time and Time Step Options		
[TIME] Time at end of load step	5	
[DELTIM] Time step size	0.01	
[KBC] Stepped or ramped b.c.		
	Ramped	
	C Stepped	
[AUTOTS] Automatic time stepping		
	C ON	
	○ OFF	
	Prog Chosen	
[DELTIM] Minimum time step size		
Maximum time step size		
Use previous step size?	Ves	
[TSRES] Time step reset based on specific time points		
Time points from :		
	No reset	
	C Existing array	
	O New array	
Note: TSRES command is valid for thermal elements, th	ermal-electric	
elements, thermal surface effect elements and FLU	ID116,	
or any combination thereof.		
		1
OK	Cancel Help	
		-

Рис. 71

Запишем его параметры файл:

Solution -> Load Step Opts ->Write LS File

# и дадим ему имя-номер 2 (рис. 72)

\Lambda Write Load Step Fi	ile		
[LSWRITE] Write Load Ste	p File (Jobname.Sn)		
LSNUM Load step file numb	ber n		2
ОК	Apply	Cancel	Help

Рис.72

12.Задаем третий шаг нагружения. Этот шаг, собственно, является тем интервалом времени, на котором происходит «выравнивание» переходного процесса. Сила уже приняла конечное значение и ее модифицировать не надо. Нужно лишь указать длительность шага: Solution -> Load Step Opts -> Time/ Frequenc -> Time-Time step . Зададим ее равной 10 (рис.73), а шаг интегрирования возьмем 0.1.

▲ Time and Time Step Options	×
Time and Time Step Options	
[TIME] Time at end of load step	10
[DELTIM] Time step size	0.1
[KBC] Stepped or ramped b.c.	
	Ramped
	C Stepped
[AUTOTS] Automatic time stepping	
	C ON
	C OFF
	Prog Chosen
[DELTIM] Minimum time step size	
Maximum time step size	

Рис.73

Запишем параметры третьего шага нагружения в файл:

Solution -> Load Step Opts ->Write LS File

и дадим ему имя-номер 3 (рис.74)

\Lambda Write Load Step File		$\overline{\mathbf{X}}$		
[LSWRITE] Write Load Step File (Jobname.Sn)				
LSNUM Load step file number n		3		
ОК Арр	ly Cancel	Help		

Рис.74

Все шаги нагружения (у нас их три) готовы.

13.Запускаем анализ: Solution -> Solve -> From LS Files

И указываем (рис.75) номер стартового шага нагружения (LSMIN) как 1, последнего шага (LSMAX) как 3 и ставим 1 в поле LSINC, что означает последовательный прирост на 1 в имени-номере файла шага нагружении для последовательного их расчета.

Если все выполнено корректно, то запустится расчет и в итоге появится сообщение "Solution is done".

После этого необходимо выполнить Finish.

Расчет закончен. Приступаем к анализу результатов.

14.Как и гармоническом анализе, можно задать переменную и

построить для нее график:

Main Menu -> TimeHist Postpro -> Define Variables, Add; Nodal DOF result. OK.

Мышью указываем свободную вершину пластины (вершина {0.15,0.4}). Выбираем UZ. При этом создается переменная номер 2.

Далее, как и в предыдущем параграфе, строим график для 2-ой переменной: Main Menu -> TimeHist Postpro -> Graph Variables.



Рис.76

Последний рисунок демонстрирует переходный процесс, в котором свободная вершина пластины перемещается в зависимости от времени. Можно также воспользоваться основным постпроцессором для визуализации деформационной картины пластины в целом после какого-либо шага нагружения. Например, выберем картину после второго шага: General Postproc -> Read Results -> By Load Step и ставим номер 2 для шага нагружения (рис.77)

🔨 Read Results by Load Step Number				
[SET][SUBSET][APPEND]				
Read results for	Entire model			
LSTEP Load step number	2			
SBSTEP Substep number	LAST			
FACT Scale factor	1			
OK Cancel	Help			

Рис.77

Выполняем General Postproc -> Plot Results -> Deformed Shape (рис. 78)



Hапряжения в пластине: General Postproc -> Plot Results -> Contour Plot -> Nodal Solu -> stress -> von Mises



Рис.79

Можно посмотреть картину распределения вращательных ускорений:

General Postproc -> Plot Results -> Contour Plot -> Nodal Solu ->

🔨 Contour Nodal Soluti	ion Data			
Titem to be contoured				
🚰 Favorites				-
Modal Solution				
🛃 DOF Solution				
🛃 Velocity Solutio	n			
🗲 Acceleration S	olution			
🧭 X-Comp	onent of acceleration			
🌮 Y-Comp	onent of acceleration			
🧭 Z-Comp	onent of acceleration			
🍘 Accelera	ation vector sum			
🍘 X-Comp	onent of rotation acceleration			
🍘 Y-Comp	onent of rotation acceleration			
🧭 Z-Comp	onent of rotation acceleration			
🧭 Rotation	n acceleration vector sum			
Stress				
4				Þ
Undisplaced shape key —				
Undisplaced shape key	Deformed shape only			<u> </u>
Scale Factor	Auto Calculated		0.4011	80185688
Additional Options				۲
	OK	Apply	Cancel	Help



Рис.80

Рис.81

Пример проведения анализа переходных процессов завершен.

В существует заключение отметим, ЧТО возможность исследования переходных процессов в конструкциях за счет изменения инерционных параметров, например, когда задано исходное вращательное ускорение, которое убывает до какой-либо величины. Это также касается и скоростей. Возможен анализ при совместном действии ускорений и сил.

Для иллюстрации последнего замечания проведем расчет уже использованной консольно закрепленной пластины, когда ее связанная система координат ускоренно вращается в глобальной инерциальной системе.

Пусть пластина находилась в начальный момент времени во вращательном движении вокруг оси X с ускорением 10 (1/с), которое линейно убывало до нуля за 5 с.

Разместим дополнительно на незакрепленной вершине пластины балочный элемент (материал алюминий, длина 0.1 м, площадь поперечного сечения 0.000004 м<sup>2</sup>, моменты инерции поперечного сечения 8Е-9 м<sup>4</sup>), на конце которого находится точечная масса 0.05 кг.

Чтобы построить балочный и массовый элементы необходимо добавить в набор конечные элементы Beam -3D elastic 4 (BEAM 4) и Structural mass - 3D mass 21. Для этого выполняем команду Preprocessor -> Element type -> Add/edit/delete... (add)

Назначаем параметры для новых типов элементов:

Real Constant -> Add/Edit/Delete...

Выбираем add, ВЕАМ4 и заполняем поля:

AREA = 4e-6 (площадь поперечного сечения);

IZZ=8e-9; IYY=8e-9; OK; (сформирован набор параметров set2). Выбираем add, MASS21и заполняем поля:

MASSX=0.05; MASSY=0.05;MASSZ=0.05, т.к. масса в

направлениях одна и та же; ОК; (сформирован набор параметров set3).

Теперь создаем узел с номером 1000 (с запасом):

Preprocessor -> Create -> Nodes -> In Active CS...

Create Nodes in Active Coordinate System					
[N] Create Nodes in Active Coordin	ate System				
NODE Node number	1000				
X,Y,Z Location in active CS	-0.15 0.	.5 0			
THXY,THYZ,THZX					
Rotation angles (degrees)					
OK Apply	Cancel	Help			



Переключаем тип элементов на ВЕАМ4:

Preprocessor -> Create -> Elements -> Elem Attributes... BEAM4; real Constant Number Set 2.

Переключаем вид экрана на вывод узлов (главное меню): Plot -> Nodes

Строим балочный элемент: Preprocessor -> Create -> Elements -> Auto numbered -> Thru nodes и мышью указываем на узел 1000 и узел в углу пластины.

Переключаем тип элементов на MASS21:

Preprocessor -> Create -> Elements -> Elem Attributes... MASS21; real Constant Number Set 3.

Строим массовый элемент: Preprocessor -> Create -> Elements -> Auto numbered -> Thru nodes и мышью указываем на узел 1000.

Переключаем вид экрана на вывод элементов (главное меню): Plot -> Elements.



Рис.83

Расчетная модель модифицирована, к пластине прикреплены балочный и массовый элементы. Теперь переходим к расчетам.

Также как в предыдущем расчете у нас будет три шага нагружения, но вместо растущей силы (как рассматривалось выше) в качестве нагрузок будем задавать вращательные ускорения с помощью команды:

```
Solution -> Define Loads -> Structural -> Inertia -
> Angular Accel -> Global
```

Apply Angular Acceleration	
[DOMEGA] Apply Angular Acceleration	
DOMGX Global Cartesian X-comp	10
DOMGY Global Cartesian Y-comp	0
DOMGZ Global Cartesian Z-comp	0
OK Cancel	Help

Рис.84
На первом шаге это ускорение равно 10 (рис.84), на втором и третьем равно нулю.

После проведения расчетов для перемещения по Z той же вершины пластины получим следующий переходный процесс:



Рис.85

Для перемещения по Z массы на конце балочного элемента получим следующий переходный процесс:



Рис.86

Для деформированного и напряженного состояний после первого шага нагружения имеем следующую картину:



Рис.87

Для деформированного и напряженного состояний после второго шага нагружения имеем следующие картины:



Рис.88



#### Рис.89

Подобные расчеты могут быть полезны, например, при анализе переходных процессов в панелях солнечных батарей с концевой антенной при выполнении космическим аппаратом угловых маневров.

Практическая важность рассмотренного примера также обуславливается совместным использованием разных типов конечных элементов.

## §7. Спектральный анализ отклика конструкции

Спектральный анализ позволяет получить зависимости максимальных значений откликов конструкции (перемещения, напряжения, скорости, ускорения, реакции) от внешних колебательных нагрузок. В спектральном анализе используются результаты модального анализа с известным спектром. Спектральный анализ главным образом используется вместо анализа переходных процессов для определения реакции конструкции на случайные или зависящие от времени нагрузки. Это в первую очередь касается землетрясений, ветровых нагрузок, действия океанских волн, влияния колебаний тяги реактивного двигателя и так далее.

Спектральный анализ проводится на основе изучения отклика систем маятникового типа с одной степенью свободы на внешнее нагружение. Обычно подразумевается следующая ситуация. В каком-либо исследуемом узле системы располагают систему одностепенных маятников с различными собственными частотами, причем считается, что массы этих маятников пренебрежимо малы по сравнению с массой элемента и никак не влияют на его собственную динамику. После приложения внешнего нагружения система маятников вовлекается в колебательное движение, по параметрам которого определяются частоты откликов - частоты «отозвавшихся» маятников.

Возможно проведение двух типов спектрального анализа: single-point response spectrum (SPRS) and multi-point response spectrum (MPRS).

В «одноточечном» (SPRS) анализе определяется только одна спектральная кривая для внешнего воздействия, которое передается на конструкцию через граничные закрепления. Через каждый узел закрепления передается одно и тоже воздействие (рис. 90-а)). В «многоточечном» (MPRS) анализ, можно определять различные спектры внешнего воздействия на различные группы граничных закреплений (рис. 90-b).



Возможен также анализ на основе метода "Dynamic Design Analysis Method" (DDAM). Этот тип анализа основан на использовании эмпирических моделей, разработанных исследовательской лабораторией военно-морского флота США (The US Naval Research Laboratory Report NRL-1396) и предназначен для исследования процессов удара морских волн о борта судов<sup>\*</sup>.

Также пакет ANSYS позволяет проводить спектральный анализ при воздействии случайных колебательных процессов, - Power spectral density (PSD). Этот анализ используется для исследования случайных вибраций, в которых мгновенные величины реакции могут быть определены только функциями распределения вероятности.

Рассмотрим проведение «одноточечного» анализа SPRS. Укрупненный план проведения SPRS содержит следующие действия:

1. Построение расчетной модели.

2. Проведение модального анализа (modal) и извлечение N собственных форм (мод).

- 3. Вычисление частотного спектра (spectral).
- 4. Разложение по собственным модам (expand).
- 5. Комбинирование мод.
- 6. Анализ результатов.

Определение собственных форм колебаний (мод) конструкции требуется для разложения по ним решений (перемещений, а, следовательно,

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> информация взята из системы помощи программы ANSYS

напряжений) и спектра собственных частот. В последствии из вычисленных N мод на шаге их комбинирования выбираются лишь те, которые вносят в решение «существенный» вклад, определяемый специальным численным порогом.

1. Построение расчетной модели.





## Ключевые точки:

NN	Х	Y
1	0.0	0.0
2	0.7	0.0
3	0.7	-0.05
4	1.5	-0.05
5	1.5	-3.05
6	0.5	-3.05
7	0.5	-8.05
8	0.45	-8.05
9	0.450	-2.5
10	0.5	-2.5
11	0.5	-3.0
12	1.45	-3.0
13	1.45	-0.1
14	0.0	-0.1
15	0.0	-8.05

Ключевые точки 1-14 предназначены для образования замкнутой фигуры – половины сечения корпуса КА. Точки 1 и 15 будут использованы для операции extrude для вращения этого профиля вокруг оси Y и получения тела вращения, моделирующего корпус КА. В итоге получаем следующее сечение КА и его корпус после вращения сечения.



Рис.92



Рис.93

Панели солнечных батарей (ПСБ) будем моделировать твердотельными параллелепипедами малой толщины. Правое крыло ПСБ будем формировать на ключевых точках главной диагонали {1.7, -1.05, 2}- {4.7, -0.95, -2}. Необходимо, конечно же, построить и левое симметричное крыло ПСБ.

Крепление ПСБ к корпусу в нашем примере будем осуществлять «сквозной» твердотельной прямоугольной балкой с главной диагональю {1.9, -1.1, 0.1}- {-1.9, -0.9, -0.1}.

После указанных построений получаем следующую модель КА.





Для корпуса КА, панелей ПСБ и балки их крепления будем использовать один и тот же тип конечных элементов SOLID92. Применим, однако, применим два различных материала: Preprocessor -> Material Props -> Material Models,

где после задания свойств одного материала в собственном меню формы (рис.) добавляем еще один материал: Material -> New Model...

Define Material Model Deflavior		
laterial Edit Favorite Help		
New Model efined	Material Models Available	
🚰 Material Model Number 1	📩 🛛 🙀 Favorites	<u> </u>
😣 Density	🔒 Structural	
😣 Linear Isotropic	🔒 Linear	
角 Material Model Number 2	p Elastic	
8 Density	😸 Isotropic	
😣 Linear Isotropic	😣 Orthotropic	
	😣 Anisotropic	
	🙀 Nonlinear	
	😣 Density	
	Thermal Expansion	
	📷 Damping	
	Existion Coefficient	<u>_</u>
4		►

Рис.95

Задаем модули Юнга, коэффициенты Пуассона и плотности материалов.

Материал 1: EX=1e11, PRXY=0.3, DENS=2500.

Материал 2: EX=6e10, PRXY=0.2, DENS=2000.

Далее нужно построить конечно-элементную модель, причем так, чтобы в точках пересечения тел (корпус КА, ПСБ, балка крепления) использовались общие узлы, что означало бы монолитность цельной конструкции. Для этих целей можно предварительно выполнить операцию определения частичного перекрытия (совпадения, нахлеста) элементов конструкции:

Preprocessor -> Modeling -> Operate -> Booleans -> Overlap -> Volumes -> Pick all

После выполнения операции все построенные твердотельные элементы «разбились» на прилегающие друг к другу отдельные подэлементы с общими границами.

Теперь строим конечные элементы. Пусть корпус КА и балка крепления ПСБ изготовлены из материала №1, а крылья ПСБ – из материала №2. Выберем предварительно в параметрах конечных элементов свойства материала №1:

Meshing -> Mesh Attributes -> Default Attribs -> All

volumes

∧ Volume Attributes	
[VATT] Assign Attributes to All Selected Volumes	
MAT Material number	
REAL Real constant set number	None defined
TYPE Element type number	1 SOLID92
ESYS Element coordinate sys	0
OK	Help

Рис.96

При этом всем телам назначается материал №1. Далее нужно переназначить материал для крыльев ПСБ:

Meshing -> Mesh Attributes -> Default Attribs ->

Picked volumes, мышью выбираем оба крыла ПСБ, ОК:

∧ Volume Attributes	$\mathbf{X}$
[VATT] Assign Attributes to Picked Volumes	
MAT Material number	2
REAL Real constant set number	None defined
TYPE Element type number	1 SOLID92 💌
ESYS Element coordinate sys	0 💌
	1
OK Apply Cancel	Help

Рис.97

Строим сетку конечных элементов на корпусе: Meshing  $\rightarrow$  Mesh  $\rightarrow$ 

Volumes -> Free, Pick all.



Рис.98

Причем в увеличенном масштабе можно проверить общность узлов на сопрягаемых телах конструкции:



Рис.99

## 2. Проведение модального анализа (modal)

Итак, расчетная модель создана, переходим к проведению спектрального анализа отклика, который начинается с модального анализа.

Solution> Analysis Type> New Analysis, "Modal". Опции анализа:

Solution> Analysis Type> Analysis Options.

🔨 Modal Analysis	$\overline{\mathbf{X}}$
[MODOPT] Mode extraction method	
	Block Lanczos
	C Subspace
	C PCG Lanczos
	C Reduced
	C Unsymmetric
	C Damped
	C QR Damped
No. of modes to extract	10
(must be specified for all methods except the Reduced method)	
[MXPAND]	
Expand mode shapes	Ves
NMODE No. of modes to expand	10
Elcalc Calculate elem results?	Ves
[LUMPM] Use lumped mass approx?	∏ No
[PSTRES] Incl prestress effects?	∏ No
OK	Help

#### Рис.100

Как видно из выбранных опций, мы собираемся вычислить 10 мод колебаний и все их использовать в разложениях решений (см. секцию MXPAND).

Проведем анализ отклика конструкции на пульсации двигательной установки. Пульсации двигателя «сотрясают» КА через поверхность своего крепления к корпусу подобно тому, как сейсмическая нагрузка воздействует на здание через его фундамент. Мы не случайно сравнили воздействие двигателя с сейсмическими. Будем моделировать приложение пульсирующего воздействия посредством специального закрепления, на которое подается «сейсмическая» нагрузка с определенными амплитудами и частотами. Закрепим по всем степеням свободы узлы малой верхней цилиндрической части, которая рассматривается нами как внешний срез сопла двигателя (Solution -> Define Loads -> Apply -> Structural -> Displacement -> On Areas). В последствии на это закрепление мы и подадим «сейсмическое» нагружение. Отметим, что использование сейсмического нагружения мы выдумали не сами. Так в ANSYS существует специальный метод «сейсмической тряски», разработанный как для исследования влияния конструкцию на землетрясений, так и вибраций корпусов ракет и летательных аппаратов от двигателей и других пульсирующих элементов.

Выполним pacyet: Solution> Solve> Current LS

Ниже приводятся результаты для вычисленных мод (13, 49 моды).







3. Вычисление частотного спектра (spectral).

Проводим спектральный расчет:

Solution -> Analysis Type -> New Analysis, "Spectrum"

Задаем опции расчета, включающие выбор внешнего воздействия в виде «сейсмических ускорений» (Seismic accel) и направления этих пульсаций (Excitation direction: SEDX, SEDY, SEDZ):

Solution -> Load Step Opts -> Spectrum -> Single Point -> Settings, "Seismic accel" (параметры см. На рис.)

∧ Settings for Single-Point Response Spectrum	
[SVTYP] Type of response spectr	Seismic accel
Scale factor -	1
- applied to spectrum values	
[SED] Excitation direction	
SEDX,SEDY,SEDZ	
Coordinates of point	0.1 1 0.2
- that forms line to define excitation direction	
[ROCK] Rocking Spectrum	
CGX,CGY,CGZ	
Center of rotation -	0 0
- for rocking effect (global Cartesian)	
OMX,OMY,OMZ	
Angular velocity components -	0 0
- (global Cartesian)	
OK Cancel	Help

Рис.102

Определяем параметры внешнего «сейсмического» пульсирующего воздействия в виде кусочно-линейного спектра. Сначала задаются точки (абсциссы) для частот внешних пульсаций:

Solution -> Load Step Opts -> Spectrum -> Single Point -> Freq Table.

Сформируем следующие шесть частотных точек:

<b>∧</b> Frequency Table				
[FREQ] Frequency Table				<b>_</b>
Enter up to 20 values of	Frequency			
FREQ1			10	
FREQ2			50	
FREQ3			100	
FREQ4			150	
FREQ5			200	
FREQ6			250	
FREQ7			0	
EDEOO				

Рис.103

Далее заполняем амплитуды (ординаты) для указанных частот спектра:

Solution -> Load Step Opts -> Spectrum -> Single Point -> Spectr Values.

Возьмем следующие амплитуды:

[SV] Spectrum Values for Damping Ratio = 0.000 FRE01 = 10.00 SV1 = [10	
FREO1 = 10.00 SV1 =	
FREQ2 = 50.00 SV2 =	
FREQ3 = 100.0 SV3 =	
FREQ4 = 150.0 SV4 = 200	
FREQ5 = 200.0 SV5 = 80	
FREQ6 = 250.0 SV6 =	
OK Cancel Help	

Рис.104

Запускаем pacчet: Solution -> Solve -> Current LS.

3. Разложение по собственным модам (expand).

Выполним команды меню:

Solution> Analysis Type> New Analysis. > "Modal" OK. Solution> Analysis Type> Expansion Pass.> ON (рис.)

▲ Expansion Pass		
[EXPASS] Expansion pass		☑ On
Reduced Order Model Expansion?		I No
ОК	Cancel	Help
	Рис.105	

Solution > Load Step Opts > Expansion Pass > Single Expand > Expand Modes.

∧ Expand Modes		
[MXPAND] Expand Modes		
NMODE No. of modes to expand		50
FREQB,FREQE Frequency range		0 0
Elcalc Calculate elem results?		Ves
SIGNIF Significant Threshold		
-only valid for SPRS and DDAM		0.001
ОК	Cancel	Help



Запустим pacчет: Solution> Solve> Current LS.

4. Комбинирование мод.

Последовательно выполняем команды меню:

Solution> Analysis Type> New Analysis> "Spectrum" OK.

Solution> Analysis Type> Analysis Options (рис.107).

∧ Spectrum Analysis	<b>X</b>
[SPOPT] Spectrum Analysis Options	
Sptype Type of spectrum	
	Single-pt resp
	C Multi-pt respons
	C D.D.A.M.
	C P.S.D.
NMODE No. of modes for solu	50
Elcalc Calculate elem stresses?	Ves
(for P.S.D. only)	
OK Cancel	Help

88

Рис.107

Solution> Load Step Opts> Spectrum> Single Point> Mode Combine. > заполним форму (рис.108), ОК.

🔨 Mode Combination Methods	
Mode Combination Method	SRSS 💌
SIGNIF Significant threshold	0.001
LABEL Type of output	Displacement
OK Cancel	Help

Рис.108

Запускаем pacчет: Solution> Solve> Current LS.

Просматриваем результаты:

Main Menu > General Postproc > Results Summary:

∧ SET,LIST Command					
File					
WHAT THEY OF DO	то есте ом р				
****** INDEX OF DR SET TIHE/FREQ 1 0.25225E-04 2 0.32219E-04 3 0.17852 4 0.82826 5 0.92895 7 7.6236 8 7.7035 9 23.009 10 23.289 11 31.707 12 38.175 13 39.213 14 63.609 15 70.997 16 74.200 17 84.038 18 106.94 19 107.02 20 116.59 21 116.59 22 158.08 23 159.39 24 182.58 25 182.78 26 199.29 27 200.14	TA SETS ON RI LOAD STEP 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	ESULTS FILE SUBSTEP 3 4 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 20 21 22 24 25 26 27 28 34 35 36 37 41 42	<ul> <li>******</li> <li>CUHULATIVE</li> <li>1</li> <li>2</li> <li>3</li> <li>4</li> <li>5</li> <li>6</li> <li>7</li> <li>8</li> <li>9</li> <li>10</li> <li>11</li> <li>12</li> <li>13</li> <li>14</li> <li>15</li> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>24</li> <li>25</li> <li>26</li> <li>27</li> </ul>		

Рис.109

Загружаем файл с результатами, сформированный системой ANSYS, для дальнейшего их использования: Меню программы (верхнее Utility Menu)> File> Read Input From. Далее Выбираем (мышью в диалоге) файл с расширением mcom и имененм задачи, которое было назначено на начальном этапе (по умолчанию jobname.mcom ), OK. (рис.110)

Read File		
Read input from file.mcom file.full file.mode file.rst file.stat SC_spectr.db SC_spectr.dbb SpaceCraft_witsPSB.dt	Directories: e:\ans_job\sc spectr e:\ ANS_job MS_job SC spectr	OK Cancel Help
List Files of Type: All Files (*.*)	Drives:	Network
Optional line number or labe	log	_

Рис.110

В командной строке с клавиатуры вводим команду **PRNSOL,DOF**. После выполнения выводится результат команды (рис.111): выводятся значения перемещений в узлах модели.

	SOL Cor	nmand					X
File							
PRINT DO	F NODAL SO	LUTION PER N	ODE				^
***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****							
CALCULATED LOAD CASE= 0							
THE FOLI	LOHING DEGR	EE OF FREEDO	h results ar	E IN THE GLOB	BAL COORDINA	TE SYSTEH	
NODE	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ	
1	7.0515	145.36	12.536	0.0000	0.0000	0.0000	
2	7.0422 7.0490	145.35	12.510	0.0000	0.0000	0.0000	
Å	7.0484	145.37	12.549	0.0000	0.0000	0.0000	
5	7.0517	145.38	12.557	0.0000	0.0000	0.0000	
6	7.0576	145.39	12.566	0.0000	0.0000	0.0000	
7	7.0669	145.40	12.576	0.0000	0.0000	0.0000	
8	7.0788	145.42	12.587	0.0000	0.0000	0.0000	
9	7.0940	145.43	12.598	0.0000	0.0000	0.0000	
10	7.1105	145.43	12.610	0.0000	0.0000	0.0000	
11	7.1287	145.44	12.622	0.0000	0.0000	0.0000	
12	7.1403	145.45 17E 7E	12.033	0.0000	0.0000	0.0000	
10	7.1027	145.45	12.045	0.0000	0.0000	0.0000	
15	7.1868	145.46	12.657	0.0000	0.0000	0.0000	<ul> <li>Image: A set of the set of the</li></ul>

Рис.111

Для графического отображения возможных картин деформаций модели, изоповерхностей и пр. как и ранее воспользуемся графическим постпроцессором:

General Postprocc -> Plot result -> Deformed Shape,







Рис.112





Рис.113

Для визуализации результатов можно также определить новую переменную, описывающую колебательный отклик конкретного узла по конкретному направлению. Определение новой переменной описывалось выше. В нашем случае переменная получит номер 2. Номер 1 зарезервирован для частоты (времени).

Чтобы построить спектр для этой переменной нужно обратиться в меню TimeHist Postpro -> Generate Spectrm и заполнить форму (рис.114)

∧ Generate a Response Spectrum				
[RESP] Generate a Response Spectrum				
IR Reference number for result	10			
LFTAB Freq table variable no.	1			
LDTAB Displ time-hist var. no.	2			
ITYPE Type of response spectrum	Displacement			
RATIO Visc/Critical damp ratio				
DTIME Integration time step				
TMN,TMX Range of time-history				
ОК Арріу	Cancel Help			



Для спектра в нашем случае будет сформирована переменная 10 (номер 10 мы определили сами), которая является спектром для переменной 2, а в качестве переменной для частоты указывается переменная номер 1. Далее, как и ранее можно построить график для переменной 10, т.е. отобразить спектр. Пример двух спектров откликов некоторых двух узлов приведен на рис. 115.



Рис.115

## Заключение

В настоящем электронном учебном пособии, выполненным в рамках образовательного контента «Использование САЕ-пакета электронного ANSYS в задачах конструкций (космическое динамики космических машиностроение)», рассмотрены вопросы динамики конструкций С применением САЕ-пакета конечно-элементного анализа ANSYS.

Материал пособия включает описание методологии решения задач динамики конструкций, включая расчет статического напряженноформ деформированного собственных состояния, анализ И частот конструкции, гармонический анализ, анализ переходных процессов в конструкциях, спектральный анализ.

Рассмотрен ряд конкретных практических примеров, в том числе проведен анализ напряженно-деформированного состояния створки головного обтекателя ракеты-носителя, анализ переходных процессов в панели солнечных батарей, определен спектральный отклик элементов космического аппарата на возмущение со стороны двигательной установки.

Пособие предназначено для студентов (бакалавриата/ специалитета/ магистратуры), обучающихся по направлениям 160400 «ракетные комплексы и космонавтика», 161100 «Системы управления движением и навигация», 151600 «Прикладная механика», а также будет полезно студентам других направлений подготовки и специальностей, связанных с проектированием и исследованием технических объектов и систем.

# Библиографический список

- 1. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
- 2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1976. Т 1, 2.
- 3. *Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.* ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М.: УРСС, 2004. 272 с.
- Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. — М.: ДМК Пресс, 2006. — С. 240. — ISBN 5-94074-301-3
- Басов К. А. ANSYS для конструкторов. М.: ДМК Пресс, 2009. С. 248. — ISBN 978-5-94074-462-7
- 6. <u>http://www.ansys.com/</u>
- 7. <u>http://www.ansys.ru/</u>
- 8. http://www.ansyssolutions.ru/
- 9. http://www.fea.ru/education/cae/ansys/
- 10.http://www.ph4s.ru/book\_ansys.html
- 11.<u>http://ansys.soften.com.ua/</u>
- 12.http://www.arbyte.ru/pdf/arbyteansys.pdf

УДК 531.01; 531.36; 517.9; 537.

# Автор-составитель: Дорошин Антон Владимирович

Использование CAE-пакета ANSYS в задачах динамики космических конструкций (космическое машиностроение) [Электронный ресурс] : Электронное учебное пособие.

Выполнено в рамках электрон. обр. контента/ М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. А. В. Дорошин - Электрон. текстовые и граф. дан. - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Режим доступа: http://fla.ssau.ru/moodle/

Образовательный контент «Использование CAE-пакета ANSYS в задачах динамики космических конструкций (космическое машиностроение)» предназначен для студентов факультета летательных аппаратов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 160400 «Ракетные комплексы и космонавтика».

Контент разработан на кафедре космического машиностроения.

Издано в рамках выполнения Программы развития Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва» на 2009-2018 годы.

© Самарский государственный аэрокосмический университет, 2013