

# Раздел 2

## Моделирование для динамического анализа

# Раздел 2. Моделирование для динамического анализа

- КОМПОНЕНТЫ ВХОДНОГО ФАЙЛА MSC.Nastran..... 2 - 3
- ФОРМАТ РАДЕЛА BULK DATA ВХОДНОГО ФАЙЛА MSC.Nastran..... 2 - 4
- КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ..... 2 - 5
- ОБЫЧНО ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ..... 2 - 6
- РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ И СОСРЕДОТОЧЕННЫЕ МАССЫ..... 2 - 7
- КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ROD..... 2 - 9
- РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МАССА В MSC.Nastran..... 2 - 11
- ЕДИНИЦЫ МАССЫ..... 2 - 13
- ЗАДАНИЕ МАССЫ..... 2 - 14
- ЭЛЕМЕНТ CONM2..... 2 - 16
- ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ НАД НАБОРАМИ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ В MSC.Nastran..... 2 - 18
- СТЕПЕНИ СВОБОДЫ В MSC.Nastran ..... 2 - 19
- РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛИ..... 2 - 22

# Компоненты входного файла MSC.Nastran

- **Операторы FMS и NASTRAN** – назначения файлов и задание системных параметров
- **Executive Control Section** – задание типа решения, выделяемого времени, параметров диагностирования
  - **CEND** – оператор - “разделитель”
- **Case Control Section** – формирование перечня выводимых результатов, инициализация некоторых операторов **Bulk Data Section**
  - **BEGIN BULK** - оператор - “разделитель”
- **Bulk Data Section** – описание расчетной модели, параметров решения
  - **ENDDATA** - оператор - “разделитель”

# Формат раздела BULK DATA входного файла MSC.Nastran

- Формат с фиксированной длиной поля
  - GRID<sup>1</sup><sup>2</sup><sup>3</sup>1.0<sup>4</sup>-2.0<sup>5</sup>3.0<sup>6</sup>316
- “Свободный” формат, этот же оператор
  - GRID,2,3,1.0,-2.0,3.0,,316
- Репликаторы для повторного ввода
  - Исходная запись: GRID,1,,0.,0.,0.,,126  
=, \*(5),=,=,\*(1.),==  
=(3)

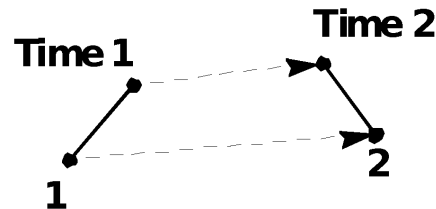
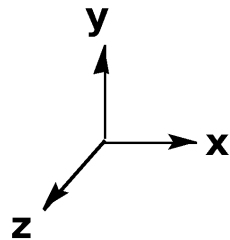
- Результат:

GRID	1		0	0	0		126
GRID	6		0	1	0		126
GRID	11		0	2	0		126
GRID	16		0	3	0		126
GRID	21		0	4	0		126

- В примерах к данному курсу используются свободный формат и репликаторы.

# Конечно-элементный анализ

- В реальном мире существуют не только системы с одной степенью свободы.
- Конечные элементы используются для моделирования массы, демпфирования и жесткости сложных систем и конструкций.
- Степени свободы (СС - DOF) – независимые координаты, описывающие перемещения конструкции в любой момент времени.
- Узлы GRID используются для дискретного моделирования непрерывной структуры.
- Каждый узел GRID может иметь шесть СС: поступательные вдоль осей X, Y и Z и вращательные относительно осей X, Y и Z.



- Взаимосвязь перемещений осуществляется путем соответствующих матричных преобразований.

# Обычно используемые упругие элементы

One-Dimensional Geometry		Number of DOFs
ROD	Pin-ended rod	4
BAR	Prismatic beam	12
BEAM	Straight beam with warping	14
BEND	Curved beam, pipe, or elbow	12
Two-Dimensional Geometry		
TRIA3	Triangular plate	15
QUAD4	Quadrilateral plate	20
SHEAR	4-sided shear panel	8
TRIA6	Triangular plate with midside nodes	30
QUAD8	Quadrilateral plate with midside nodes	40
Three-Dimensional Geometry		
HEXA	Solid with six quadrilateral faces	24-60
TETRA	Solid with four triangular faces	12-30
PENTA	Solid with two triangular faces and three quadrilateral faces	18-45
Zero-Dimensional Geometry		
ELAS	Simple spring connecting two degrees of freedom	2
BUSH	Frequency-dependent spring/damper connecting up to six degrees of freedom	6

# Распределенная и сосредоточенная массы

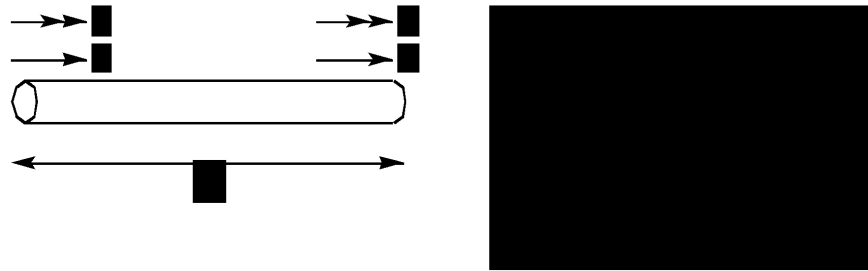
- Распределенная масса в общем случае более точно описывает массовые свойства, нежели сосредоточенная.
- Сосредоточенная масса предпочтительнее для вычисления скорости при динамическом анализе.
- Задание “распределенной” формулировки матрицы масс
  - PARAM, COUPMASS, 1 – выбор “распределенной” формулировки
  - “По умолчанию” – “сосредоточенная” формулировка
- Сосредоточенную и распределенную массы могут иметь элементы:
  - BAR, BEAM, CONROD, HEXA, PENTA, QUAD4, QUAD8, ROD, TETRA, TRIA3, TRIA6, TRIAX6, TUBE
- Только сосредоточенную массу могут иметь элементы:
  - CONEAX, SHEAR
- Только распределенную массу могут иметь элементы:
  - BEND

# Распределенная и сосредоточенная массы

- Сосредоточенная масса имеет только диагональные, поступательные компоненты (вращательных нет).
- Распределенная масса имеет как недиагональные поступательные, так и вращательные компоненты для элементов BAR (за исключением “торсионных”), BEAM и BEND.
- Игнорирование инерционных свойств может сказываться на результатах анализа механизмов с малой массой.



# Конечный элемент ROD



- Матрица жесткости:

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 \\ 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & -\frac{GJ}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & \frac{AE}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & \frac{GJ}{L} \end{bmatrix}$$

- “Классическая” связанная масса:

$$\mathbf{m} = \rho AL \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{6} & 0 \\ 0 & \frac{I}{3A} & 0 & \frac{I}{6A} \\ \frac{1}{6} & 0 & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{I}{6A} & 0 & \frac{I}{3A} \end{bmatrix} \quad \text{where } I = \int r^2 dA$$

# Конечный элемент ROD

- Сосредоточенная масса в “классической” формулировке (совпадает с формулировкой MSC.Nastran):

$$m = \rho AL \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

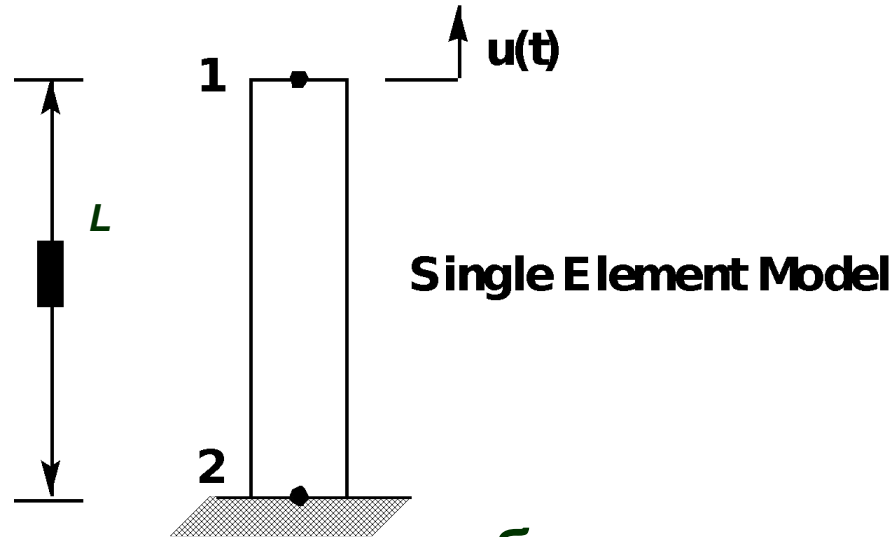
- Распределенная масса (формулировка MSC.Nastran):

$$m = \rho AL \begin{bmatrix} 5/12 & 0 & 1/12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/12 & 0 & 5/12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- Поступательные члены соответствуют результату осреднения сосредоточенной массы и “классической” связанной массы. Такое осреднение признано лучшим для элементов ROD и BAR.

# Распределенная масса в MSC.Nastran

- Рассмотрим стержень



- Точное значение частоты собственных колебаний (первая форма колебаний)

$$\omega_{14} = \frac{\pi\sqrt{E/\rho}}{2L} = 1.5708\sqrt{\frac{E/\rho}{2L}}$$

# Распределенная масса в MSC.Nastran

- **Различные аппроксимации**

- **Сосредоточенная масса**

$$\omega_{LM} = \sqrt{2} \frac{\sqrt{E/\rho}}{L} = 1.414 \frac{\sqrt{E/\rho}}{L}$$

(-10%)

- **“Классическая” связанная масса**

$$\omega_c = \sqrt{3} \frac{\sqrt{E/\rho}}{L} = 1.732 \frac{\sqrt{E/\rho}}{L}$$

(+10%)

- **MSC.Nastran**

- **Распределенная масса**

$$\omega_N = \sqrt{12.5} \frac{\sqrt{E/\rho}}{L} = 1.549 \frac{\sqrt{E/\rho}}{L}$$

(-1.4%)

# Единицы массы

- MSC.Nastran предполагает согласованность единиц. **ВЫ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ВНИМАТЕЛЬНЫ.**
- При необходимости вместо единиц массы могут быть использованы единицы веса. Затем с помощью оператора **PARAM,WTMASS** вес преобразуется в массу.
- Преобразование “вес - масса”:  
Масса =  $(1/G) \cdot \text{Вес}$  ( $G$  = ускорение свободного падения)  
Плотность =  $(1/G) \cdot \text{Удельный вес}$
- Оператор **PARAM,WTMASS**, выполняет преобразование с коэффициентом =  $1/G$ . По умолчанию коэффициент = 1,0.
- Пример:
  - При  $G = 386,4 \text{ in/sec}^2$  надо задать **PARAM, WTMASS, 0.00259**
- Оператором **PARAM,WTMASS** инициализируется однократное преобразование веса в массу (включая **MASSi**, **CONMi** и неконструкционные массы). Не используйте “смесь” массовых и весовых характеристик. Используйте либо массу, либо вес.

# Задание массы

- Плотность материала

- Операторы MATi

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MAT1	MID	E	G	NU	RHO	A	TREF	GE	
MAT1	2	30.0E6		0.3	7.76E-4				

- Скалярная масса

- CMASSi, PMASS

- “Узловые” массы

- CONM1 (матрица масс 6x6) – необходимо задать только половину данных, т.к. предполагается симметричность матрицы.
  - CONM2 (сосредоточенная масса)

M					
	M				
		M			
			I11		
			- I21	I22	
			- I31	- I32	I33

# Задание массы

- **Неконструкционная масса**
  - **Задание характеристик массы в операторе свойств элемента, которая не ассоциируется с его геометрическими параметрами: отношение массы к длине для 1-D элементов и отношение массы к площади для 2-D элементов.**

Defines a concentrated mass at a grid point.

**Format:**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CONM2	EID	G	CID	M	X1	X2	X3		
	I11	I21	I22	I31	I32	I33			

**Example:**

CONM2	2	15	6	49.7					
	16.2		16.2		7.8				

**Field Contents**

EID Element identification number. (Integer > 0)

G Grid point identification number. (Integer > 0)

CID Coordinate system identification number for CID of -1; see X1, X2, X3 below. (Integer > -1; Default = 0)

M Mass value. (Real)

X1, X2, X3 Offset distances from the grid point to the center of gravity of the mass in the coordinate system defined in field 4, unless CID = -1, in which case X1, X2, X3 are the coordinates, not offsets, of the center of gravity of the mass in the basic coordinate

Iij Mass moments of inertia measured at the mass center of gravity in the coordinate system defined by field 4. If CID=-1, the basic coordinate system is implied. (For I11, I22, and I33; Real > 0.0; for I21, I31, and I32; Real)

**Remarks:**

1. Element identification numbers should be unique with respect to all other element identification numbers
2. For a more general means of defining concentrated mass at grid points, see the CONM1 entry description.
3. The continuation is optional.
4. If CID = -1, offsets are internally computed as the difference between the grid point location and X1, X2, X3. The grid point locations may be defined in a nonbasic coordinate system. In this case, the values of Iij must be in a coordinate system that parallels the basic coordinate system.

(Continued)

Bulk Data Entry



5. The form of the inertia matrix about its center of gravity is taken as:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & & & & & \\ & \mathbf{M} & & & & \\ & & \mathbf{M} & & & \\ & & & \mathbf{I11} & & \\ & & & -\mathbf{I21} & \mathbf{I22} & \\ & & & -\mathbf{I31} & -\mathbf{I32} & \mathbf{I33} \end{bmatrix} \text{ symmetric}$$

where  $\mathbf{M} = \int \rho \, dV$

$$\mathbf{I11} = \int \rho (\mathbf{x}_2^2 + \mathbf{x}_3^2) \, dV$$

$$\mathbf{I22} = \int \rho (\mathbf{x}_1^2 + \mathbf{x}_3^2) \, dV$$

$$\mathbf{I33} = \int \rho (\mathbf{x}_1^2 + \mathbf{x}_2^2) \, dV$$

$$\mathbf{I21} = \int \rho \mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2 \, dV$$

$$\mathbf{I31} = \int \rho \mathbf{x}_1 \mathbf{x}_3 \, dV$$

$$\mathbf{I32} = \int \rho \mathbf{x}_2 \mathbf{x}_3 \, dV$$

and  $x_1, x_2, x_3$  are components of distance from the center of gravity in the coordinate system defined in field 4. The negative signs for the off-diagonal terms are supplied automatically. A warning message is issued if the inertia matrix is nonpositive definite, since this may cause fatal errors in dynamic analysis modules.

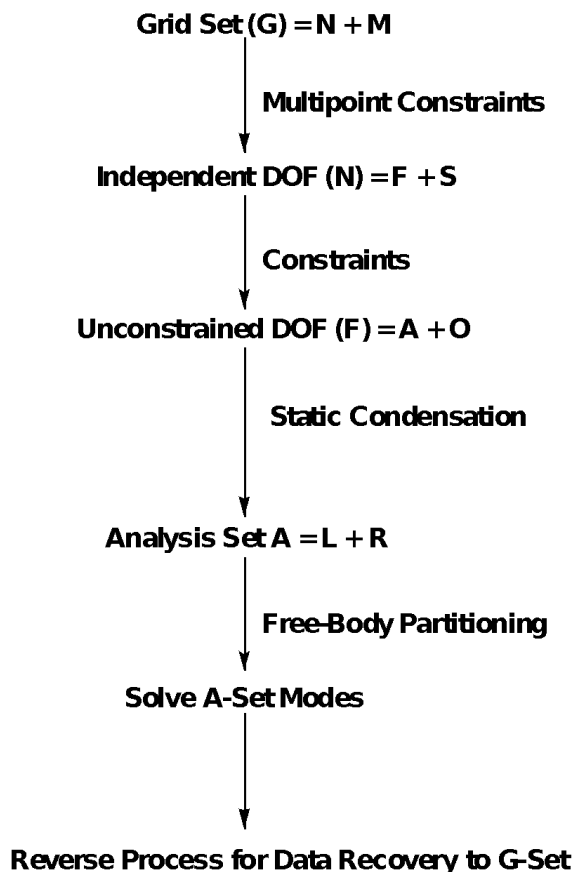
6. If CID > 0, then X1, X2, and X3 are defined by a local Cartesian system, even if CID references a spherical or cylindrical coordinate system. This is similar to the manner in which displacement coordinate systems are defined.

7. See the MSC.Nastran Reference Manual, Section 4.2 for a definition of coordinate system terminology.

Bulk Data Entry

# Основные операции над наборами степеней свободы в MSC.Nastran

- *MSC.Nastran Quick Reference Guide:*

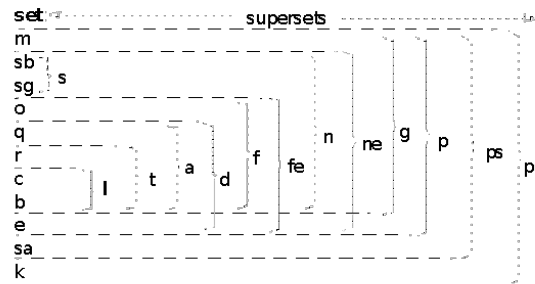


# Степени свободы в MSC.Nastran

Each degree of freedom is a member of one mutually exclusive "set". Set names have the following definitions:

Set Name	Definition
m	degree of freedom eliminated by multipoint constraints
sb*	degree of freedom eliminated by single-point constraints that are included in boundary condition changes and by the AUTOSPC feature
sg*	degrees of freedom eliminated by single-point constraints that are specified on the PS field on GRID Bulk Data entries
o	degrees of freedom omitted by structural matrix partitioning
q	generalized degrees of freedom for dynamic reduction or component mode synthesis
r	reference degrees of freedom used to determine free body motion
c	degrees of freedom which are free during component mode synthesis or dynamic reduction
b	degree of freedom fixed during component mode analysis or dynamic reduction
e	extra degrees of freedom introduced in dynamic analysis
sa	permanently constrained aerodynamic degrees of freedom
k	aerodynamic degrees of freedom

Each degree of freedom is also a member of one or more combined sets called "supersets." Supersets have the following definitions:



\* Strictly speaking, sb and sg are not exclusive with respect to one another. Degrees of freedom may exist in both sets simultaneously. Since these sets are not used explicitly in the solution sequences, this need not concern the user. However, those who use these sets in their own DMAPs should avoid redundant specifications when using these sets for partitioning or merging operations. That is, a degree of freedom should not be specified on both a PS field and a GRID entry (sg set) and on a selected SPC entry (sb set). Redundant specifications will cause UFM 2120 in the VEC module and behavior listed in MSC.Nastran DMAP Module Dictionary for the UPARTN module. These sets are exclusive, however, from the other mutually exclusive sets.

# Степени свободы в MSC.Nastran

Set Name	Meaning (+ indicates union of two sets)
$s = sb + sg$	all degrees of freedom eliminated by single point constraints
$\square = b + c$	the structural degrees of freedom remaining after the reference degrees of freedom are removed (degree of freedom left over)
$t = \square + r$	the total set of physical boundary degrees of freedom for superelements
$a = t + q$	the set assembled in superelement analysis
$d = a + e$	the set used in dynamic analysis by the direct method
$f = a + o$	unconstrained (free) structural degrees of freedom
$fe = f + e$	free structural degrees of freedom plus extra degrees of freedom
$n = f + s$	all structural degrees of freedom not constrained by multipoint constraints
$ne = n + e$	all structural degrees of freedom not constrained by multipoint constraints plus extra degrees of freedom
$g = n + m$	all structural (grid) degrees of freedom including scalar degrees of freedom
$p = g + e$	all physical degrees of freedom
$ps = p + sa$	physical and constrained aerodynamic degrees of freedom
$pa = ps + k$	physical set for aerodynamics
$fr = o + \square$	statically independent set minus the statically determinate supports ( $fr = f - q - r$ )
$v = o + c + r$	the set free to vibrate in dynamic reduction and component mode synthesis

The a-set and o-set created in the following ways:

1. If only OMITI entries are present then the o-set consists of degrees of freedom listed explicitly on OMITI entries. The remaining f-set degrees of freedom are placed in the b-set which is a subset of the a-set.
2. If ASETI or QSETI are present, then the a-set consists of all degrees of freedom listed on ASETI entries and any entries listing its subsets, such as QSETI, SUPORTI, CSETI, and BSETI entries. Any OMITI entries are redundant. The remaining f-set degrees
3. If there are no ASETI, QSETI, or OMITI entries present but there are SUPORTI, BSETI, or CSETI entries present then the entire f-set is placed in the a-set and the o-set is not created.
4. There must be at least one explicitly ASETI, QSETI, or OMITI entry for the o-set to exist, even if the ASETI, QSETI, or OMITI entry is redundant.

In dynamic analysis, additional vector sets are obtained by a modal transformation derived from real eigenvalue analysis of the a-set. These sets are as follows:

$$\begin{aligned} \xi_o &= \text{rigid body (zero frequency) modal degrees of freedom} \\ \xi_r &= \text{finite frequency modal degrees of freedom} \\ \xi_i &= \xi_o + \xi_r, \text{ the set of all modal degrees of freedom} \end{aligned}$$

One Vector set is defined that combines physical and modal degrees of freedom:

$$u_h = \xi_i + u_e, \text{ the set of all modal degrees of freedom}$$

The membership of each degree of freedom can be printed by use of the Bulk Data entries PARAM, USETPRT and PARAM, USETSEL.

# Степени свободы в MSC.Nastran

## Degree of Freedom Set Bulk Data Entries

Degrees of freedom are placed in sets as specified by the user on the following Bulk Data entries:

Name	Bulk Data Entry Name
m	MPC, MPCADD, MPCAX, POINTAX, RBAR, RBE1, RBE2, RBE3, RROD, RSPLINE, RTRPLT, GMBC, GMSPC*
sb	SPC, SPC1, SPCADD, SPCAX, FLSYM, GMSPC*, BNDGRID, (PARAM,AUTOSPC,YES)
sg	GRID, GRIDB, GRDSET (PS field)
o	OMIT, OMIT1, OMITAX, GRID (SEID field), SESET
q	QSET, QSET1
r	SUPPORT, SUPPORT1, SUPAX
c	CSET, CSET1
b	BSET, BSET1
e	EPOINT
sa	CAEROi
k	CAEROi
a	ASET, ASET1, Superelement exterior degrees of freedom, CSUPEXT

\*Placed in set only if constraints are not specified in the basic coordinate system.

In superelement analysis, the appropriate entry names are preceded by the letter SE, and have a field reserved for the superelement identification number. This identification is used because a boundary (exterior) grid point may be in one mutually exclusive set in one superelement and in a different set in the adjoining superelement. The SE-type entries are internally translated to the following types of entry for the referenced superelement:

Entry Type	Equivalent Type
SEQSETi	QSETi
SESUP	SUPPORT
SECSETi	CSETi
SEBSETi	BSETi

# Рекомендации по верификации модели

- **PARAM, GRDPNT, V1 ( $V1 > 0$ )**
  - Вычисление массо-инерционных характеристик
- **PARAM, USETPRT, V1 ( $V1 = 0, 1$  или  $2$ )**
  - Вывод таблиц наборов MSC.Nastran
- Проверка наличия жестких тел и равновесия с использованием модулей DMAP Alters
- Инженерное чутье