

Раздел 7

Анализ переходного процесса

Раздел 7. Анализ переходного процесса

- ВВЕДЕНИЕ В АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА.....7 - 4
- ПРЯМОЙ МЕТОД АНАЛИЗА.....7 - 5
- ДЕМПФИРОВАНИЕ ПРИ ПРМОМ МЕТОДЕ АНАЛИЗА.....7 - 9
- МОДАЛЬНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА.....7 - 10
- ДЕМПФИРОВАНИЕ ПРИ МОДАЛЬНОМ МЕТОДЕ АНАЛИЗА.....7 - 12
- ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ МОДАЛЬНОМ МЕТОДЕ АНАЛИЗА....7 - 17
- УПРАВЛЕНИЕ МОДАМИ.....7 - 18
- ЗАДАНИЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....7 - 19
- ОПЕРАТОР TLOAD1.....7 - 20
- ОПЕРАТОР TLOAD2.....7 - 22
- КОМБИНАЦИЯ НАГРУЗОК – ОПЕРАТОР DLOAD.....7 - 23
- ОПЕРАТОР DAREA.....7 - 24
- ПРИМЕР ОПЕРАТОРА DAREA.....7 - 25
- СТАТИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА – НЕПРЯМОЙ МЕТОД ЗАДАНИЯ.....7 - 26

Анализ переходного процесса (продолж.)

- СТАТИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА – ПРЯМОЙ МЕТОД ЗАДАНИЯ.....7 - 28
- ЗАМЕЧАНИЯ К СПОСОБУ ЗАДАНИЮ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....7 - 30
- НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ.....7 - 32
- ОПЕРАТОР TSTEP.....7 - 35
- МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ.....7 - 38
- ПРИМЕНЕНИЕ МОДАЛЬНОГО И ПРЯМОГО МЕТОДОВ АНАЛИЗА.....7 - 39
- УПРАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЕМ ПРИ АНАЛИЗЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА.....7 - 40
- ВИДЫ ВЫЧИСЛЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН.....7 - 42
- ПРИМЕР №3 – АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРЯМЫМ МЕТОДОМ...7 - 43
 - ВХОДНОЙ ФАЙЛ ДЛЯ ПРИМЕРА №3.....7 - 45
 - РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ПРИМЕРА №3.....7 - 46
- ПРИМЕР №4 – АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА МОДАЛЬНЫМ МЕТОДОМ.....7 - 51
 - ВХОДНОЙ ФАЙЛ ДЛЯ ПРИМЕРА №4.....7 - 53
 - РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ПРИМЕРА №4.....7 - 55

Введение в анализ переходного процесса

- Вычисление отклика на воздействие, зависящее от времени.
- Воздействие в явной форме зависит от времени. Все приложенные воздействия известны в любой момент времени.
- Вычисляются, обычно перемещения и ускорения узлов, силы и напряжения в элементах.
- Два типа анализа – прямой и модальный.

Прямой метод анализа

- Уравнение колебаний

$$[M] \{\ddot{u}(t)\} + [B] \{\dot{u}(t)\} + [K] \{u(t)\} = \{P(t)\}$$

- Отклик вычисляется в дискретные моменты времени с шагом Δt .
- Для представления $\{\dot{u}(t)\}$ и $\{\ddot{u}(t)\}$ в дискретные моменты времени используется метод центральных конечных разностей

$$\{\dot{u}_n\} = \frac{1}{2\Delta t} \{u_{n+1} - u_{n-1}\}$$

$$\{\ddot{u}_n\} = \frac{1}{\Delta t^2} \{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}\}$$

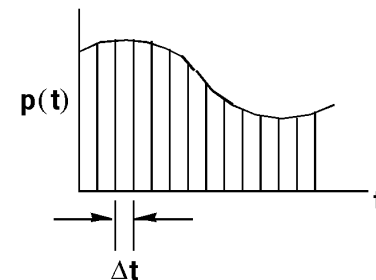
- Примечание: эти же уравнения используются в MSC.Nastran для вычисления скоростей и ускорений при подсчете результатов.

Прямой метод анализа

- Для численного интегрирования используется метод центральных разностей (с учетом осреднения внешнего воздействия по трем последовательным моментам времени)

$$\left[\frac{m}{\Delta t^2} \right] (u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) + \left[\frac{b}{2\Delta t} \right] (u_{n+1} - u_{n-1}) + \left[\frac{k}{3} \right] (u_{n+1} + u_n + u_{n-1}) = \frac{1}{3} (P_{n+1} + P_n + P_{n-1})$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{u_{n+1} + u_n + u_{n-1}}{3} \\ \frac{P_{n+1} + P_n + P_{n-1}}{3} \end{array} \right\} \text{Time Average "Filters"}$$



Прямой метод анализа

- Решение

$$[A_1]\{u_{n+1}\} = [A_2] + [A_3]\{u_n\} + [A_4]\{u_{n-1}\}$$

where $[A_1] = [M/\Delta t^2 + B/2\Delta t + K/3]$ Dynamic Matrix

$[A_2] = 1/3\{P_{n+1} + P_n + P_{n-1}\}$ Applied Force

$[A_3] = [2M/\Delta t^2 - K/3]$

$[A_4] = [-M/\Delta t^2 + B/2\Delta t - K/3]$

} Initial Conditions,
from Previous

- Решается путем декомпозиции матрицы A_1 и умножения на правую часть вышеприведенного уравнения.
- Метод аналогичен классическому методу Newmark-Beta.

Прямой метод анализа

- Матрицы M , B и K неизменны во времени.
- Если Δt неизменно в продолжении всего решения, то декомпозицию матрицы A_1 необходимо выполнять только один раз. При изменении Δt необходимо произвести повторную декомпозицию матрицы A_1 (что может быть затратной операцией).
- Временной интервал вывода результатов может быть больше шага решения (интегрирования) (например, при шаге решения $\Delta t = 0,001$ с и выводе результатов на каждом пятом шаге интегрирования шаг результатов будет равен $0,005$ с).

Демпфирование при прямом методе анализа

- Матрица демпфирования B составляется из нескольких матриц:

$$B = B^1 + B^2 + \frac{G}{W_3} K^1 + \frac{1}{W_4} \sum G_E K_E$$

где B^1 - элементы демпфирования (VISC,DAMP) + B2GG
 B^2 - прямой ввод матриц B2PP + передаточные функции
 G - коэффициент глобального конструкционного демпфирования (PARAM,G)
 W_3 - характерная частота - рад/с (PARAM,W3)
 K^1 - глобальная матрица жесткости
 G_e - коэффициент конструкционного демпфирования в элементе
(параметр G_E в операторе MATi)
 W_4 - характерная частота - рад/с (PARAM,W4)
 K_E - матрица жесткости элемента

- В анализе переходного процесса не допустимы комплексные коэффициенты. Поэтому конструкционное демпфирование учитывается введением эквивалентного вязкого демпфирования.
- По умолчанию значения параметров W_3 , W_4 равны 0. Если пользователь не задаст им ненулевые значения, соответствующие слагаемые в приведенном уравнении будут игнорироваться.

Модальный метод анализа

- Преобразуем физические координаты в модальные.

$$\{\mathbf{u}\} = [\Phi]\{\xi\}$$

- Временно пренебрежем демпфированием.

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{P}(t)\}$$

- Подставим уравнение (1) в уравнение (2)

$$[\mathbf{M}][\Phi]\{\ddot{\xi}\} + [\mathbf{K}][\Phi]\{\xi\} = \{\mathbf{P}(t)\}$$

- Умножим обе части уравнения (2) слева на $[\Phi^T]$

$$[\Phi^T][\mathbf{M}][\Phi]\{\ddot{\xi}\} + [\Phi^T][\mathbf{K}][\Phi]\{\xi\} = [\Phi^T]\{\mathbf{P}(t)\}$$

- где $\Phi^T \mathbf{M} \Phi$ - модальная матрица масс (диагональная)
- $\Phi^T \mathbf{K} \Phi$ - модальная матрица жесткости (диагональная)
- $\Phi^T \mathbf{P}$ - модальный вектор воздействия

Модальный метод анализа

- Уравнение (4) может быть записано как для несвязанной системы с одной степенью свободы (СС):

- $$m_i \ddot{\xi}_i + k_i \xi_i = p_i(t) \quad (5)$$

- где m_i - i -я модальная масса
- k_i - i -я модальная жесткость
- p_i - i -ое модальное воздействие

Демпфирование при модальном методе анализа

- Для матрицы демпфирования B преобразование с использованием собственного вектора ϕ не приводит к диагонализации результата:

$$\phi^T B \phi \neq \text{diagonal}$$

- Связанные задачи решаются в модальных координатах методом типа Newmark-Beta (аналогичного используемому при прямом анализе).

$$[A_1] \{\xi_{n+1}\} = [A_2] + [A_3] \{\xi_n\} + [A_4] \{\xi_{n-1}\}$$

где

$$[A_1] = [\phi^T] \left[\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{B}{2\Delta t} + \frac{K}{3} \right] [\phi] \quad \text{Dynamic Matrix}$$

$$[A_2] = \frac{1}{3} [\phi^T] \{P_{n+1} + P_n + P_{n-1}\} \quad \text{Applied Force}$$

$$[A_3] = [\phi^T] \left[\frac{2M}{\Delta t^2} - \frac{K}{3} \right] [\phi]$$

$$[A_4] = [\phi^T] \left[-\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{B}{2\Delta t} - \frac{K}{3} \right] [\phi]$$

} Initial Conditions,
from Previous

Демпфирование при модальном методе анализа

- При использовании *модального* демпфирования каждая мода имеет коэффициент демпфирования b_i .
- Уравнения колебаний становятся несвязанными

$$m_i \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + k_i \xi_i = p_i(t)$$

или

$$\ddot{\xi}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{\xi}_i + \omega_i^2 \xi_i = p_i(t)/m_i$$

где

$\zeta_i = b_i / (2m_i \omega_i)$ - модальный к-нт демпфирования;

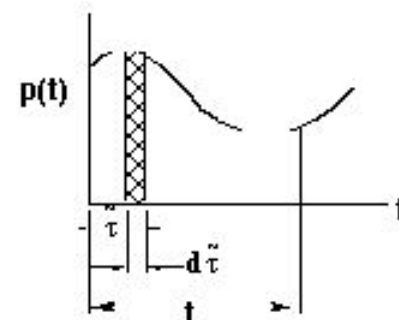
$\omega_i^2 = k_i / m_i$ - собственное значение.

Демпфирование при модальном методе анализа

- Модальный отклик несвязанной системы с одной СС вычисляется с помощью интеграла Дюамеля.
- Интеграл Дюамеля:

При модальном анализе ненулевые начальные условия не используются

$$\xi(t) = e^{-bt/2m} \left(\xi_0 \cos \omega_d t + \frac{\dot{\xi}_0 + (b/2m)\xi_0}{\omega_d} \sin \omega_d t \right) + e^{-bt/2m} \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t e^{b\tau/2m} p(\tau) \sin \omega_d (t-\tau) d\tau$$



Демпфирование при модальном методе анализа

- Наиболее эффективно использовать *модальное* демпфирование, поскольку при этом уравнения несвязанные
- Оператор TABDMP1 задает коэффициент модального демпфирования.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TABDMP1	ID	TYPE							+ABC
+ABC	f ₁	g ₁	f ₂	g ₂	f ₃	g ₃	f ₄	g ₄	+DEF
+DEF	f ₅	g ₅	ENDT				

- Type = G (по умолчанию), CRIT или Q

$$\zeta = b/b_{cr} = G/2$$

$$Q = 1/(2\zeta)$$

$$Q = 1/G$$

- Например: для демпфирования, составляющего 10% от критического

$$CRIT = 0.10$$

$$Q = 5.0$$

$$G = 0.2$$

Демпфирование при модальном методе анализа

- Оператор TABDMP1 в Bulk Data Section инициируется оператором SDAMPING в Case Control Section.
- f_i (в Гц) и g_i составляют пару “частота - демпфирование”. Демпфирование для мод собственных колебаний определяется линейной интерполяцией (за пределами таблицы производится линейная экстраполяция). ENDT – символ конца таблицы.
- Например: моды имеют частоты 1,0; 2,5; 3,6 и 5,5 Гц.

Entered		Computed	
f	g	f	g
2	0.10	1.0	0.02
3	0.18	2.5	0.14
4	0.13	3.6	0.15
6	0.13	5.5	0.13

- Может быть добавлено также немодальное демпфирование (PARAM, G; VISC; DAMP; GE в операторе MATi)
 - Вследствие связанности уравнений будет применено прямое интегрирование и вычислительные затраты вырастут
- Практическая рекомендация: при модальном анализе переходного процесса используйте только модальное демпфирование (TABDMP1). Если необходимо дискретное демпфирование – используйте прямой анализ.

Вычисление результатов при модальном методе анализа

- Результат расчета в физических координатах вычисляется путем суммирования модальных откликов.

$$\mathbf{u} = [\phi] \{ \xi \}$$

- Вычислительные затраты при изменении Δt при модальном методе не столь высоки, как при прямом методе. Однако, по-прежнему рекомендуется постоянное значение Δt .
- Шаг вывода результатов может быть больше шага решения (интегрирования).

Управление модами

- Могут быть необходимыми не все вычисленные моды. Часто только небольшого количество низших мод достаточно для вычисления динамического отклика.
- Оператор PARAM,LFREQ задает нижнюю границу частотного диапазона *учитываемых* мод.
- Оператор PARAM,HFREQ задает верхнюю границу частотного диапазона *учитываемых* мод.
- Оператор PARAM,LMODES задает количество низших мод, учитываемых при расчете.
- Неучет высших мод обуславливает отсутствие в отклике высокочастотных составляющих.

Задание внешнего воздействия

- Задание воздействия как функции времени.
- В MSC.Nastran предусматриваются различные методы:
 - TLOAD1 - “грубая сила”: табличное задание “время-сила”
 - TLOAD2 - эффективное аналитическое задание
 - LSEQ - конвертация статических нагрузок в динамические

Оператор TLOAD1

- Задаёт воздействие в форме:

$$P(t) = AF(t - \tau)$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TLOAD1	SID	EXCITEID	DELAY	TYPE	TID				

- где **A** - оператор (символ) пространственного распределения воздействия и масштабного фактора (DAREA, статическая нагрузка, тепловая нагрузка или LSEQ)
- τ - временной сдвиг (оператор DELAY)
- $F(t-\tau)$ - таблица (оператор TABLEDi)
- Оператор DELAY задаёт СС и временной сдвиг (может использоваться только с оператором DAREA).
- Оператор TABLEDi задаёт пары “время- воздействие”.
- Оператор TLOAD1 инициируется оператором DLOAD в Case Control Section.

Оператор TLOAD1

- Тип воздействия задается параметром TYPE.

TYPE	TYPE of Dynamic Excitation
0, L, LO, LOA or LOAD	Applied load (force or moment) (Default)
1, D, DI, DIS, or DISP	Enforced displacement using large mass or SPC/SPCD data
2, V, VE, VEL or VELO	Enforced velocity using large mass or SPC/SPCD data
3, A, AC, ACC or ACCE	Enforced acceleration using large mass or SPC/SPCD data

- В этом разделе будет рассматриваться воздействие только силовыми факторами (первый ряд таблицы). Вынужденные перемещения – см. Раздел 12.

Оператор TLOAD2

- **Задаёт воздействие в форме:**

где $\tilde{t} = t - T_1 - \tau$

$$P(t) = \begin{cases} 0 & \tilde{t} < 0 \text{ or } \tilde{t} > T_2 - T_1 \\ A\tilde{t}^B e^{C\tilde{t}} \cos(2\pi F\tilde{t} + P) & \end{cases}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TLOAD2	SID	EXCITEID	DELAY	TYPE	T1	T2	F	P	
	C	B							

- **A** оператор (символ) пространственного распределения воздействия
- и масштабного фактора (DAREA, статическая нагрузка, тепловая нагрузка или LSEQ)
- τ задается оператором DELAY (может использоваться только с оператором DAREA)
- **TYPE** задается как в операторе TLOAD1
- **T1, T2** временные константы ($T_2 > T_1$)
- **F** частота (Гц)
- **P** фазовый угол (градусы)
- **C** экспоненциальный коэффициенты
- **B** показатель степени
- Оператор TLOAD2 инициируется оператором DLOAD в Case Control Section.

Комбинация нагрузок – оператор DLOAD

- Эффективное воздействие P_C является суммой различных компонентов нагрузки P_K

$$P_C = S_C \sum_K S_K P_K$$

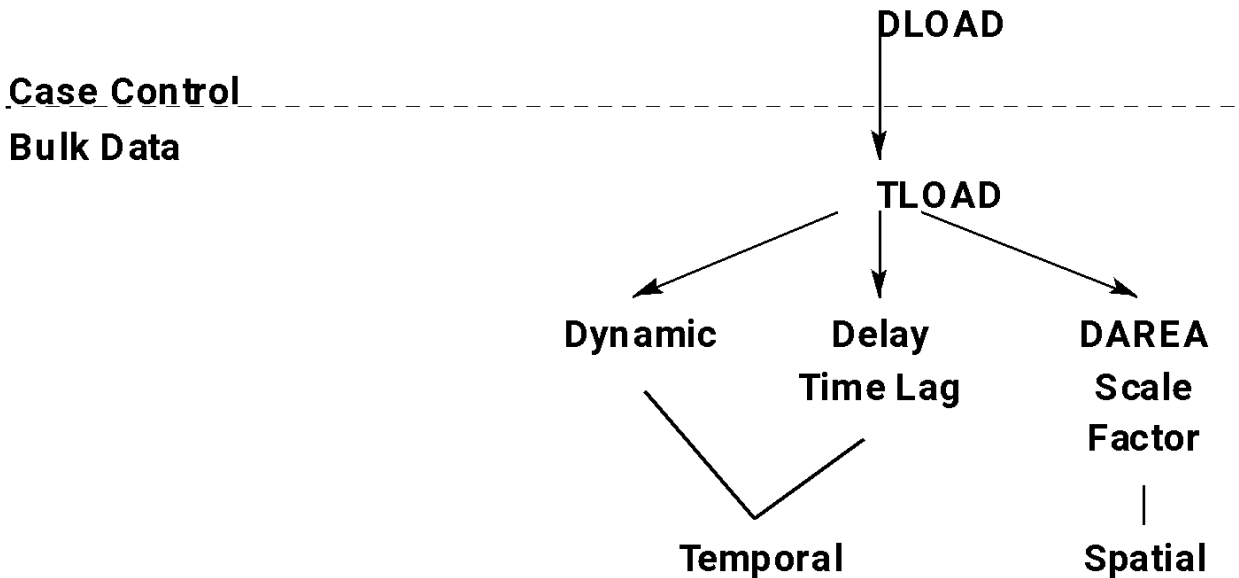
- где S_C – глобальный масштабный фактор
- S_K – масштабный фактор для k-го компонента
- P_K – идентификатор оператора TLOAD

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DLOAD	SID	S_C	S_I	P_1	S_2	P_2	-etc-		

- Операторы TLOAD1 и TLOAD2 должны иметь уникальные идентификаторы.
- Оператор DLOAD “объединяет” операторы TLOADi.
- Оператор DLOAD в Bulk Data Section инициируется оператором DLOAD в Case Control Section.

Оператор DAREA

- Определяет *степени свободы*, к которым прикладывается нагрузка, и соответствующий масштабный фактор.
- “Взаимоотношения” с другими операторами:



Пример оператора DAREA

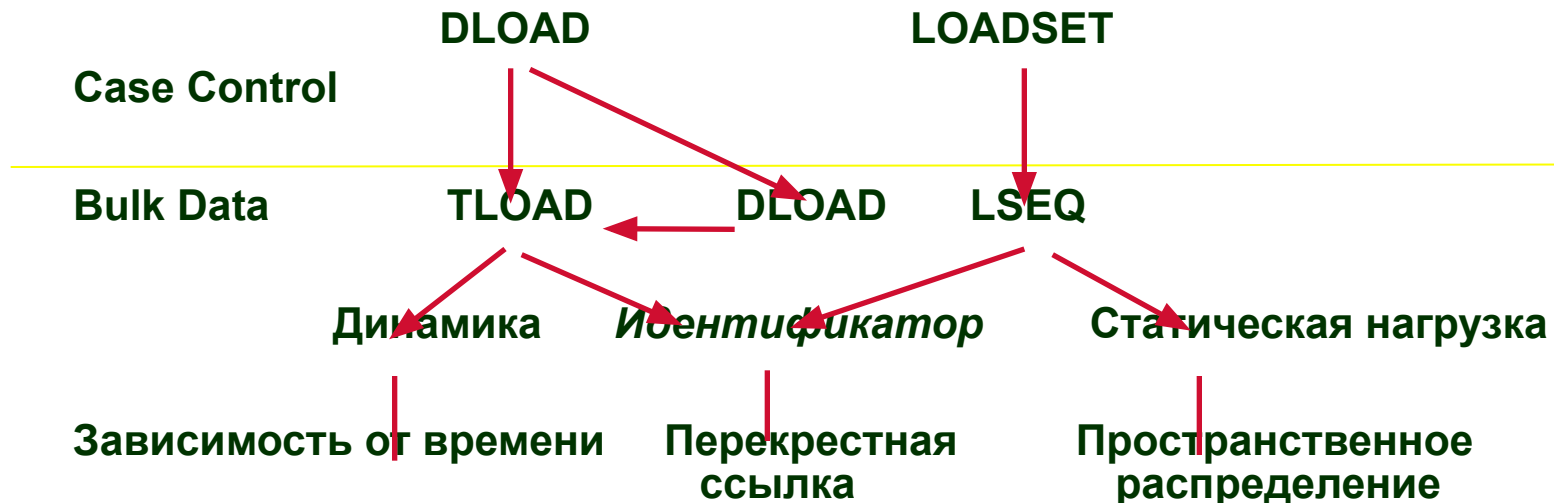
- **DLOAD = 35**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TLOAD1	SID	DAREA	DELAY	TYPE	TID				
TLOAD1	35	29	31	3	40				
DAREA	SID	POINT	COMPONENT	SCALE					
DAREA	29	30	1	5.2					
DELAY	SID	POINT	COMPONENT	LAG					
DELAY	31	30	1	0.2					
TABLED1	ID	XAXIS	YAXIS						
	X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X4	Y4	
TABLED1	40								
	-3	4	2	5.6	6	5.6	ENDT		

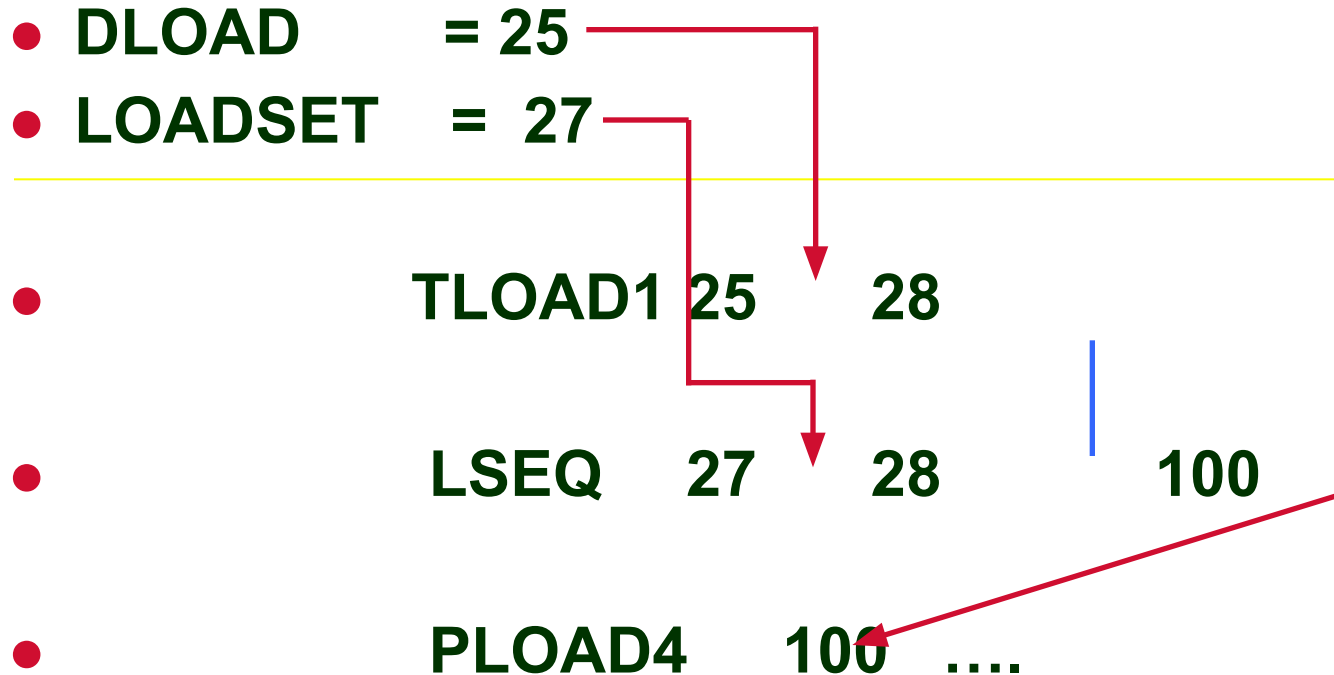
- **Результат: нагрузка, задаваемая оператором TLOAD1, умножается на 5,2, “сдвигается” по времени (в сторону запаздывания) на 0,2с и прикладывается к узлу 30 в направлении оси X (компонент T1).**

Статическая нагрузка – непрямой метод задания

- Задание статических нагрузок, прикладываемых “динамически”.
- Оператор LSEQ в Bulk Data Section инициируется оператором LOADSET в Case Control Section.
- Оператор LSEQ заменяет оператор DAREA, задавая *идентификатор* статической нагрузки.
- Взаимодействие операторов между собой

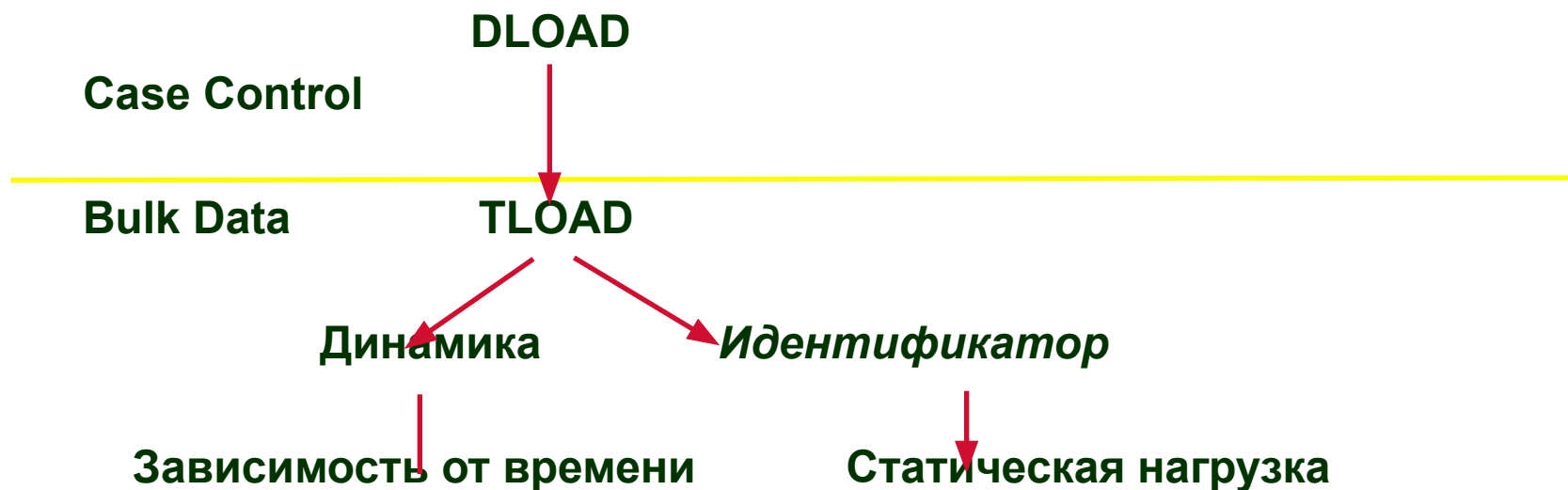


Статическая нагрузка – непрямой метод задания



Статическая нагрузка – прямой метод задания

- Задание статических нагрузок, прикладываемых “динамически”.
- *Идентификатор* непосредственно инициирует статическую нагрузку (например, PLOAD4)



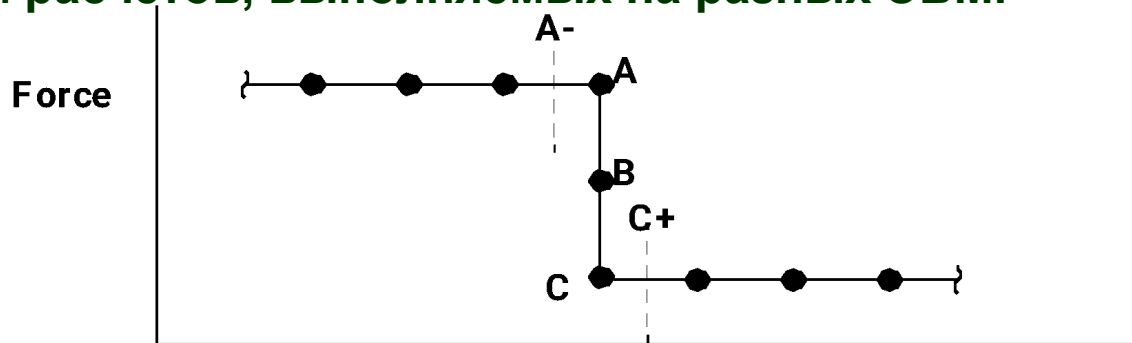
Статическая нагрузка – прямой метод задания

- **DLOAD = 25**

 - **TLOAD1 25 100**
 - **PLOAD4 100**
-
- The diagram illustrates the flow of load data. A red line starts from the value '25' in the 'DLOAD = 25' line, goes right, then down, and then right again to point at the '25' in 'TLOAD1 25 100'. From there, another red line goes down and then right to point at the '100' in 'PLOAD4 100'. A horizontal yellow line is positioned between the first and second bullet points.

Замечания к способу задания внешнего воздействия

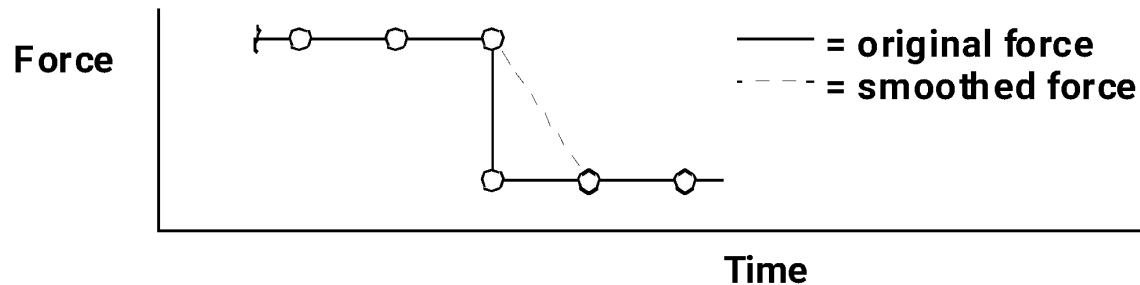
- Учитывайте осреднение нагрузок (1/3). Это сделает нагрузки более плавными и уменьшит влияние погрешностей.
- Избегайте “разрывов” в нагрузках. Это может приводить к различиям в результатах расчетов, выполняемых на разных ЭВМ.



- Если $N \cdot \Delta t = t(ABC)$, тогда MSC.Nastran вычислит: $Force = (A+C)/2 = B$.
- Однако, вследствие ошибок округления, на одной ЭВМ $N \cdot \Delta t = t(A-)$ и тогда $Force = A$. На другой ЭВМ может быть $N \cdot \Delta t = t(C+)$ и тогда $Force = C$.
-
- Результаты интегрирования будут различными в зависимости от того, чему равно $N \cdot \Delta t$: A, B или C.

Замечания к способу задания внешнего воздействия

- Сгладьте разрыв в силе на участке в один шаг Δt .



Начальные условия

- Начальные значения перемещений и/или скоростей можно учесть при использовании прямого метода анализа переходного процесса с помощью оператора TIC в Bulk Data Section. В стандартном модальном методе анализа учесть ненулевые начальные условия нельзя.
- Оператор TIC инициируется оператором IC в Case Control Section.
- Внимание: если начальные условия не указаны – они нулевые.
- Начальные условия можно задать только для СС, входящих в A-set.
- Значения $\{u_0\}$, $\{u_{-1}\}$, $\{P_0\}$ и $\{P_{-1}\}$, необходимые для вычисления $\{u_1\}$, определяются с использованием начальных условий, при этом ускорения при $t \leq 0$ полагаются равными нулю (скорости постоянны).

$$\{u_{-1}\} = \{u_0\} - \{\dot{u}_0\} \Delta t$$

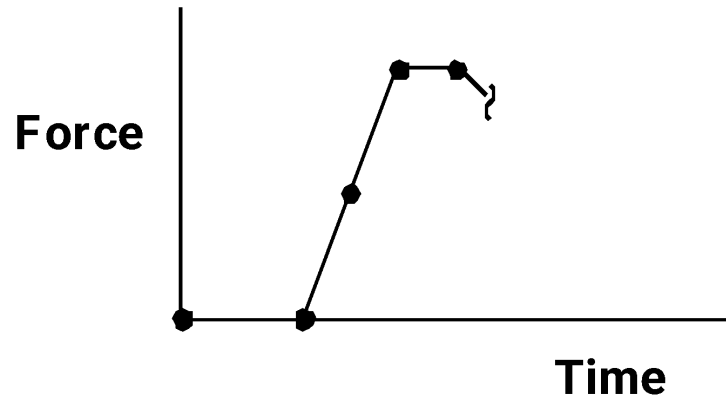
$$\{P_{-1}\} = [K]\{u_{-1}\} + [B]\{\dot{u}_0\}$$

- Нагрузка, заданная пользователем для $t = 0$, заменяется значением:

$$\{P_0\} = [K]\{u_0\} + [B]\{\dot{u}_0\}$$

Начальные условия

- Практическая рекомендация: при любом типе динамического воздействия, по-возможности, предусматривать хотя бы один шаг решения с “нулевой” нагрузкой (до того, как ее величина примет действительное значение).



Defines values for the initial conditions of variables used in structural transient analysis. Both displacement and velocity values may be specified at independent degrees of freedom. This entry may not be used for heat transfer analysis.

Format:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TIC	SID	G	C	U0	V0				

Example:

TIC	1	3	2	5	-6				
-----	---	---	---	---	----	--	--	--	--

Field	Contents
SID	Set identification number. (Integer > 0)
G	Grid, scalar, or extra point identification number. (integer > 0)
C	Component numbers. (Integer zero or blank for scalar or extra points, any one of the Integers 1 through 6 for a grid point.)
U0	Initial displacement. (Real)
V0	Initial velocity. (Real)

Remarks:

1. Transient initial condition sets must be selected with the Case Control command IC = SID. Note the use of IC in the Case Control command versus TIC on the Bulk Data entry. For heat transfer, the IC Case Control command selects TEMP or TEMPD entries for
2. If no TIC set is selected in the Case Control Section, all initial conditions are assumed to be zero.
3. Initial conditions for coordinates not specified on TIC entries will be assumed zero.
4. Initial conditions may be used only in direct formulation. In a modal formulation the initial conditions are all zero.

Bulk Data Entry

Оператор TSTEP

- **Задаёт шаг интегрирования для прямого и модального методов анализа.**
 - Ошибки интегрирования растут с ростом собственных частот.
 - Рекомендуется, чтобы на периоде самой высокочастотной составляющей отклика укладывалось не меньше восьми шагов Δt .
- **Оператор TSTEP в Bulk Data Section, задающий шаги решения и вывода результатов, инициируется оператором TSTEP в Case Control Section.**
- **Если Δt постоянен, то затраты на интегрирование прямо пропорциональны количеству шагов по времени.**
- **Необходимо задавать длительность моделирования достаточную для исследования низкочастотных составляющих отклика.**
- **Пользователь может изменить шаг. Предполагается постоянство \ddot{u} при $t \leq N\Delta t_1$. На базе \ddot{u} вычисляются новые начальные условия для продолжения интегрирования начиная с $\{u_n\}$. Допущение постоянства ускорений обеспечивает плавность интегрирования в “переходной” зоне.**

$$\{\dot{u}_0\} = \frac{1}{\Delta t_1} \{u_N - u_{N-1}\}$$

$$\{\ddot{u}_0\} = \frac{1}{\Delta t_1^2} \{u_N - 2u_{N-1} + u_{N-2}\}$$

Оператор TSTEP

- Начальные условия для нового этапа интегрирования:

$$\begin{aligned}\{u_0\} &= \{u_N\} \\ \{u_{-1}\} &= \{u_N\} - \Delta t_2 \left\{ \dot{u}_0 \right\} - \frac{1}{2} \Delta t_2^2 \{ \ddot{u}_0 \} \\ \{P_0\} &= \{P_N\} \\ \{P_{-1}\} &= [K] \{u_{-1}\} + [B] \left\{ \dot{u}_{-1} \right\} + [M] \{ \ddot{u}_{-1} \} \\ &= [K] \{u_{-1}\} + [B] \left\{ \dot{u}_0 - \Delta t_2 \ddot{u}_0 \right\} + [M] \{ \ddot{u}_0 \}\end{aligned}$$

Uniform
Acceleration

- Примечание: необходимо снова вычислить матрицы A_1 - A_4 (см. стр. 7-7), а матрицу A_1 - еще и обратить.

Defines time step intervals at which a solution will be generated and output in transient analysis.

Format:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TSTEP	SID	N1	DT1	NO1						
		N2	DT2	NO2						
		-etc.-								

Example:

TSTEP	2	10	0.001	5						
		9	0.01	1						

Field

Contents

- SID Set identification number. (Integer > 0)
- Ni Number of time steps of value DTi. (integer ≥ 1)
- DTi Time increment. (Real ≥ 0.0)
- NOi Skip factor for output. Every NOi-th step will be saved for output. (Integer > 0; Default = 1)

Remarks:

1. TSTEP entries must be selected with the Case Control command TSTEP = SID.
2. Note that the entry permits changes in the size of the time step during the course of the solution. Thus, in the example shown, there are 10 time steps of value .001 followed by 9 time steps of value .01. Also, the user has requested that output be reco
3. See the MSC.Nastran Basic Dynamic Analysis User's Guide, Chapter 10 for a discussion of considerations leading to the selection of time steps.
4. In modal frequency response analysis (SOLs 111 and 146), this entry is required only when TLOADi is requested; i.e., when Fourier methods are selected.
5. The maximum and minimum displacement at each time step and the SIL numbers of these variables can be printed by altering DIAGON(30) before the transient module TRD1 and by altering DIAGOFF(30) after the module. This is useful for runs that terminate due
6. For hear transfer analysis in SOL 159, use the TSTEPNL entry.

Методы вычисления результатов

- Предусмотрены три метода вычисления перемещений и напряжений в модальном анализе: модальных перемещений, матричный и модальных ускорений.
- В методе модальных перемещений по ним вычисляются физические перемещения, а затем - определяются напряжения. Количество операций пропорционально количеству шагов по времени (T).
- В матричном методе вычисляются физические перемещения и напряжения в элементах для каждой моды, а затем вычисляются суммарные перемещения и напряжения как суммы этих величин по всем модам. Вычислительные затраты пропорциональны количеству мод (N).

$$\frac{\text{Cost of matrix method}}{\text{Cost of mode displacement method}} = \frac{N}{T}$$

- Поскольку обычно $N \ll T$, матричный метод “дешевле”.
- Матричный метод задан “по умолчанию” и рекомендуется для большинства случаев. Метод модальных перемещений может быть инициирован с помощью параметра PARAM, DDRMM, -1.
- Метод модальных ускорений автоматически задействуется при вычислении квазистатического отклика всех высокочастотных мод (требуется также “подключение” метода модальных перемещений, подробнее - см. Приложение F).

Применение модального и прямого методов анализа

	<u>Modal</u>	<u>Direct</u>
Small Model		X
Large Model	X	
Few Time Steps		X
Many Time Steps	X	
High Frequency Excitation		X
Nonlinearities		X
Initial Conditions		X

Управление решением при анализе переходного процесса

- **Executive Control Section**

- **SOL <см. таблицу>**

Method	Structured Solution Sequences
Direct	109
Modal	112

- **Case Control Section**

- **DLOAD** (требуется при обоих методах решения)
- **LOADSET** (может применяться при обоих методах)
- **METHOD** (требуется при модальном методе)
- **SDAMPING** (может применяться при модальном методе)
- **IC** (может применяться при прямом методе)
- **TSTEP** (требуется при обоих методах решения)

Управление решением при анализе переходного процесса

● Bulk Data Section

- ASET,OMIT (может применяться при обоих методах)
 - EIGRL or EIGR (требуется при модальном методе)
 - TSTEP (требуется при обоих методах решения)
 - TIC (может применяться при прямом методе)
 - TLOADi (требуется при обоих методах решения)
 - LSEQ (может применяться при обоих методах)
 - TABLEDi (может применяться при обоих методах)
 - DAREA (требуется при обоих методах решения*)
 - DELAY (может применяться при обоих методах)
 - DLOAD (может применяться при обоих методах)
 - TABDMP1 (может применяться при модальном методе)
- *Идентификатор оператора DAREA необходим; если же применяется оператор LSEQ, то сам оператор DAREA может отсутствовать.

Виды вычисляемых величин

- Результаты вычислений для узлов
 - ACCELERATION
 - DISPLACEMENT (или VECTOR)
 - GPSTRESS
 - NLLOAD (вывод значений нелинейных нагрузок)
 - OLOAD (вывод значений прилагаемых нагрузок)
 - SACCELERATION
 - SDISPLACEMENT
 - SVELOCITY
 - SVECTOR (вывод результатов вычислений собственных форм для A-set)
 - SPCFORCES
 - VELOCITY
 - MPCFORCE
- Результаты вычислений для элементов
 - ELSTRESS (или STRESS)
 - ELFORCE (или FORCE)
 - STRAIN
- Специальный оператор
 - OTIME (задание моментов времени, в которые должны выводиться результаты; работает совместно с оператором TSTEP)

Пример №3

Анализ переходного процесса прямым методом

Пример №3. Анализ переходного процесса прямым методом

- Используя модель из Примера №1, прямым методом определите колебания плоской пластины под действием возмущения, зависящего от времени. Конструкция нагружается давлением 1 фунт/кв. дюйм, изменяющимся с $f=250$ Гц, а также силой в 50 фунтов, приложенной к углу пластины и изменяющейся с $f=250$ Гц и сдвинутой по фазе на 180° относительно давления. Длительность действия обоих возмущений -0,008 с. Конструкционное демпфирование $g=0,06$. Указанное демпфирование конвертировать в вязкое на частоте 250 Гц. Длительность процесса 0,04 с.

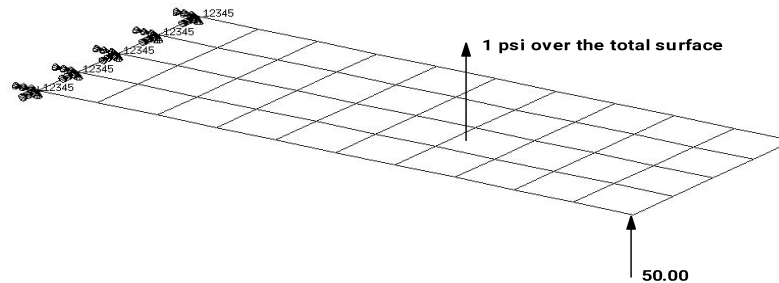


Рис. 7

Входной файл для Примера №3

```
ID SEMINAR, PROB3
SOL 109
TIME 30
CEND
TITLE= TRANSIENT RESOPONSE WITH TIME DEPENDENT
PRESSURE AND POINT LOADS
SUBTITLE= USE THE DIRECT METHOD
ECHO= PUNCH
SPC= 1
SET 1= 11, 33, 55
DISPLACEMENT= 1
SUBCASE 1
DLOAD= 700 $ SELECT TEMPORAL COMPONENT OF
TRANSIENT LOADING
LOADSET= 100 $ SELECT SPACIAL DISTRIBUTION OF
TRANSIENT LOADING
TSTEP= 100 $ SELECT INTERGRATION TIME STEPS
$
OUTPUT (XYPLOT)
XGRID=YES
YGRID=YES
XTITLE = TIME (SEC)
YTITLE- DISPLACEMENT RESPONSE AT CENTER TIP
XYPLOT DISP RESONSE / 11(T3)
YTITLE= DISPLACEMENT RESPONSE AT CENTER TIP
XYPLOT DISP RESPONSE / 33 (T3)
YTITLE= DISPLACEMENT RESPONSE AT OPPOSITE CORNER
XYPLOT DISP RESPONSE / 55 (T3)
$
BEGIN BULK
PARAM, COUPMASS, 1
PARAM, WTMASS, 0.00259
$
INCLUDE 'plate.bdf'
$

$ SPECIFY STRUCTURAL DIAMPING
$ 3 PERCENT AT 250 HZ. = 1571 RAD/SEC
$
PARAM, G, 0.06
PARAM, W3, 1571.
$
$ APPLY UNTI PRESSURE LOAD TO PLATE
$
LSEQ, 100, 300, 400
$
PLOAD2, 400, 1., 1, THRU, 40
$
$ VARY PRESSURE LOAD (250HZ)
$
TLOAD2, 200, 300, , 0, 0., 8.E-3, 250., -90.
$
$ APPLY POINT LOAD OUT OF PAHSE WITH PRESSURE LOAD
$
TLOAD2, 500, 600, , 0, 0., 8.E-3, 250., 90.
$
DAREA, 600, 11, 3, 1.
$
$ COMBINE LOADS
$
DLOAD, 700, 1., 1., 200, 50., 500
$
$ SPECIFY INTERGRATION TIME STEPS
$
TSTEP, 100, 100, 4.0E-4, 1
$
ENDDATA
```

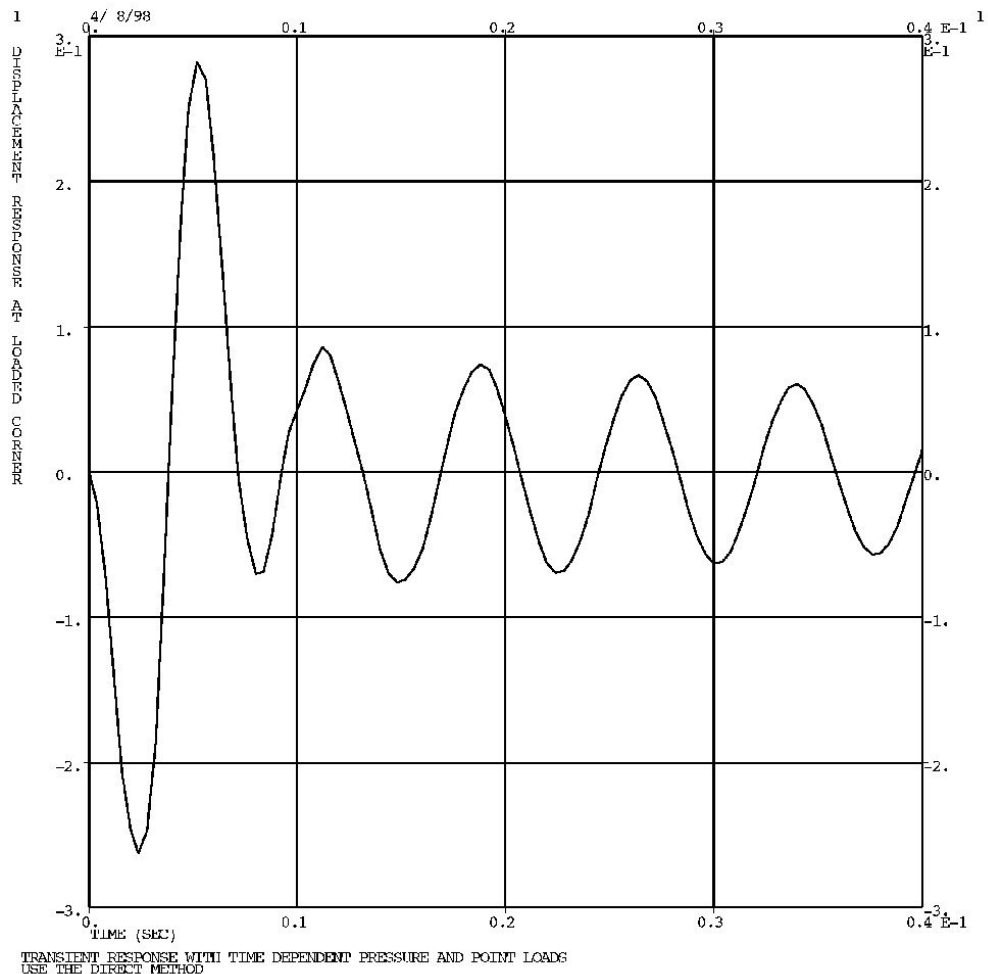
Результаты решения Примера №3

```
0
POINT-ID = 11
SUBCASE 1ML
DISPLACEMENT VECTOR
TIME TYPE T1 T2 T3 R1 R2 R3
.0 G .0 .0 .0 .0 .0 .0
4.000000E-04 G .0 .0 -2.173625E-02 1.104167E-02 1.050818E-02 .0
8.000000E-04 G .0 .0 -7.204904E-02 2.847414E-02 2.852519E-02 .0
1.200000E-03 G .0 .0 -1.433462E-01 4.082027E-02 4.915178E-02 .0
.
.
.
3.999996E-02 G .0 .0 1.535974E-02 5.380195E-06 -4.281028E-03 .0
.
.
.
.
POINT-ID = 33
DISPLACEMENT VECTOR
TIME TYPE T1 T2 T3 R1 R2 R3
.0 G .0 .0 .0 .0 .0 .0
4.000000E-04 G .0 .0 -1.122398E-02 9.220219E-03 6.138594E-03 .0
8.000000E-04 G .0 .0 -4.424753E-02 2.576699E-02 2.014980E-02 .0
1.200000E-03 G .0 .0 -1.030773E-01 3.819037E-02 3.922388E-02 .0
1.600000E-03 G .0 .0 -1.756290E-01 2.927664E-02 5.577566E-02 .0
2.000000E-03 G .0 .0 -2.443317E-01 1.765907E-03 6.761354E-02 .0
.
.
.
.
3.839996E-02 G .0 .0 -4.946285E-02 -3.005945E-05 1.376158E-02 .0
3.879996E-02 G .0 .0 -3.729695E-02 1.898671E-05 1.037927E-02 .0
3.919996E-02 G .0 .0 -2.121863E-02 3.488552E-05 5.907703E-03 .0
3.959996E-02 G .0 .0 -3.002587E-03 -2.227573E-07 8.361285E-04 .0
3.999996E-02 G .0 .0 1.535096E-02 -3.032754E-05 -4.274250E-03 .0
```

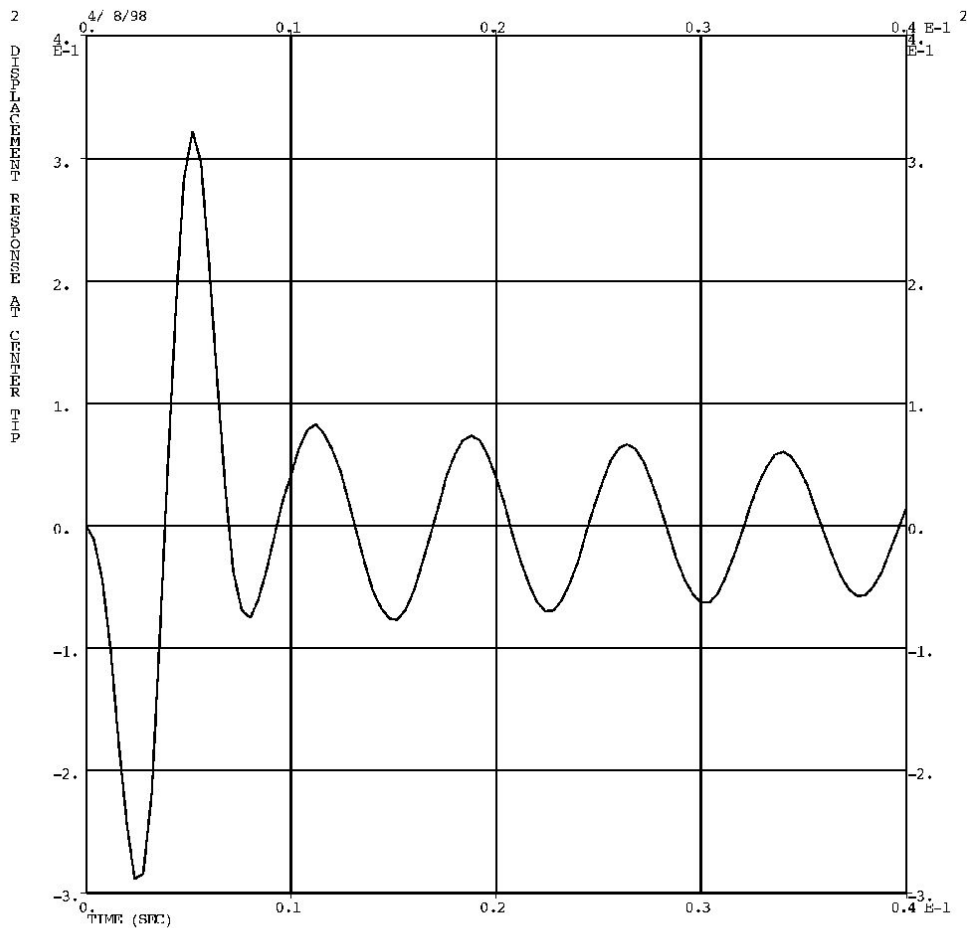
Результаты решения Примера №3

```
0
1 TRANSIENT RESPONSE WITH TIME DEPENDENT PRESSURE AND POINT LOADS APRIL 8, 1998 MSC.Nastran 4/ 6/98 PAGE 16
  USE THE DIRECT METHOD
0
0 SUBCASE 1
0 X Y - O U T P U T S U M M A R Y ( R E S P O N S E )
0 SUBCASE CURVE FRAME XMIN-FRAME/ XMAX-FRAME/ YMIN-FRAME/ X FOR YMAX-FRAME/ X FOR
  ID TYPE NO. CURVE ID. ALL DATA ALL DATA ALL DATA YMIN ALL DATA YMAX
0 1 DISP 1 11( 5) 0.000000E+00 3.999996E-02 -2.623279E-01 2.400000E-03 2.823930E-01 5.199999E-03
  0.000000E+00 3.999996E-02 -2.623279E-01 2.400000E-03 2.823930E-01 5.199999E-03
0 1 DISP 2 33( 5) 0.000000E+00 3.999996E-02 -2.882706E-01 2.400000E-03 3.220944E-01 5.199999E-03
  0.000000E+00 3.999996E-02 -2.882706E-01 2.400000E-03 3.220944E-01 5.199999E-03
0 1 DISP 3 55( 5) 0.000000E+00 3.999996E-02 -3.165697E-01 2.800000E-03 3.570921E-01 5.199999E-03
  0.000000E+00 3.999996E-02 -3.165697E-01 2.800000E-03 3.570921E-01 5.199999E-03
1 TRANSIENT RESPONSE WITH TIME DEPENDENT PRESSURE AND POINT LOADS APRIL 8, 1998 MSC.Nastran 4/ 6/98 PAGE 17
  USE THE DIRECT METHOD
0
* * * * D B D I C T P R I N T * * * * SUBDMAP = PRTSUM , DMAP STATEMENT NO. 13
0 * * * * A N A L Y S I S S U M M A R Y T A B L E * * * *
0 SEID PEID PROJ VERS APRCH SEMG SEMR SEKR SELG SELR MODES DYNRED SOLLIN PVALID SOLN1 LOOPID DESIGN CYCLE SENSITIVITY
-----
0 0 1 1 ' ' T T T T T F F T 0 F -1 0 F
0SEID = SUPERELEMENT ID.
PEID = PRIMARY SUPERELEMENT ID OF IMAGE SUPERELEMENT.
PROJ = PROJECT ID NUMBER.
VERS = VERSION ID.
APRCH = BLANK FOR STRUCTURAL ANALYSIS. HEAT FOR HEAT TRANSFER ANALYSIS.
SEMG = STIFFNESS AND MASS MATRIX GENERATION STEP.
SEMR = MASS MATRIX REDUCTION STEP (INCLUDES EIGENVALUE SOLUTION FOR MODES).
SEKR = STIFFNESS MATRIX REDUCTION STEP.
SELG = LOAD MATRIX GENERATION STEP.
SELR = LOAD MATRIX REDUCTION STEP.
MODES = T (TRUE) IF NORMAL MODES OR BUCKLING MODES CALCULATED.
DYNRED = T (TRUE) MEANS GENERALIZED DYNAMIC AND/OR COMPONENT MODE REDUCTION PERFORMED.
SOLLIN = T (TRUE) IF LINEAR SOLUTION EXISTS IN DATABASE.
PVALID = P-DISTRIBUTION ID OF P-VALUE FOR P-ELEMENTS
LOOPID = THE LAST LOOPID VALUE USED IN THE NONLINEAR ANALYSIS. USEFUL FOR RESTARTS.
SOLN1 = T (TRUE) IF NONLINEAR SOLUTION EXISTS IN DATABASE.
DESIGN CYCLE = THE LAST DESIGN CYCLE (ONLY VALID IN OPTIMIZATION).
SENSITIVITY = SENSITIVITY MATRIX GENERATION FLAG.
1 * * * * E N D O F J O B * * * *
```

Результаты решения Примера №3



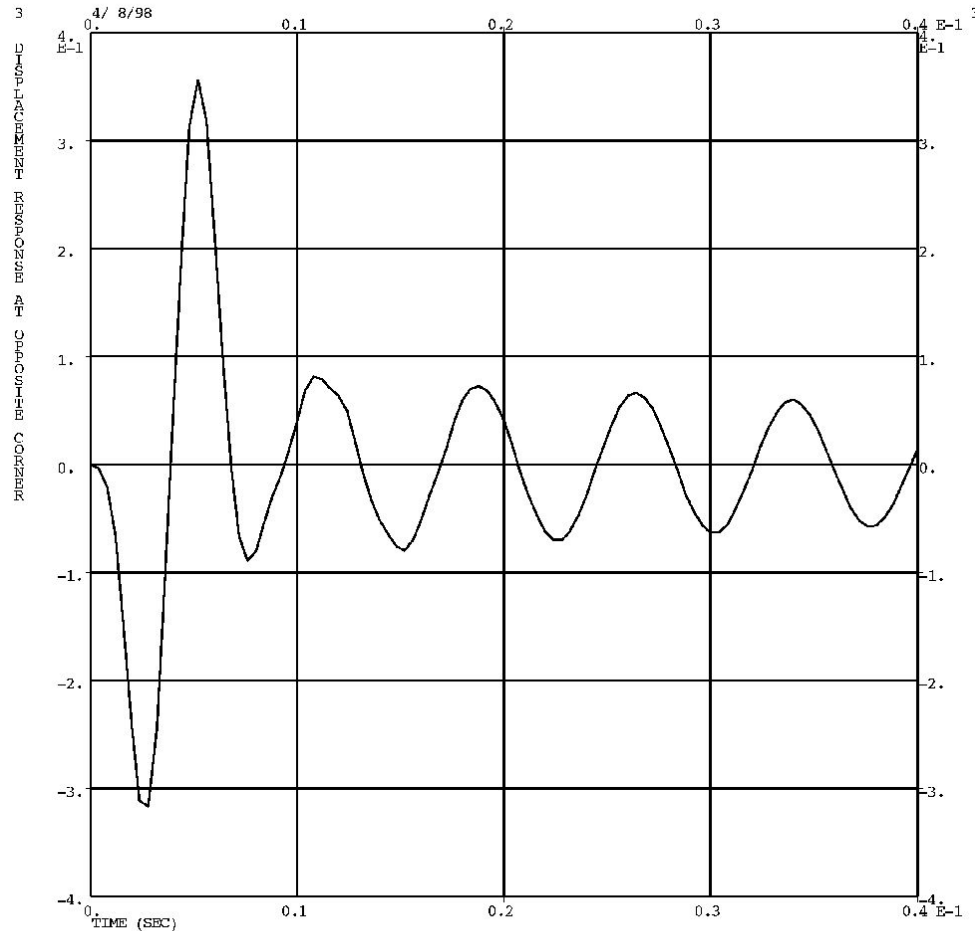
Результаты решения Примера №3



TRANSIENT RESPONSE WITH TIME DEPENDENT PRESSURE AND POINT LOADS
USE THE DIRECT METHOD

SUBCASE 1

Результаты решения Примера №3



TRANSIENT RESPONSE WITH TIME DEPENDENT PRESSURE AND POINT LOADS
USE THE DIRECT METHOD

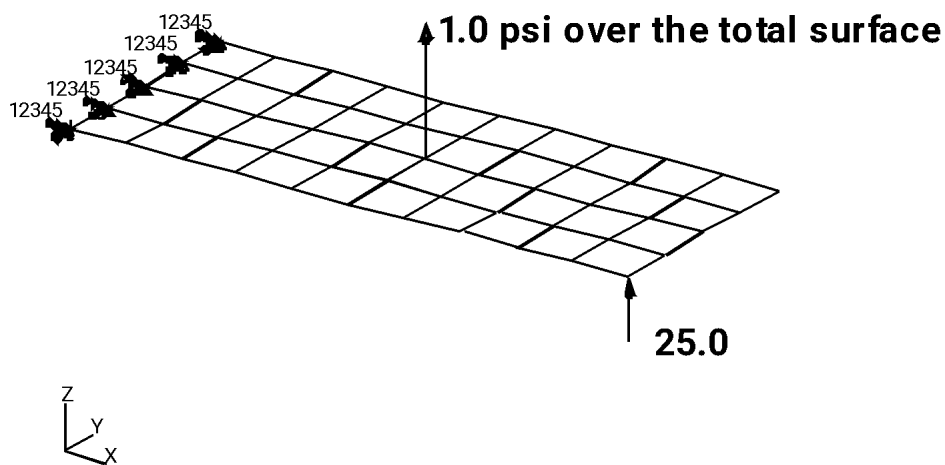
SUBCASE 1

Пример №4

Анализ переходного процесса модальным методом

Пример №4. Анализ переходного процесса модальным методом

- Используя модель из Примера №1, модальным методом определите колебания плоской пластины под действием возмущения, зависящего от времени. Конструкция нагружается давлением 1 фунт/кв. дюйм, изменяющимся с $f=250$ Гц, а также силой в 25 фунтов, приложенной к углу пластины и изменяющейся с $f=250$ Гц. Сила прикладывается начиная с 0,004 с. Действие обоих возмущений заканчивается через 0,008 с. Модальное демпфирование $\zeta=0,06$ для всех мод. Длительность процесса 0,04 с.



Входной файл для Примера №4

```
ID SEMINAR, PROB4
SOL 112
TIME 30
CEND
TITLE = TRANSIENT RESPONSE WITH TIME DEPENDENT
PRESSURE AND POINT LOADS
SUBTITLE = USE THE MODAL METHOD
ECHO = UNSORTED
SPC = 1
SET 111 = 11, 33, 55
DISPLACEMENT(SORT2) = 111
SDAMPING = 100
SUBCASE 1
METHOD = 100
DLOAD = 700
LOADSET = 100
TSTEP = 100
$
OUTPUT (XYPLOT)
XGRID=YES
YGRID=YES
XTITLE= TIME (SEC)
YTITLE= DISPLACEMENT RESPONSE AT LOADED CORNER
XYPLOT DISP RESPONSE / 11 (T3)
YTITLE= DISPLACEMENT RESPONSE AT TIP CENTER
XYPLOT DISP RESPONSE / 33 (T3)
YTITLE= DISPLACEMENT RESPONSE AT OPPOSITE CORNER
XYPLOT DISP RESPONSE / 55 (T3)
$
```

```
BEGIN BULK
PARAM, COUPMASS, 1
PARAM, WTMASS, 0.00259
$
$ PLATE MODEL DESCRIBED IN NORMAL MODES EXAMPLE
PROBLEM
$
INCLUDE 'plate.bdf'
$
$ EIGENVALUE EXTRACTION PARAMETERS
$
EIGRL, 100, , , 5
$
$ SPECIFY MODAL DAMPING
$
TABDMP1, 100, CRIT,
+, 0., .03, 10., .03, ENDT
$
$ APPLY UNIT PRESSURE LOAD TO PLATE
$
LSEQ, 100, 300, 400
$
```

Входной файл для Примера №4

```
PLOAD2, 400, 1., 1, THRU, 40
⌘
⌘ VARY PRESSURE LOAD (250 HZ)
⌘
TLOAD2, 200, 300, , 0, 0., 8.E-3, 250., -90.
⌘
⌘ APPLY POINT LOAD (250 HZ)
⌘
TLOAD2, 500, 600,610, 0, 0.0, 8.E-3, 250., -90.
⌘
DAREA, 600, 11, 3, 1.
DELAY, 610, 11, 3, 0.004
⌘
⌘ COMBINE LOADS
⌘
DLOAD, 700, 1., 1., 200, 25., 500
⌘
⌘ SPECIFY INTERGRATION TIME STEPS
⌘
TSTEP, 100, 100, 4.0E-4, 1
⌘
ENDDATA
```

Результаты решения Примера №4

```

*** SYSTEM INFORMATION MESSAGE 6916 (DFMSYN)
    DECOMP ORDERING METHOD CHOSEN: DEFAULT, ORDERING METHOD USED: MMD
*** USER INFORMATION MESSAGE 5010 (LNCILD)
    STURM SEQUENCE DATA FOR EIGENVALUE EXTRACTION.
    TRIAL EIGENVALUE = 9.433958D+07, CYCLES = 1.545849D+03 NUMBER OF EIGENVALUES BELOW THIS VALUE = 3
*** USER INFORMATION MESSAGE 5010 (LNCILD)
    STURM SEQUENCE DATA FOR EIGENVALUE EXTRACTION.
    TRIAL EIGENVALUE = 2.281618D+08, CYCLES = 2.404039D+03 NUMBER OF EIGENVALUES BELOW THIS VALUE = 5
    
```

TABLE OF SHIFTS: (LNNRIGL)

SHIFT #	SHIFT VALUE	FREQUENCY, CYCLES	# EIGENVALUES BELOW	# NEW EIGENVALUES FOUND
1.	9.4339576E+07	1.5458490E+03	3	6
2.	2.2816176E+08	2.4040393E+03	5	0

```

1  TRANSIENT RESPONSE WITH TIME DEPENDENT PRESSURE AND POINT LOADS          APRIL 8, 1998 MSC.Nastran 4/ 6/98 PAGE 10
   USE THE MODAL METHOD
0
0
    
```

E I G E N V A L U E A N A L Y S I S S U M M A R Y (READ MODULE)

```

BLOCK SIZE USED ..... 7
NUMBER OF DECOMPOSITIONS ..... 2
NUMBER OF ROOTS FOUND ..... 5
NUMBER OF SOLVES REQUIRED ..... 5
    
```

```

1  TRANSIENT RESPONSE WITH TIME DEPENDENT PRESSURE AND POINT LOADS          APRIL 8, 1998 MSC.Nastran 4/ 6/98 PAGE 11
   USE THE MODAL METHOD
0
    
```

MODE NO.	EXTRACTION ORDER	EIGENVALUE	R E A L E I G E N V A L U E S		GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS
			RADIANS	CYCLES		
1	1	7.056994E+05	8.400591E+02	1.336996E+02	1.000000E+00	7.056994E+05
2	2	1.878432E+07	4.334088E+03	6.897916E+02	1.000000E+00	1.878432E+07
3	3	2.811467E+07	5.302327E+03	8.438915E+02	1.000000E+00	2.811467E+07
4	4	1.931709E+08	1.389859E+04	2.212030E+03	1.000000E+00	1.931709E+08
5	5	2.234434E+08	1.494802E+04	2.379052E+03	1.000000E+00	2.234434E+08

Результаты решения Примера №4

```

POINT-ID = 11
DISPLACEMENT VECTOR
TIME TYPE T1 T2 T3 R1 R2 R3
.0 G .0 .0 .0 .0 .0 .0
4.000000E-04 G -3.625017E-15 -1.905611E-15 1.887243E-04 -6.386437E-06 5.199215E-05 .0
8.000000E-04 G -2.914862E-14 -1.814328E-14 1.956669E-03 -2.026748E-05 -1.663007E-04 .0
1.200000E-03 G -8.908526E-14 -5.652777E-14 6.887082E-03 -4.435436E-06 -1.612398E-03 .0
.
.
.
3.919996E-02 G 2.885643E-14 1.851072E-14 -2.561149E-03 1.920348E-04 6.726292E-04 .0
3.959996E-02 G -7.876552E-14 -5.047815E-14 6.422142E-03 -1.141607E-05 -1.799371E-03 .0
3.999996E-02 G -1.754870E-13 -1.124985E-13 1.438590E-02 -1.381519E-04 -3.964385E-03 .0
.
.
.

```

```

POINT-ID = 33
DISPLACEMENT VECTOR
TIME TYPE T1 T2 T3 R1 R2 R3
.0 G .0 .0 .0 .0 .0 .0
4.000000E-04 G -2.425735E-15 -3.601817E-15 1.849105E-04 1.747102E-13 5.123477E-05 .0
8.000000E-04 G -1.846279E-14 -3.116278E-14 1.944596E-03 1.289274E-12 -1.686260E-04 .0
.
.
.
3.839996E-02 G 1.418105E-13 2.481614E-13 -1.858122E-02 -2.107761E-04 5.154297E-03 .0
3.879996E-02 G 8.371286E-14 1.466735E-13 -1.103474E-02 -3.810626E-05 3.082996E-03 .0
3.919996E-02 G 1.725147E-14 3.062306E-14 -2.364378E-03 2.016205E-04 6.607183E-04 .0
3.959996E-02 G -4.836024E-14 -8.483060E-14 6.404299E-03 -2.743191E-05 -1.795630E-03 .0
3.999996E-02 G -1.075141E-13 -1.887765E-13 1.423312E-02 -1.733039E-04 -3.950206E-03 .0
.
.
.

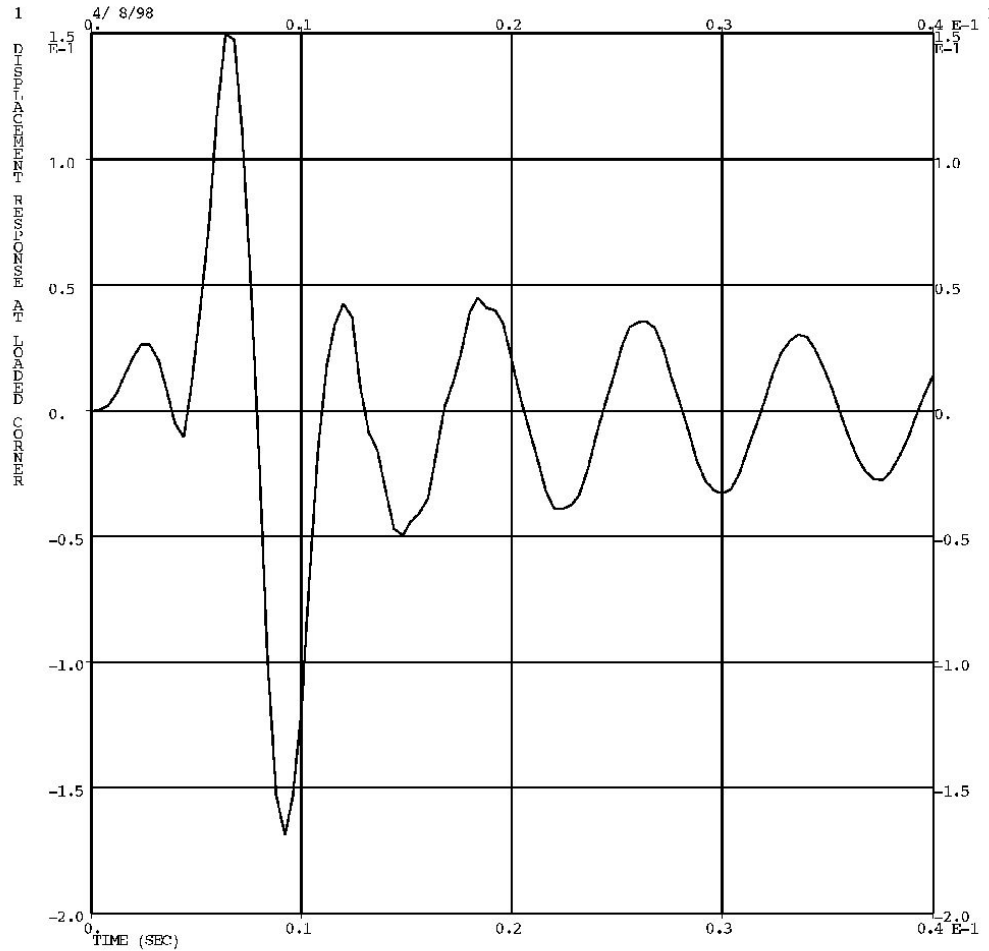
```

```

0
0 SUBCASE 1
0 XY-OUTPUT SUMMARY (RESPONSE)
0 SUBCASE CURVE FRAME X FOR YMAX-FRAME/ X FOR
ID TYPE NO. CURVE ID. XMIN-FRAME/ ALL DATA XMAX-FRAME/ ALL DATA YMIN-FRAME/ ALL DATA YMIN ALL DATA YMAX
0 1 DISP 1 11( 5) 0.000000E+00 3.999996E-02 -1.690216E-01 9.199998E-03 1.497643E-01 6.399998E-03
0 0.000000E+00 3.999996E-02 -1.690216E-01 9.199998E-03 1.497643E-01 6.399998E-03
0 1 DISP 2 33( 5) 0.000000E+00 3.999996E-02 -1.849363E-01 9.199998E-03 1.606161E-01 6.799998E-03
0 0.000000E+00 3.999996E-02 -1.849363E-01 9.199998E-03 1.606161E-01 6.799998E-03
0 1 DISP 3 55( 5) 0.000000E+00 3.999996E-02 -2.005836E-01 9.199998E-03 1.734470E-01 6.799998E-03
0 0.000000E+00 3.999996E-02 -2.005836E-01 9.199998E-03 1.734470E-01 6.799998E-03

```

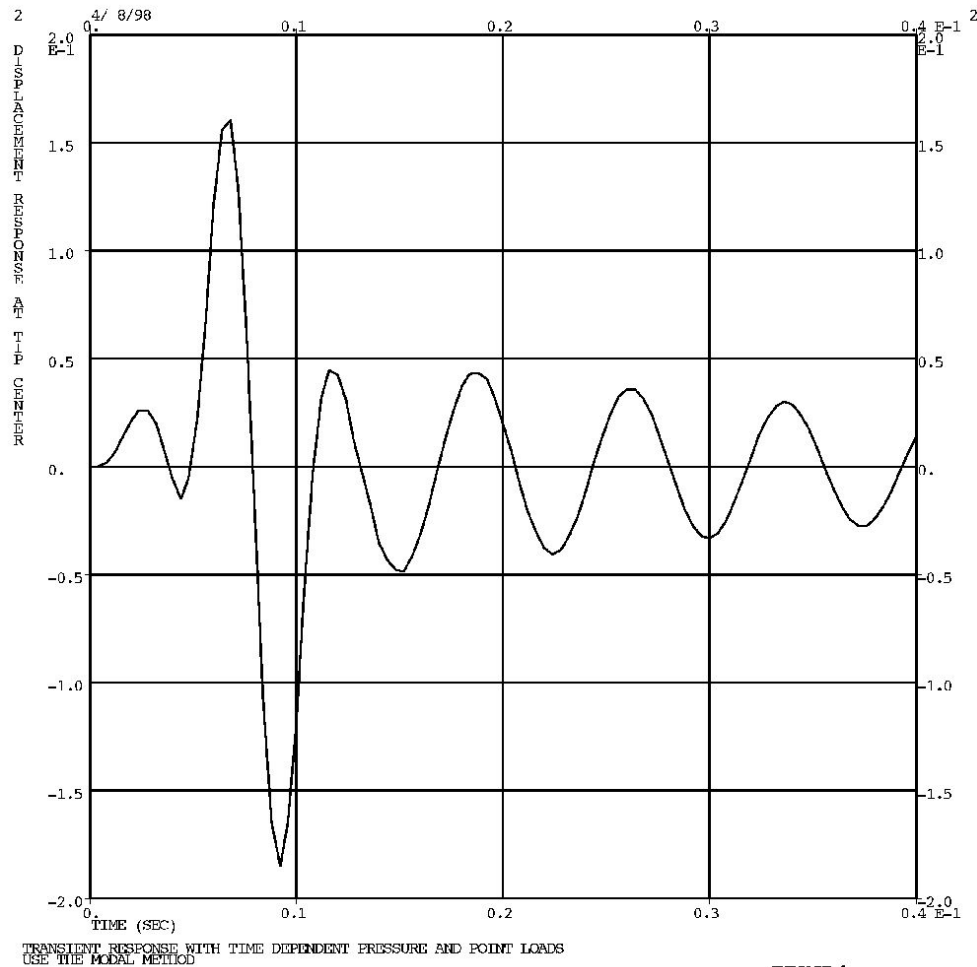

Результаты решения Примера №4



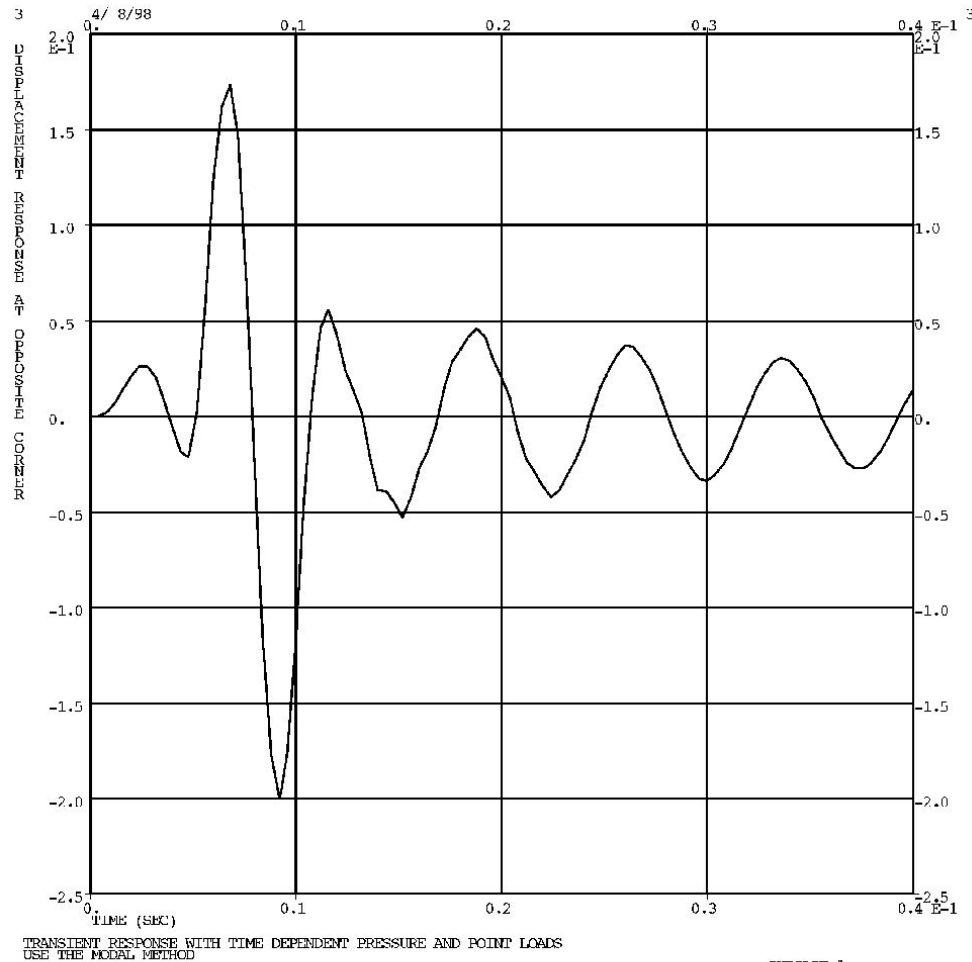
TRANSIENT RESPONSE WITH TIME DEPENDENT PRESSURE AND POINT LOADS
USE THE MODAL METHOD

SUBCASE 1

Результаты решения Примера №4



Результаты решения Примера №4



NAS102

Декабрь 2001, Стр. 7-60
MSC Moscow

