# МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ПРО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТІЛ. ДИНАМІКА

Основні теоретичні відомості про динамічні крайові задачі про НДС тіл наведені у Додатку 7.

### 7.1. Загальні відомості щодо моделювання динамічних крайових задач

У середовищі NX Nastran матриці основного рівняння динамічного процесу (Д7.11) формуються з використанням таких даних:

• матриця жорсткості тіла [K] – про пружні характеристики матеріалу (як і у статичному аналізі):

• матриця мас [M] – про масу матеріалу (через щільність матеріалу "Mass Density"); про неконструктивну (додаткову) масу СЕ "Nonstructural Mass" (див. Розділ 3.2); про зосереджену масу СЕ типа MASS та MASS MATRIX (див. розділи ДЗ.4.1 та ДЗ.4.2 Додатка 3);

• матриця в'язкого демпфірування [С] – про коефіцієнт конструкційного демпфірування матеріалу "**Damping**"  $G = 2C/C_{o}$  (див. Розділ 3.1), який визначається при резонансної частоті (тут С – коефіцієнт еквівалентного в'язкого демпфірування матеріалу); про загальний коефіцієнт демпфірування СЕ (типів SPRING, DOF SPRING та LAMINATE); про загальний коефіцієнт конструкційного демпфірування тіла G.

Демпфірування є сенс враховувати не завжди, а при:

• коливаннях тіл при частотах сил, що вимушують, наближених до резонансних;

• при моделюванні перехідних процесів коливань тіл, які тривають значно довше, ніж період коливань тіла.

### 7.2. Завдання загальних параметрів динамічних розрахунків

Оскільки для різних динамічних задач можуть використовуватися однакові діалогові панелі та призначення на них, то такі специфічні відомості зведено у цьому розділі.

Тільки для динамічних розрахунків усім типам факторів, що задаються на діалоговій панелі "Create Loads on ..." (див. рис.4.3-а) як граничні умови, можна призначити таку додаткову характеристику, як фазу коливань. Фазу можна задавати або як постійне значення, або як залежне від функції типа 1..vs. Time або 3..vs. Frequency.

Увага: якщо в одній ступені свободи вузла (DOF) будуть призначені декілька ГУ, що залежать від функцій типа 1..vs. Time, 2..vs. Temperature або 3..vs. Frequency, з неузгодженими характеристиками, то при перетворенні ГУ до елементів СЕС (див. Розділ 4.1.4.6) або при запуску процесу розв'язування задачі з'явиться повідомлення з проханням узгодити ГУ. Якщо цього не зробити, можна отримати такі варіанти реагування FEMAP та Nastran: ігнорування деяких призначень або фатальну помилку, тобто незадовільний результат.

### 7.2.1. Діалогова панель "Load Set Options for Dynamic Analysis"

Для всіх типів динамічних задач потрібно командою Model→Load→Dynamic Analysis... викликати діалогову панель "Load Set Options for Dynamic Analysis" (див. рис.7.1-а).

У секціях цієї панелі вказується:

• у "Solution Method" – метод розв'язування задачі: прямий (Direct Transient) або модальний (Modal Transient) перехідний (еволюційний) аналіз; прямий (Direct Frequency) або модальний (Modal Frequency) частотний аналіз, гармонійне збудження;

• у "Equivalent Viscous Damping" (еквівалентне в'язке демпфірування) – загальний коефіцієнт конструкційного демпфірування (Overall Structural Damping Coeff (G)) або у діалоговому вікні "Modal Damping Table" обирається (для створення є кнопка 🜆) таблиця коефіцієнтів демпфірування (для кожної моди рівняння (Д7.29) для методів розкладання по формам власним коливань, тобто "Modal Transient" та "Modal Frequency"). Коефіцієнт Gможна не задавати, якщо його задано для усіх СЕ як властивість матеріалу СЕ, або можна задати як додаткову величину до заданого для матеріалу;

• у "Equivalent Viscous Damping Conversion" (перетворення в еквівалентне в'язке демпфірування) – частота  $\omega$  (у герцах) для перетворення: загального коефіцієнта G (Frequency for System Damping (W3 – Hz)) або заданих у властивостях матеріалу (див. табл.3.1 та рис.3.2-а) CE (Frequency for Element Damping (W4 – Hz)) за формулою  $G = (2C/C_{\alpha}) \cdot (\omega/\omega_{\alpha})$ , де  $\omega_{\alpha}$  – частота власних коливань. Звичайно  $\omega$  задають близькою до першої власної частоти:

Load Set Options for Dynamic Analysis	Load Set Options for Dynamic Analysis
Load Set 1 Load_01 / Solution Method	Load Set 1 Load_01 Solution Method
Off Off Offect Transient O Modal Transient O Direct Frequency O Modal Frequency	O Diff O Direct Transient O Modal Transient O Direct Frequency O Modal Frequency
Equivalent Viscous Damping Response Based on Modes	Equivalent Viscous Damping Response Based on Modes
Overall Structural Damping Coeff (G) 0, Number of Modes 0	Overall Structural Damping Coeff (G) 0, Number of Modes 0
Modal Damping Table 0. None 5 Jan	Modal Damping Table 0None 👽 🗛
Highest Freq (Hz) U,	Highest Freq (Hz)
Equivalent viscous Damping Conversion	Equivalent Viscous Damping Conversion
Frequency for System Damping (W3 - Hz) 0, Time per Step	Frequency for System Damping (W3 - Hz) 0, Time per Step. 0
Frequency for Element Damping (W4 · Hz) 0, Output Interval 0	Frequency for Element Damping (W4 - Hz) 0, Output Interval 0
Response/Shock Spectrum	Frequency Response Random Analysis Options
Frequencies 0None	Frequencies D.None
Modal Freq Enforced Motion Advanced Copy DK Cancel	Modal Freq Enforced Motion Advanced Copy QK Cancel
a)	б)
	Advanced Load Set Options for Dynamic Analysis
	Solution Frequencies
Frequency Table From Modal Results	Input Type 2Cluster around Modes V Input Type 0None V
- Modal Besults	Min Frequency (Hz) Min Frequency (Hz)
First Free 2 Mode 1 251 6969 Hz	Max Frequency (Hz) Max Frequency (Hz)
	Frequencies/Subrange No. of Intervals
	Cluster Value Spread (+/-%)
Additional Solution Frequency Points	Logarithmic Interpolation     Logarithmic Interpolation
Number of Points per Existing Mode 5	Random Analysis
Frequency Band Spread (+/-) 10 %	ANSYS PSD Type 0.Accel (Acc2/Hz)
	NASTRAN PSD Interpolation 0Log Log
	Mass Formulation Dynamic Data Recovery
	● <u>D</u> efault ● <u>M</u> ode Displacement
	Cumped Mode Acceleration QK Cancel
в)	г)

#### B)

### Рис.7.1. Діалогові панелі: а), б) – завдання опцій та параметрів динамічного аналізу; в) – формування таблиці власних та додаткових частот коливань; г) – призначення додаткових параметрів

• у "Response Based on Modes" (відгук, що оснований на формах власних коливань; для методів Modal ...) – кількість форм власних коливань, які будуть використовуватися для розрахунків відгуку (Number of Modes) або (як альтернатива) відповідний частотний діапазон: нижнє (Lowest Freq (Hz)) та верхнє (Highest Freq (Hz)) значення;

• у "Transient Time Step Intervals" (інтервал та крок розрахунку, для методів ... Transient) – кількість кроків (Number of Steps), часовий крок (Time per Step) та інтервал для виводу результатів (Output Interval) у формі множника до кроку розрахунків (якщо 0 або 1 – вивід на кожному кроці, якщо ціле число N > 1 – через N кроків);

• у (лівому) "Response/Shock Spectrum" (спектр відклику/удару, для методів ... Transient, див. рис.7.1-а) або у "Frequency Response" (частотний спектр, для методів ... Frequency, див. рис.7.1-б) у полі "Frequencies" можна обрати (для створення є кнопка 🜆) таблицю частот (як функцію типа 3..vs. Frequency, причому використовуються тільки значення параметра Х таблиці). Якщо попередньо був зроблений розрахунок власних частот коливань тіла, то таку таблицю можна створити автоматично, оскільки стане активною електронна кнопка "Modal Freq..." (власні частоти). Вона викликає діалогову панель "Frequency Table From Modal Result" (див. рис.7.1-в), де можна сформувати таблицю частот власних коливань та (у їх околу) додаткових частот коливань (обрати діапазон частот (перша – "First Freq" та остання – "Last Freq"), у полі "Number of Points per Existing Mode" вказати кількість точок у околу кожної власної частоти, у полі "Frequency Band Spread" – ширину частотної смуги у % від абсолютного значення відповідної власної частоти). Створену таблицю доцільно переглянути за допомогою команд Modify→Edit→Function... (як таблицю) або View→Select... (як графік). Ця таблиця використовується для побудови амплітудночастотної характеристики моделі або для завдання власних частот осциляторів малої маси, які зв'язані з даною точкою конструкції для оцінки спектрального відгуку при сейсмічних або ударних впливах;

• у (правому) "Response/Shock Spectrum" (для методів ... Transient, див. рис.7.1-а) у полі "Damping" можна обрати (для створення є кнопка 🖢) таблицю коефіцієнтів демпфірування осциляторів (як функцію типа **3..vs. Frequency**);

• у "Random Analysis Options" (розрахунок випадкових коливань, для методів ... Frequency, див. рис.7.1-б) можна задати закон основного руху у формі таблиці (як функції типа **3..vs. Frequency**, для створення є кнопка

Електронною кнопкою "Advanced..." можна викликати діалогову панель "Advanced Load Set Options for Dynamic Analysis" (див. рис.7.1-г) для призначення додаткових параметрів аналізу. У секції "Mass Formulation" можна обрати один з варіантів опису матриці мас: "Default", "Lumped" (зосереджена) або "Coupled" (приєднана); у секції "Dynamic Data Recovery" – один з варіантів динамічного відтворення даних: "Mode Displacement", "Mode Acceleration" або "Matrix Method". У секції "Solution Frequencies" (тільки для методів ... Frequency, див. рис.7.1-а) можна призначити діапазон обчислення власних частот ("0..Default/List", тобто за замовчанням; або "1..Frequency Range", тобто діапазон частот: "від і до", а також загальну їхню кількість; або "2.. Cluster around Modes" (внутрішня команда FREQ3), тобто амплітудний діапазон частот (Cluster Value) навколо частоти зі вказаним номером (Frequencies/Subrange); або "3..Spread around Modes" (внутрішня команда FREQ4), тобто відстань (+, – або у відсотках) від частоти або форми коливань зі вказаним номером (Frequencies/Mode)), а також встановити опцію "Logarithmic Interpolation" (логарифмічна інтерполяція). Про призначення у секції "Random Analysis" – у Розділі 7.3.4.

Примітка 7.1. Окрім FREQ3 і FREQ4 у NX Nastran ще є й інші варіанти (від FREQ до FREQ5). За допомогою інструментів, описаних у Розділі 4.2.3, можна задати одну з них або будь-яку їхню комбінацію з потрібними параметрами.

За допомогою електронної кнопки "Enforces Motion…" можна підключити до тіла значну масу, яка вібрує або рухається за іншим законом (див. Розділ 7.3.3), а кнопки "Сору" – скопіювати всі призначення з іншої моделі, якщо вона є.

### 7.2.2. Про застосування граничних умов типа "нестислива рідина"

У Розділі 6.1.3.4 були розглянуті граничні умови типа "нестислива рідина" для статичної крайової задачі. Однак такі граничні умови можна застосовувати і для динамічних задач. Крім описаних у Розділі 6.1.3.4 призначень, для динамічного аналізу (для задач: 103, 107, 110 (2...Normal Modes / Eigenvalue), 109 (3..Transient Dynamic / Time History Ta 5..Response Spectrum), 108 (4...Frequency/Harmonic Response), 111 (4...Frequency/Harmonic Response ta 6..Random Response), 112 (3..Transient Dynamic / Time History) Ta 129 (12..Nonlinear Transient Response) – див. табл.4.2) є такий додатковий варіант. Якщо відключити опцію "Z Free Surface OFF" (див. рис.6.9-а), а опції "ХУ Plane" та "УZ Plane" не будуть встановлені у

"Antisymmetry", то NX Nastran 5.0 сприймає "нестисливу рідину" як "зовнішню рідину" (external fluid). При цьому необхідно застосувати систему координат з початком, як можна ближчим до геометричного центру об'єму "нестисливої рідини".

### 7.2.3. Роторний регіон

У UGS.F93 з'явився такий тип динамічного об'єкта, як роторний регіон (Rotor Region), який створюється за допомогою діалогової панелі "Rotor Region" (див. рис.7.2), що викликається командою Connect->Rotor Region або кнопкою . Цей тип навантаження може бути застосованим для крайових задач (див. табл.4.2) типа 110 (2...Normal Modes/Eigenvalue, варіант Modal Complex Eigenvalues – може мати до 10 роторів включно) та 111 (4..Frequency/Harmonic Response – тільки один ротор). NX Nastran визначає власні комплексні значення для кожної швидкості обертання ротора, враховуючі демпфірування та напря-

мок вихору: прямий (forward) або зворотний (backwards) при русі кожного вузла роторного регіону по еліптичній траєкторії. Додатково NX Nastran визначає: режими вихору (систему модальних частот, які змінюються в залежності від частоти обертання), критичні швидкості обертання, комплексні форми мод коливань тощо, які можна переглянути у FEMAP (якщо у секції "Post Files" встановити опції CSV та/або GPF (див. по-

Rotor Region	×
[D 2 Color 20488 Palette Layer 1	Title
Rotor Options	Defined By
Rotation Axis (Z Axis ) 0Basic Rectangular 🗸 🗸	Node Multiple
Freq for Overall Damping (W3) 0,	Delete
Freq for Material Damping (W4) 0,	Delete
Rotational Force Applied 0None	Reset
	Cancel

### Рис.7.2. Діалогова панель створення роторного регіону

яснення до рис.7.5), то окрім файлів **\*.f06** та **\*.op2** результати будуть виводитися у форматному вигляді у файли **\*.CSV** (діаграма Кемпбелла (Campbell)) та/або **\*.GPF** відповідно).

У секції "Defined By" за допомогою кнопок "<Add" (додати), "Multiple…" (множина), "Delete" (видалити) та "Reset" (очистити) формується список вузлів, які будуть належати до роторного регіону, що створюється. Увага: якщо цей список буде пустим, то програма вважає, що до цього роторного регіону входять *всі* вузли тіла.

У секції "Rotor Options" встановлюються опції:

• "Rotation Axis (Z Axis)" – система координат, до якої належить вісь Z, навколо якої здійснюється обертання;

• "Freq for Overall Damping (W3)" – частота  $\omega$  (у герцах) для перетворення загального коефіцієнта G структурного демпфірування за формулою  $G = (2C/C_o) \cdot (\omega/\omega_o)$ , де  $\omega_o$  – частота власних коливань. Звичайно величину  $\omega$  задають близькою до першої власної частоти. Ця характеристика для крайових задач (див. табл.4.2) типа 110 може бути встановлена на панелі "NASTRAN Modal Analysis" у полі "Overall Damping (G)" (див. рис.7.3 з поясненнями в Розділі 7.3.1), а для задач типа 111 (4..Frequency/Harmonic Response) – на панелі "Load Set Options for Dynamic Analysis" у полі "Overall Structural Damping Coeff (G)" (див. рис.7.1-а), яка викликається командою Model→Load→Dynamic Analysis…;

• "Freq for Material Damping (W4)" – частота, аналогічна до попередньої, але коефіцієнт демпфірування заданий як характеристика матеріалу (див. табл.3.1 та рис.3.2-а);

• "Rotation Force Applied" – набір зі статичною відцентровою силою, яка обчислена для одиниці швидкості з виміром у рад/сек. Оскільки далі буде використовуватися одиниця Hz (герц), то потрібно задіяти множник π/2. Цей набір потрібно створити (за допомогою команди Model→Load→Set...) окремо тільки для одної сили.

## 7.3. Моделювання динамічних крайових задач

### 7.3.1. Крайова задача про власні частоти та форми коливань

Серед властивостей матеріалу достатньо задати модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та густину матеріалу (див. табл.3.1). Можна вводити демпфірування (що задається, зокрема, і величиною  $2C/C_{o}$  як характеристикою матеріалу).

Звичайно вводяться умови закріплення тіла, але NX Nastran може знаходити власні форми та частоти коливань для тіл, які не мають закріплення, наприклад, літака у польоті.

Для створення завдання для розв'язування задачі командою Model→Analysis... викликається діалогова панель "Analysis Set Manager" (див. рис.4.13-а), ініціюється кнопка "New", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) тип задачі "2..Normal Modes / Eigenvalues".

У розділі "Options" панелі "Analysis Set Manager" з'являться декілька підрозділів, які можна (потрібно) настроїти, для чого після обирання підрозділу ініціюється кнопка "Edit…".

Настроювання загальних панелей розділу "**Options**" розглянуто у Розділі 4.2. Тут розглянемо панелі, характерні для даного типа задачі.

Для підрозділу "NASTRAN Modal/Buckling" викликається панель "NASTRAN Modal Analysis" (див. рис.7.3). На ній можна:

NASTRAN Modal Analysis			
🔜 Skip ElGx		Method <u>I</u> D	1
Real Solution Methods         Givens         Modified Givens         Inverse Power         Inverse Power/Styrm         Householder         Modified Householder	Range of Interest       From (Hz)       Io (Hz)       Eigenvalues and E       Number Estimated       Number Desired	Real 0, 0, igenvectors	Imaginary 0, 0, 0
Complex Solution Methods  Hessenberg  Complex Inverse Power  Complex Lanczos	Normalization Meth	ID 96	Mass <ul> <li>Default</li> <li>Lumped</li> <li>Coupled</li> </ul>
Solution Type ① Direct ○ Modal	Complex Solution C Convergence Region Width Overall Damping (G	0,         0,           0,         0,           3)         0,	Ne <u>x</u> t <u> </u> Cancel

Рис.7.3. Діалогова панель для зміни параметрів частотного аналізу

• відмінити опцію "Skip ElGx" (активізувати діалогову панель, якщо вона чомусь була не активною);

• змінити внутрішній номер (Method ID) субнабору призначень (якщо передбачається багатоваріантні розрахунки);

• обрати метод визначення власних форм та частот коливань. Якщо дисипація енергії не враховується, то це методи Ланцоша (Lanczos) – основний, Гівенса (Givens), Хаусхолдера (Householder), модифіковані методи Гівенса та Хаусхолдера, а також оборотні методи: енергетичній (Inverse power) та модифікований, з послідовністю Штурма (Inverse Power/Sturm) – у секції "Real Solution Method". Якщо дисипація енергії враховується, то це методи Ланцоша (Complex Lanczos) – основний, Хессенберга

(Hessenberg) та комплексний оборотний енергетичний (Complex Inverse Power) – у секції "Complex Solution Method";

• у секції "Range of Interest" у полях "From (Hz)" та "To (Hz)" – вказати бажаний діапазон частот (дійсну (Real) та комплексну (Imaginary) частини при комплексному аналізі), але це робити не обов'язково;

• у секції "Eigenvalues and Eigenvectors" – задати бажану кількість (Number Desired) власних форм коливань для нижніх власних частот. А також тільки для методу "Inverse power" – кількість оригінальних коренів (Number Estimated) системи рівнянь (див. Розділ Д7.3.2). Нагадаємо, що можливі *парні* значення власних частот;

• у секції "Normalization Method" – встановити метод нормування власних форм коливань. Є три варіанта нормування (до одиниці): за масою (Mass), щоб виконувалося рівняння (Д7.22); за максимальним переміщенням будь-де (Max) або для вказаної ступені свободи обраного вузла (Point). Звичайно застосовують перший варіант, але й інші бувають корисні, наприклад, для порівняння з результатами випробувань;

• у секції "Mass" – обрати один з варіантів опису матриці мас: "Default", "Lumped" (зосереджена) або "Coupled" (приєднана);

• якщо дисипація енергії враховується, то активні ще дві секції. У секції "Solution Type" обирається варіант "Direct" (код задачі 107, значення SEDCEIG, див. табл.4.2) або "Modal" (код задачі 110, значення SEMCEIG, див. табл.4.2), який повинен співпадати з типом, вказаним на діалоговій панелі "Load Set Options for Dynamic Analysis" (див. рис.7.1-а). У секції "Complex Solution Options" уводяться такі значення: "Convergence" – збіжність, за замовчанням для методу "Hessenberg" дорівнює 10<sup>-15</sup>, для "Complex Inverse Power" – 10<sup>-14</sup>, а для "Lanczos" обирається автоматично в залежності від ПЕОМ; "Region Width" – ширина регіону пошуку кожної частоти, за замовчанням дорівнює 1.0); "Overall Damping (G)" – загальний коефіцієнт демпфірування.

Для підрозділу "NASTRAN ModalXYPlot" викликається панель "NASTRAN XY Output for Modal Analysis" (див. рис.6.13-б та пояснення до нього у Розділі 6.3.6).

Для підрозділу "NASTRAN Response Spectrum Application" іноді необхідно викликати панель "NASTRAN Response Spectrum Application", яка описана у Розділі 7.3.2.5.

Настроювання загальних панелей розділу "Master Requests and Conditions" розглянуто в Розділі 4.2.

Після закінчення розрахунків буде одержано відповідну кількість таблиць з характерними назвами, наприклад, **20..Моde 20, 46.88064 Н***z*. Перегляд цих форм доцільно проводити у режимі анімації переміщень за функцією **1..Total Translation** (див. Розділ 9.3).

### 7.3.2. Крайова задача про перехідний (еволюційний) процес при динамічному негармонійному навантаженні тіла

Граничні умови, що змінюються у часі за законом синуса чи косинуса, звуться гармонійними, а всі інші – негармонійними.

Звичайно негармонійні силові навантаження задаються змінними у часі за допомогою функцій типа "1..vs. Time", які створюються та обираються на діалоговій панелі "Create Loads on …" (див. рис.4.3 та інші подібні) у полі "Time/Freq Dependence".

Якщо задача – лінійна, то вона може розв'язуватися двома методами.

### 7.3.2.1. Метод прямого інтегрування, лінійна задача

Основне рівняння динамічного процесу (Д7.11) вважається лінійним, безпосередньо інтегрується із застосуванням методу Ньюмарка (див. Розділ Д7.3.1 Додатка 7).

Початкові умови формуються за переміщеннями (**Displacement**) та швидкостями переміщень (**Velocity**) у окремому наборі навантажень у звичайний спосіб. Якщо вони – нульові, то набір з початковими умовами можна не створювати (не підключати). Початкові прискорення – тільки нульові.

Звичайно для визначення часового кроку розрахунку (**Time per Step**) і повного часу дії навантаження, а також для завдання коефіцієнта конструкційного демпфірування G (див. Розділ 7.2) потрібно знати періоди коливань тіла (**Frequency for System Damping (W3 – Hz**)), тобто одну (першу) або декілька власних частот коливань. Для цього спочатку необхідно провести відповідний додатковий розрахунок (див. Розділ 7.3.1). Уважається, що для досягнення більш-менш значної точності інтегрування рівняння (Д7.11) за період повинне бути ніяк не менше 10 часових кроків, а повний (внутрішній) час розрахунку повинен у кілька разів перевищувати період коливань, щоб можна було простежити значну частину процесу затухання коливань, обумовлених швидкою зміною навантажень. Ці параметри розрахунку необхідно оцінити та встановити на діалоговій панелі "Load Set Options for Dynamic Analysis", яка викликається командою Model→Load→Dynamic Analysis..., у варіанті аналізу "Direct Transient" (див. Розділ 7.2).

Для створення завдання для розв'язування задачі командою Model→Analysis... викликається діалогова панель "Analysis Set Manager" (див. рис.4.13-а), ініціюється кнопка "New", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) тип задачі "3..Transient Dynamic / Time History" (перехідний динамічний / процес у часі); у підрозділі "Boundary Conditions" розділу "Master Requests and Conditions" необхідно підключити набори з навантаженнями (Loads), закріпленнями (Constraints), початковими умовами (Initial Conditions) та іншими наборами; у підрозділі "Output Requests" – встановити, які результати виводити в таблиці.

Як результат розрахунків виникає стільки таблиць, скільки задано часових кроків. З них можна формувати різні графіки, зокрема про зміни у часі обраної величини в зазначеному вузлі (див. Розділ 9.4). Також можна розрахувати коефіцієнт динамічності у обраному вузлі:  $K_{dynamic} = \sigma_{dynamic} / \sigma_{static}$ .

### 7.3.2.2. Метод розкладання за власними частотами

Метод описаний у розділі Д7.3.3 Додатка 7. Задача розв'язується за два етапи: спочатку знаходиться вказана кількість *перших* власних форм коливань, потім інтегрується не більша кількість рівнянь.

**Примітка 7.2.** Якщо для застосування першого методу потрібно додатково провести розрахунок власних частот коливань тіла (звичайно потребується при першому розрахунку), то начебто вигідніше застосовувати другий метод. Але відсікання високочастотних характеристик відсікає і високочастотну реакцію. Більш того, рекомендують обчислювати не тільки нижні частоти, а й у 2...3 рази вищі частоти, ніж ті, для яких потрібно визначити реакцію.

На першому етапі при ініціюванні процесу розрахунку власних форм коливань необхідно на діалоговій панелі "NASTRAN Executive and Solution Options" (див. Розділ 4.2.4 та рис.4.15-а) у секції "Restart Control" додатково ініціювати опцію "Save Database for Restart" (зберегти базу даних для наступного розрахунку).

На другому етапі на діалоговій панелі "Load Set Options for Dynamic Analysis" (див. Розділ 7.2), яка викликається командою Model→Load→Dynamic Analysis..., необхідно встановити варіант задачі "Modal Transient" та ввести інші параметри розрахунку. Зокрема, вказати кількість власних частот (Number of Modes), яка буде використана для одержання розв'язку.

У цьому варіанті з'являється можливість задавати у полі "Modal Damping Table" коефіцієнт конструкційного демпфірування *G* табличними функціями типа "6..Structural Damp vs. Freq" (конструкційне демпфірування), "7..Critical Damp vs. Freq" (критичне демпфірування, тобто величина  $C/C_o$ ) або "8..Q Damping vs. Freq" (добротність, або коефіцієнт підсилювання – величина  $Q = 1/\sqrt{(1 - (\omega/\omega_o)^2)^2 + G^2}$ , де  $\omega_0$  – частота власних коливань). Функцію можна створити за допомогою кнопки [5]. При  $\omega = \omega_o$  реалізується співвідношення  $G = 2C/C_o = 1/Q$ . Якщо *G* задається таблицею, то поля для "Frequency for System Damping (W3 – Hz))" та "Frequency for Element Damping (W4 – Hz))" не заповнюються (нульові). Докладніше про ці величини – у Розділі 7.2.

Запуск процесу розв'язування задачі, зокрема підключення силових, кінематичних та початкових умов, інші дії та отримані результати – аналогічно розглянутому у Розділі 7.3.2.1. З однією відмінністю: потрібно на діалоговій панелі "NASTRAN Executive and Solution Options" (див. Розділ 4.2.4 та рис.4.15-а) у секції "Restart Control" додатково ініціювати опцію "Restart Previous Analysis" (застосувати попередній аналіз, інакше власні форми коливань будуть розраховуватися знову) та у полі "From" вказати (знайти у файловій системі) файл рестарту (з розширенням імені .master).

### 7.3.2.3. Нелінійний перехідний процес

### 7.3.2.3.1. Нелінійний перехідний процес, малі деформації

Основне рівняння динамічного процесу (Д7.11) – нелінійне завдяки наявності нелінійності в одній із матриць. Воно безпосередньо інтегрується із застосуванням методу Ньюмарка (див. Розділ Д7.3.1 Додатка 7). Тобто задача близька до задачі, розглянутої у Розділі 7.3.2.1. Але, оскільки задача – нелінійна, є деякі відмінності (у порівнянні з Розділом 7.3.2.1) при її моделюванні. А саме:

• як і у Розділі 7.3.2.1 на діалоговій панелі "Load Set Options for Dynamic Analysis", яка викликається командою Model→Load→Dynamic Analysis..., необхідно встановити варіант аналізу "Direct Transient" або "Modal Transient" та ввести інші параметри розрахунку (див. Розділ 7.2);

• для *першого* набору навантажень, що буде створюватися, необхідно на діалоговій панелі "Load Set Options for Nonlinear Analysis" (див. рис.6.9-а), яка викликається командою Model→Load→Nonlinear Analysis..., спочатку кнопкою "Default" встановити типові значення, потім у секції "Solution Type" обрати варіант "Transient", а також зробити необхідні призначення (див. Розділ 6.2). Ці призначення будуть діяти для *всіх* наборів навантажень (Load). Увага: значення "Number of Time Steps" та "Time Increment" не повинні суперечити значенням, що були уведені раніше на панелі "Load Set Options for Dynamic Analysis";

• для створення завдання для розв'язування задачі командою Model→Analysis... викликається діалогова панель "Analysis Set Manager" (див. рис.4.13-а), ініціюється кнопка "New", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) тип задачі "12..Nonlinear Transient Response" (нелінійний перехідний процес); у підрозділі "Boundary Conditions" розділу "Master Requests and Conditions" необхідно підключити набори з навантаженнями (Loads), закріпленнями (Constraints), початковими умовами (Initial Conditions) та іншими наборами; у підрозділі "Output Requests" – встановити, які результати виводити в таблиці. Якщо необхідно врахувати (не враховувати) геометричну нелінійність, то потрібно встановити (відключити) на діалоговій панелі "NASTRAN Bulk Data Options" (підрозділ "NASTRAN Bulk Data" розділу "Options") опції "LANGLE" (великі кути поворотів) та/або "LGDISP" (великі деформації) – див. Розділ 4.2.6.

7.3.2.3.2. Нелінійний перехідний процес, великі деформації

Основне рівняння динамічного процесу (Д7.11) – нелінійне завдяки наявності великих деформацій (але вони не повинні перевищувати 2%) та, можливо, нелінійності в одній із матриць. Рівняння безпосередньо інтегрується із застосуванням:

• методу Ньюмарка (див. Розділ Д7.3.1.1 Додатка 7), тип задачі "23..Advanced Nonlinear Transient";

• явного центрально-різницевого алгоритму – CDM (див. Розділ Д7.3.1.2 Додатка 7 – з обмеженням: [*C*] = *α*[*M*]), тип задачі "**24..Advanced Nonlinear Explicit**".

На відміну від моделювання задачі, розглянутого у Розділі 7.3.2.3.1, немає потреби у налаштування діалогових панелей "Load Set Options for Dynamic Analysis" (викликається командою Model→Load→Dynamic Analysis…) та "Load Set Options for Nonlinear Analysis" (викликається командою Model→Load→Nonlinear Analysis…).

Для створення завдання на розв'язування задачі командою Model→Analysis... викликається діалогова панель "Analysis Set Manager" (див. рис.4.13-а), ініціюється кнопка "New", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) тип задачі "23..Advanced Nonlinear Transient" або "24..Advanced Nonlinear Explicit", в залежності від обраного методу.

В залежності від ситуації, потрібно на діалоговій панелі "NASTRAN Bulk Data Options" (підрозділ "NASTRAN Bulk Data" розділу "Options") встановити опції "LANGLE" (великі кути поворотів) та/або "LGDISP" (великі деформації) – див. Розділ 4.2.6.

Ще необхідно у розділі "Options" настроїти опції панелі "NXSTRAT Solver Parameters" (див. Розділ 6.4.1), зокрема, у секції "Time Steps" (часові кроки) обов'язково ввести значення: "Number of Steps" (кількість часових кроків), "Time Increment" (часовий крок), "Output Every Nth Step" (виводити результати на кожному N–му кроці).

Також є сенс настроїти опції панелі "NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters" (див. Розділ 6.4.2).

В підрозділі "Boundary Conditions" розділу "Master Requests and Conditions" необхідно підключити набори з навантаженнями (Loads), закріпленнями (Constraints), початковими умовами (Initial Conditions) та іншими наборами; у підрозділі "Output Requests" – встановити, які результати виводити в таблиці.

### 7.3.2.4. Спектральний відгук тіла при ударному навантаженні

Актуальною є задача про зниження амплітуд коливань тіла за рахунок демпферів (пристроїв, що гасять динамічну енергію), які можна прикріпити до декількох його точок (вузлів). Які повинні бути властивості цих демпферів? Пошук відповіді на це питання приводить до проведення багатоваріантних однотипних розрахунків. Це й є задача про спектральний відгук тіла (конструкції). Задача розв'язується за два етапи: спочатку для отримання допоміжної інформації знаходиться задана кількість власних форм коливань (як це описано у Розділах 7.3.1), потім – спектральні відгуки. У NX Nastran останню задачу можна поєднати в одному запуску завдання на розрахунок. На другому етапі звичайно потрібно мати три функцій:

• типа 1..vs. Time для описання динамічного навантаження – удару у вигляді швидкоплинного сплеску (див. рис.7.4-а). Потім функція обирається у діалоговому вікні "Create Loads on …" у полі "Time/Freq Dependence" для масштабуванні у часі амплітудного значення навантаження, що призначається;

• типа **3..vs. Frequency** у вигляді стовпця таблиці (тільки аргумент **X**) значень частот актуального діапазону для наступного її заповнення (за результатами розв'язку задачі) відповідними значеннями переміщень, швидкостей та інше (значення функції **Y**) у вузлах, до яких "прикріплені" демпфери, тобто для створення таблиць спектрального відгуку;

• типа **3..vs. Frequency** у вигляді таблиці значень  $C/C_o$  коефіцієнтів демпфірування демпферів (тільки аргумент **X**). Для кожного з цих коефіцієнтів буде отримано таблицю (графік) спектрального відгуку.

Потім обидві функції типа **3..vs. Frequency** обираються на діалоговій панелі "Load Set Options for Dynamic Analysis" (рис.7.1-а, викликається командою Model→Load→Dynamic Analysis...) у полі "Frequencies" лівої та у полі "Damping" правої частини секції "Response/Shock Spectrum" відповідно (додаткову інформацію див. у Розділі 7.2). Тип аналізу, що встановлюється на цій панелі – "Direct Transient", тому інші призначення повинні відповідати описаному в Розділі 7.3.2.1.

Ще необхідно створити групу (див. Розділ 1.7.2) з переліком вузлів, до яких "прикріпляються" демпфери.

Для створення завдання на розв'язування задачі командою Model->Analysis... викликається діалогова панель "Analysis Set Manager" (див. рис.4.13-а), ініціюється кнопка "New", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) тип задачі "5..Response Spectrum" (генерування спектра відгуку) та проводяться інші призначення (докладніше див. у Розділі 7.3.2.1.). У розділі "Option" з'явиться підрозділ "NASTRAN Response Spectrum Generation", який настроюється за допомогою діалогової панелі "NASTRAN Output for Response Spectrum Analysis" (див. рис.7.4-б), де необхідно вказати напрямки переміщень (T1, T2, T3) та/або обертань (R1, R2, R3) трьох типів величин: переміщень (Displacement), швидкостей (Velocity) та/або прискорень (Acceleration) у демпферах, що досліджуються в задачі. Також вказується, які величини виводити в таблиці: абсолютні (Absolute) або відносні (Relative). Потім з'явиться проста діалогова панель для обирання зі списку групи з переліком вузлів, до яких "прикріпляються" демпфери.



Рис.7.4. Графік функції навантаження (а); діалогові панелі для призначення: б) – напрямків переміщень (T1, T2, T3) та обертань (R1, R2, R3) трьох типів величин; в) – завдання маси та масштабного коефіцієнта для прискорення

Отримані таблиці спектральних відгуків можна або переглянути у режимі редагування функцій (команда Modify→Edit→Function...) або у вигляді графіків (дати команду View→Select, встановити радіокнопку "XY of Function", ініціювати кнопку "Model Data", обрати функцію). Назва функції – характерна. Наприклад, ABSDISP1 22 0.05 означає, що це – абсолютні значення переміщень у напрямку T1 для об'єкта з номером 22 при коефіцієнті демпфірування демпфера, рівному 0.05.

Ще один варіант спектрального модального аналізу описано в Розділі 7.3.5.

7.3.2.5. Динамічні задачі при наявності гіроскопічних сил

Теоретичні основи цієї задачі викладені в Розділі Д7.4 Додатка 7.

Налаштовування задачі (тип задачі 110 (2...Normal Modes/Eigenvalue, Bapiant Modal Complex Eigenvalues) ідентично викладеному в Розділі 7.3.1. Але є одна відмінність: за допомогою панелі "NASTRAN Rotor Dynamics" потрібно настроїти у розділі "Options" підрозділ "NASTRAN Rotor Dynamics Options".

Щоб зробити панель активною, потрібно ініціювати опцію "Enable Rotor Dynamic Analysis". Можна встановити опцію "Include Path in All Filenames" (підключити шляхи у всіх іменах файлів).

У секції "Rotor Selection" вказуються кількість роторних регіонів: один або декілька (всі, що створені за допомогою команди Connect→Rotor Region..., але для NX Nastran 5.0 не більше 10).

У секції "Reference System" вказується тип системи, що розраховується: з

NASTRAN Rotor Dynamics Options				
Enable Rotor Dynamics Analysis				
Rotor Selection		Reference System	Post Files	
💿 Single Rotor - Full Model		○ Fixed	CSV	
O Multiple Rotors - All Rotor Reg	gions	<ul> <li>Rotating</li> </ul>	GPF	
Rotor Speed		Speed Input Units	Output Units	
Start Value 0,		Rev/Minute	O Rev/Minute	
Stan Size		🔘 Cycles/Sec	O Cycles/Sec	
Step Size 50,		🔘 Hertz	<ul> <li>Hertz</li> </ul>	
Number of Steps 20		◯ Radians/Sec	ORadians/Sec	
Printed Output	Printed Output		Other Options	
○ None		🔘 None	Whirl Threshold	
<ul> <li>Generalized Matrices</li> </ul>		💿 All RPM	0,	
🔘 Eigenvalue Summary/Eigenv	ectors	O Rotor Speed		
<ul><li>● Both</li></ul>			Steiner Inertia	
Response Calc	Excitation		Excitation Order	
Synchronous	Mass Unbalance		Default	
<ul> <li>Asynchronous</li> </ul>	O Force		O Forward Whirl	
			O Backward Whirl	
Modes for Dynamic Response (Blank=All or i, j, k THRU n,)				
Mode IDs	Mode IDs UK			
Cancel				

Рис.7.5. Діалогова панель налаштування опцій **Rotor Dynamics** 

фіксованою віссю обертання ротора ("Fixed", прискорення Коріоліса не виникає), або з такою, що рухається не у поступальний спосіб ("Rotating", виникає прискорення Коріоліса).

У секції "Post Files" опції "CSV" та "GPF" вказуються, які інформаційні файли буде створювати NX Nastran: rotor.csv та/або rotor.gpf.

У секції "Rotor Speed" (швидкість ротора) встановлюються опції: "Start Value" (початкове значення,  $\geq 0.0$ ), "Step Size" (розмір кроку збільшення, > 0.0) "Number of Steps" (кількість кроків, >0). Одиниця виміру швидкості встановлюється у секції "Speed Input Units": "Rev/Minute" (об/хв), "Cycles/Sec" (цикл/сек), "Hertz" (герц) або "Radians/Sec" (радіан/сек). Аналогічні опції – у секції "Output Units" (одиниці виводу результатів).

У секції "Printed Output" (виведення) можна обрати варіанти: "None" (не виводити), "Generalized Matrices" (нормалізована матриця), "Eigenvalue Summary/Eigenvectors" (власні частоти та власні вектори результуючі, в кожному об/хв), "Both" (обидва варіанти).

У секції "Mode/Whirl Output" (виведення комплексних мод/вихрів у файли \*.f06 або \*.op2) можна обрати варіанти: "None" (не виводити), "All RPM" (для всіх швидкостей обертання) або "Rotor Speed" (для вказаного значення ( $\geq 0.0$ ) швидкості обертання).

У секції "Other Options" (інші опції) можна ввести "Whirl Threshold" (граничне значення для визначення напрямку вихру) та активувати опцію "Steiner Inertia" (додати інерцію Штайнера).

Увага: після команди "OK" може з'явитися панель із таким текстом: "OK to Set Complex Modal Analysis Options? Rotor Dynamic requires a modal complex solution. Review or update changes under NASTRAN Modal/Buckling options" (Установити комплексний модальний варіант аналізу? Динамічний ротор вимагає модального комплексного розв'язку. Перегляньте або відредагуйте опцій на панелі "NASTRAN Modal/Buckling" розділу "Options"). Необхідно обрати "Yes" або "No" та виконати відповідні редагування.

Всі інші опції діалогової панелі застосовуються лише для задачі типа 111 (4..Frequency/Harmonic Response – модальний частотній аналіз / гармонійний відгук).

У секції "Response Calc" (обчислення відгуку динамічного ротора) обирається один з варіантів: "Synchronous" (синхронний) або "Asynchronous" (несинхронний). У першому випадку будуть використовуватися всі три призначення секції "Rotor Speed", а у другому – тільки значення "Start Value" з цієї секції. У секції "Excitation" (збудження) обирається один з варіантів: "Mass Unbalance" (масова неврівноваженість ( $m \times r$ , потім помножується на  $\omega^2$ ), за замовчанням) або "Force" (сила,  $m \times r \times \omega^2$ , що задана на діалоговій панелі "Rotor

Region" (див. рис.7.4)). У секції "Excitation Order" (порядок збудження) обирається один з варіантів: "Default" (за замовчанням), "Forward Whirl" (прямий вихор) або "Backward Whirl" (зворотний вихор). У секції "Modes for Dynamic Response (Blank=All or i, j, k THRU **п.**...)" (моди для динамічної відповіді (пусто=всі або номери через кому)) у полі "Mode IDs" вказуються номери власних частот.

### 7.3.2.6. Розрахунок повної реакції спектрального відгуку тіла

У NX Nastran є можливість проведення розрахунку повної реакції спектрального відгуку тіла. На першому етапі знаходиться спектральний відгук тіла (як це описано у Розділу 7.3.2.4), на другому проводиться розрахунок реакції.

На другому етапі спочатку необхідно створити дві додаткові функції:

• типа 16.. Function vs. Critical Damp, де два значення параметра X є номером отриманої на першому етапі таблиці спектрального відгуку, наприклад, таблиці ABSDISP1 22 0.05, а параметра У – значення діапазону частот;

• типа 6..Structural Damp vs. Freq, 7..Critical Damp vs. Freq або 8..Q Damping vs. Freq залежності обраної характеристики демпфірування від частоти для всього частотного діапазону, який аналізується.

Для створення завдання на розв'язування задачі командою Model-Analysis... викликається діалогова панель "Analysis Set Manager" (див. рис.4.13-а), ініціюється кнопка "New", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) тип задачі "2..Normal Modes / Eigenvalues".

У розділі "Options" необхідно знайти підрозділ "NASTRAN Response Spectrum Application" та допомогою кнопки "Edit..." викликати діалогову панель "NASTRAN Response Spectrum Application" (див. рис.7.6), на якій:

• у секції "Spectrum" потрібно обрати один з факторів: "Acceleration" (прискорення) "Velocity" (швидкість) або "Displacement" (зміщення); у полі "Spectrum Function ID" – раніше створену функцію типа "16..Function vs. Critical Damp", а у полі "Scale Factor" – коефіцієнт масштабування результату. Увага: типи факторів (прискорення, швидкість або зміщення), що встановлено на панелі та поміщені в обраної функції, повинні співпадати;

• у вікні "Method" секції "Modal Combination" потрібно обрати один з методів змішування максимальних чутливостей у повну реакцію: 0.ABS (абсолютні величини), 1.SRSS (середньоквадратична величина), **2.NRL** (модальна сума, відповідно до проекту МВФ США) або 3.NRLO (модальна сума, старий варіант). У вікні "Closeness" вказується граничне значення частоти: усі методи, окрім 0.ABS, будуть обробляти тільки ті частоти, що перевищують це значення;

NASTRAN Response	Spectrum Application	×
Spectrum O None	Spectrum Function ID	
Acceleration     Velocity     Disclaracement	Scale Factor	
Modal Combination		ון
Method Closeness	0ABS	
Base DOF		
SUPORT Set	×	
Modal Damping Damping Func	×	
Ne <u>x</u> t	<u>D</u> K Cancel	

Рис.7.6. Діалогова панель для підготування розрахунку повної реакції спектрального відгуку тіла

• у полі "SUPORT Set" секції "Base DOF" потрібно обрати набір з обмеженнями (Constraint), призначеними для тіла, а у секції "Modal Damping" у полі "Damping Func" – раніш створену функцію типа 6..Structural Damp vs. Freq.

Результати розрахунку – одне число (повна реакція спектрального відгуку), яке можна отримати, переглянувши у стандартний спосіб як ХУ-функції всі таблиці спектрального відгуку, які мають той *тип* фактору (прискорення, швидкість або зміщення), що було встановлено на панелі "NASTRAN Response Spectrum Application" (див. рис.7.6). "Старе" наповнення цих таблиць можна переглянути лише за допомогою команди List $\rightarrow$  Model $\rightarrow$  Function..., тобто воно не зникає.

7.3.3. Крайова задача про вимушені гармонійні коливання тіла

Окремий, але досить розповсюджений випадок сил,

що викликають коливання тіла – гармонійні сили, тобто такі, що змінюються у часі за законом синуса або косинуса.

Більшість дій при створенні моделі цієї задачі – аналогічна викладеному у Розділі 7.3.2. Вкажемо на деякі відмінності.

Гармонійні силові навантаження задаються змінними у часі за законом синуса або косинуса за допомогою функцій типа "1.vs. Time", які створюються та обираються на діалоговій панелі "Create Loads on ..." (див. рис.4.3 та інші подібні) у полі "Time/Freq Dependence".

Усі величини, що задаються за допомогою команди Model→Load→..., повинні залежати від функцій типа 1..vs. Time або 3..vs. Frequency, навіть незмінні у часі (тоді значення Y такої функції призначається рівним одиниці у всьому діапазоні).

Спочатку потрібно провести частотний аналіз з можливістю подальшого рестарту (див. наприкінці Розділу 7.3.2.2).

На діалоговій панелі "Load Set Options for Dynamic Analysis" (рис.7.1-а, викликається командою Model→Load→Dynamic Analysis...) потрібно обрати тип аналізу "Direct Frequency" (прямий аналіз) або "Modal Frequency" (модальний аналіз), ввести потрібні дані. Увага: якщо параметри демпфірування не будуть задані, то при резонансному збудженні переміщення – нескінченні (теоретично), тому NX Nastran може видати фатальну помилку.

Таблиця частот з назвою "Modal Frequency Table" (розрахункові точки при частотному аналізі, див. Розділ 7.2 та рис.7.1-в) для поля "Frequencies" секції "Frequency Response" створюється шляхом ініціації електронної кнопки "Modal Freq": на панелі "Frequency Table From Modal Result", яка з'являється, потрібно обрати зі списків (з результатів попередньо проведених розрахунків) початкову та кінцеву частоти, а також у полі "Number of Points per Existing Mode" вказати кількість точок у околі кожної власної частоти, а у полі "Frequency Band Spread (+/-)" – ширину частотної смуги у відсотках від абсолютного значення відповідної власної частоти. Цю таблицю потім можна переглянути у звичайний спосіб за допомогою команд **Modify→Edit→**... або **View→**....

За допомогою електронної кнопки "Enforces Motion…" можна підключити до тіла значну масу, яка вібрує. Якщо ця маса значно перевищує масу тіла, що розраховується, то це фактично буде кінематичним збудженням цього тіла. Спочатку викликається діалогова панель для призначення точки з "основною масою", що буде мати прискорення (для створення сили, що вимушує); потім – діалогова панель для обирання вузлів тіла, які будуть жорстко зв'язаними з цією точкою (СЕ типа RIGID). Після цього з'являється стандартна діалогова панель завдання силових умов (див. рис.5.2), де задається прискорення основної маси: повздовжнє (Acceleration) або кутове (Rotational Acceleration), яке може залежати або від часу, або від функції часу. Потім з'являється панель "Mass/Access Scale Factor" (див. рис.7.4в), де задається маса (Mass) та масштабний коефіцієнт (Factor) для прискорення (за замовчанням з'являється значення "Mass", що значно перевищує масу тіла). У підсумку амплітуда динамічної сили, що буде діяти у вказаній точці з "основною масою", розраховується як результат перемноження значень "Mass", "Factor" та "Acceleration". Увага: якщо для системи "тіло-маса" в задачі умови закріплення задаватися не будуть, то при запуску процесу розв'язування задачі потрібно "замовити" більшу кількість власних частот коливань, оскільки з'являються декілька нульових або дуже малих частот, які відповідають умовам переміщення системи як жорсткого цілого (ефект числового, завжди наближеного, алгоритму).

Для створення завдання на розв'язування задачі командою Model->Analysis... викликається діалогова панель "Analysis Set Manager" (див. рис.4.13-а), ініціюється кнопка "New", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) тип задачі "4..Frequency / Harmonic Response" (частотний аналіз / гармонійний відгук) та провести інші призначення (див. Розділ 7.3.2.1.), зокрема застосувати рестарт.

Також за допомогою кнопок "Next..." можна розпочати процес додаткового налаштовування розв'язку та даних виводу задачі. Він вже описаний у Розділі 4.2. Є одна відмінність: у підрозділі "Output Requests" розділу "Master Requests and Conditions" на діалоговій панелі "NASTRAN Output Requests" (див. рис.4.19-б, внизу) можна замість "Magnitude/Phase" обрати варіант "Real/Imaginary", тобто вказати, щоб результати виводилися не як амплітуда та фаза, а як дійсна та мнима частина розв'язку.

При перегляді результатів можна построїти, наприклад, графіки амплітуд переміщень або напружень у обраних вузлах тіла при резонансному збудженні.

### 7.3.4. Крайова задача про стохастичне збудження тіла

Проводиться модальний частотній аналіз з наступною пост-процесорною обробкою у FEMAP для визначення характеристик стохастичного збудження.

Багато дій – тотожні викладеному в Розділі 7.3.3. Необхідно послідовно:

 провести частотний аналіз тіла з урахуванням умов його закріплення (якщо вони є) та з можливістю подальшого рестарту (див. наприкінці Розділу 7.3.2.2);

• створити функції залежності навантаження від частоти (типа **3..vs. Frequency**). Якщо деяке навантаження реально не буде залежати від частоти, то відповідна функція повинна дорівнювати одиниці в усьому діапазоні. Після цього – ввести навантаження, обравши створені функції;

• створити функцію залежності характеристик демпфірування від частоти (типа 7..vs. Critical Damp vs. Freq). Якщо ці характеристики реально не залежать від частоти, то функція повинна дорівнювати одиниці в усьому діапазоні;

• створити функцію спектральної щільності навантаження (**PSD**) S<sub>αβ</sub>(ω) (див. Розділ

Д7.3.4 Додатка 7) у залежності від частоти (типа **3..vs. Frequency**). Звичайно ця функція має значення у діапазоні від деякої незначної величини до одиниці. У таблиці Д7.1 наведені деякі аналітичні вирази для таких функцій, їхній графічний вигляд. У поясненнях до таблиці вказані можливі застосовування. У NX Nastran функція **PSD** може бути у формі авто- або взаємно- спектральної щільності;

• на діалоговій панелі "Load Set Options for Dynamic Analysis" (рис.7.1-а, викликається командою Model→Load→Dynamic Analysis…) необхідно:

• обрати тип аналізу "Modal Frequency" (модальний аналіз);

• у секції "Equivalent Viscous Damping" (еквівалентне в'язке демпфірування) задати загальний коефіцієнт конструкційного демпфірування (Overall Structural Damping Coeff (G)), а у діалоговому вікні "Modal Damping Table" обрати раніш створену функцію залежності характеристик демпфірування від частоти (типа 7..vs. Critical Damp vs. Freq). Нагадаємо, що коефіцієнт G можна не задавати, якщо його задано для усіх СЕ як властивість матеріалу CE, або можна задати як додаткову величину до заданого для матеріалу;

• у полі "PSD" секції "Random Analysis Options" – підключити створену PSDфункцію спектральної щільності навантаження (вхідного впливу) при випадковому характеру зміни амплітудного значення сили, що збуджує;

• електронною кнопкою "Advanced..." можна викликати діалогову панель "Advanced Load Set Options for Dynamic Analysis" (див. рис.7.1-г) для призначення додаткових параметрів аналізу, зокрема, у секції "Random Analysis". У полі "ANSYS PSD Type" (характеристики PSD – як у програмі ANSYS) є можливість ввести прискорення: "0..Accel (Acc2/Hz)" (через прискорення, у величинах прискорення у квадраті, розділене на частоту), "1..Accel (g2/Hz)" (через абсолютні значення прискорення), "2..Displacement" (через переміщення), "3..Velocity" (через швидкість) або "4..Force" (через силу). Є ще поле "NASTRAN PSD Interpolation", тобто метод інтерполяції функції PSD, яка задається у вигляді таблиці: логарифмічний (0..Log Log), лінійний (1..Linear), логарифмічно-лінійний (2..X Log,Y Lin) або лінійно-логарифмічний (3..X Lin,Y Log). Інші опції описані наприкінці Розділу 7.2;

• для створення завдання на розв'язування задачі командою Model→Analysis... викликається діалогова панель "Analysis Set Manager" (див. рис.4.13-а), ініціюється кнопка "New", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) тип задачі "6..Random Response". Якщо раніше було створено декілька наборів навантажень (Load Set), то на панелі буде активна кнопка "MultiSet..." для їх підключення, якою потріб-

но скористатися та обрати необхідні набори навантажень. Потрібно підключити файл рестарту (див. наприкінці Розділу 7.3.2.2);

• якщо у розділі "Options" обрати підрозділ "NASTRAN ModalXYPlot" та ініціювати кнопку "Edit...", з'явиться діалогова панель "NASTRAN XY Output for Modal Analysis" (див. рис.6.13-б), де можна вказати якісь вузол для наступного виводу результатів. Потім потрібно за допомогою кнопки "Next..." посліналаштувати діалогові панелі підрозділу довно "NASTRAN Random Output2", що зображені на рис.7.7 та рис.7.8. Спочатку з'явиться діалогова панель "NASTRAN Output for Random Analysis" (див. рис.7.7). На ній потрібно обрати один з варіантів стандартного виводу: "None", "Power Spectral Density Function" (PSD-функція), "Autocorrelation Function" (автокореляційна функція) або "Both" (обидва останніх варіанта). Якщо буде активною, можна встановити оп-



Рис.7.7. Перша діалогова панель налаштовування основного виводу результатів для частотного аналізу

цію "Response vs. Frequency (XY Plot)" (реакція як функція частоти). Кнопкою "Next..." викликається інша панель з тією ж назвою (див. рис.7.8-а), де у секції "Nodal Output Requests" можна вказати ступені свободи вузлів (потрібно заздалегідь створити групу з переліком цих вузлів), для яких будуть виводитися результати розрахунку (у вигляді ХУ-графіка); у секції "Elemental Stresses" – для яких типів СЕ, видів напружень та точок перерізу (Loc ...) лінійних СЕ виводити результати (це будуть напруження); можна встановити опцію "Summary Data Only" (тільки сумарні дані). Якщо ініціювати кнопку "Forces", то з'явиться додаткова панель з тією же назвою (див. рис.7.8-б), де можна призначити: для яких типів лінійних СЕ та/або СЕ типа **PLATE** виводити розраховані значення сил;

NASTRAN Output for Random Analysis				
Nodal Output Requests				
Displacement T1 T2 T3 R1 R2 R3				
Acceleration T1 T2 T3 R1 R2 R3				
Elemental Stresses				
<u>S</u> prings Axial				
<u>R</u> ods Axial Torsional				
Bars Axial				
End A Loc 1 Loc 2 Loc 3 Loc 4				
End B Loc 1 Loc 2 Loc 3 Loc 4				
Beams End A Loc 1 Loc 2 Loc 3 Loc 4				
End B Loc 1 Loc 2 Loc 3 Loc 4				
Plates Bottom				
Top 🗌 🗙 Normal 📄 Y Normal 📃 XY Shear				
Solids X Normal Y Normal Z Normal				
🗌 XY Shear 🔛 YZ Shear 📃 ZX Shear				
A <u>x</u> isym 📄 Radial 📄 Azim 📄 Axial 📄 Shear				
Forces				
Ne <u>x</u> t <u>D</u> K				
Summaru Data Onlu				

NASTRAN	Output fo	or Random	Analysis	×
Elementa	al Forces			
<u>S</u> prings		📃 Axial		
<u>R</u> ods		📃 Axial	Torsional	
<u>B</u> ars		📃 Axial	Torsional	
	Bend End A	📃 Plane 1	Plane 2	
	Bend End B	🔄 Plane 1	Plane 2	
	Shear	📃 Plane 1	📃 Plane 2	
Bea <u>m</u> s		📃 Axial		
		📃 Total To	rque 📃 Warp Torque	
	Bend	📃 Plane 1	📃 Plane 2	
	Web Shear	📃 Plane 1	Plane 2	
<u>P</u> lates	Memb	□×	□Y □XY	
	Bend	□×	□Y □XY	
	Shear	□×	ΞY	
L				
				<u> </u>
			Cancel	

б) a) Рис.7.8. Друга та третя діалогові панелі налаштовування основного виводу результатів для частотного аналізу

• якщо було підключено два або більше наборів навантажень, то за допомогою кнопки "Edit..." можна налаштувати підрозділ "NASTRAN PSD Correlations" у розділі "Options". З'явиться діалогова панель "NASTRAN Power Spectral Density Factors" (див. рис.7.9) для завдання кореляційних зв'язків між наборами навантажень (Load Set). Потрібно в полі "Correlation Table" обрати один з рядків. Номери у рядку цієї таблиці відповідають призначеному навантаженню. Коли випадки – однакові (наприклад, 1=>1, 2=>2), потрібно у секції "Edit Correlation Table" задати ваговий коефіцієнт (Factor) та обрати PSD-функцію (зі списку заздалегідь створених) тільки для дійсної (Real) частини. А коли випадки різні (наприклад, 1=>2), необхідно визначитися, чи корелювати ці випадки, чи ні. Щоб задати кореляцію, потрібно у секції "Edit Correlation Table" задати вагові коефіцієнти (Factor) та обрати PSDфункції для дійсних (Real) і мнимих (Imaginary) частин;

NASTRAN Power Spectral De	nsity Factors	×				
Correlation Table	Edit Correlation Table					
1=>1	Excited Load Set 1Constraint 1 - Load_01					
1=>2 2=>2	Applied Load Set 1Constraint 1 - Load_01					
	Factor	PSD Function				
	Real 1, ×	0None 🗸				
	Imaginary 1. ×	0None 🔽				
	<u> </u>	Cancel				

Рис.7.9. Діалогова панель для завдання кореляційних зв'язків

• у підрозділі "Output Requests" розділу "Master Requests and Conditions" на діалоговій панелі "NASTRAN Output Requests" (див. рис.4.19-б, внизу) можна замість "Magnitude/Phase" обрати варіант "Real/Imaginary", тобто вказати, щоб результати виводилися не як амплітуда та фаза, а як дійсна та мнима частина розв'язку.

Результати розрахунку у вигляді графіка зміни, наприклад, зага-

льного переміщення (Total Translation) можна переглянути у стандартний спосіб як графік: "XY vs Set" – для одного вузла у всьому діапазоні частот; "XY vs ID" – для всіх вузлів при обраної частоті.

### 7.3.5. Модальний аналіз методом DDAM

Метод **DDAM (Dynamic Design Analysis Method)** визначає послідовність дій для проведення модального аналізу реакції устаткування судна на підводний вибух. Метод має внутрішній ідентифікатор **DDAM** та код задачі **187** (див. табл.Д9.1 Додатка 9).

Для створення завдання на розв'язування задачі командою Model→Analysis... викликається діалогова панель "Analysis Set Manager" (див. рис.4.13-а), ініціюється кнопка "New", на панелі "Analysis Set" обирається у списку "Analysis Type" (див. рис.4.13-б) тип задачі "2..Normal Modes / Eigenvalues".

У розділі "Options" необхідно знайти підрозділ "NASTRAN DDAM", за допомогою кнопки "Edit…" викликати діалогову панель "NASTRAN DDAM Solution Options" (див. рис.7.10-а) та ініціювати на ній опцію "Enable DDAM Analysis". Опція "Include Path in All Filenames" (підключити шляхи у всіх іменах файлів) за замовчанням є активованою.

Результати розрахунку створюються за три етапи:

• NX Nastran обчислює власні частоти, коефіцієнти участі та модальні ефективні ваги для кожного режиму, все це записується у текстовий файл **OUTPUT4**;

• FEMAP обчислює модальні ударні реакції конструкції, причому використовуються: файл **OUTPUT4** та ще три файли, створені FEMAP з використанням відомостей, що введені користувачем за допомогою панелей, зображених на рис.7.10;

• Nastran формує стандартні файли результатів, вони читаються FEMAP.

У секції "Spectrum/Coefficient Options" (спектр/коефіцієнти) діалогової панелі "NASTRAN DDAM Solution Options" обирається один із варіантів: "Non-DDAM Spectrum Analysis" (не DDAM спектральний аналіз) або "DDAM" (DDAM спектральний аналіз).

Якщо обрати варіант "Non-DDAM Spectrum Analysis" або "DDAM" та "Coefficient from Internal File" (коефіцієнт із зовнішнього файлу), то стає доступним поле "Coefficient File" для обирання відповідного файлу (за допомогою кнопки ...).

У разі обирання варіанта "Specify Coefficients" (визначення коефіцієнта) стає активною кнопка "Specify Coefficients…", яка викликає панель "NASTRAN DDAM Coefficients" (див. рис.7.10-б). На ній у секції "Velocity and Acceleration Factors" (коефіцієнти швидкості та прискорення) при необхідності у відповідних полях задаються значення для: "Fore/Aft (1)" (ніс/корма), "Athwartship (2)" (поперечний напрямок) та "Vertical (3)" (вертикаль). У секції

"Weighting Factors" у полях з назвами VA, VB, VC, AA, AB, AC та AD (перші букви – від Velocity та Acceleration) необхідно задати відповідні вагові фактори. При необхідності можна ініціювати опцію "Modal Mass Cutoff Percentage" та у полі "Cutoff %" задати відсоток (від 0 до 100) зменшення маси (за замовченням – 100%).

NASTRAN DDAM Solution Op	otions					
🗹 Enable DDAM Analysis		🗹 Include Pat	h in All Filename:	5	NASTRAN DDAM Coefficients	
Spectrum / Coefficient Options	ysis 🔿 Speci	fy Coefficients Spe	cify Coefficients		Velocity and Acceleration Factors Velocity Fore/Aft (1)	Acceleration
⊙ DDAM	🔾 Coeffi 💽 Use E	cients from External File tuilt-In Coefficients			Athwartship (2)         Ø,         (2)           Vertical (3)         Ø,         (3)	
Coefficient File	Equipment <ul> <li>Deck</li> <li>Hull</li> </ul>	Coefficient Type • Elastic • Elastic / Plastic	Equation Typ DDS-07 NRL 13	e 2 36	<ul> <li>Weighting Factors</li> <li>VA ♥ 0, AA</li> <li>VB ♥ 0, AB</li> </ul>	▼ 0, ▼ 0,
Cutoffs Modal Mass Cutoff % (100=All)	O Shell	Axis Orientation Fore / Aft	OY OZ			<ul> <li>✓ 0,</li> <li>✓ 0,</li> </ul>
Minimum Acceleration (Gs) Dir Sequence (X=1,Y=2,Z=3)	0, 123	Vertical OX	OY ⊙Z		Cutoff % 100,	<u>O</u> K Cancel

a)

б)

Рис.7.10. Діалогові панелі для настроювання модального аналізу DDAM

У секції "Equipment" (обладнання) є три варіанти: "Deck" (палуба), "Hull" (корпус) та "Shell" (оболонка – для субмарини). У секції "Location" (локалізація) обирається "Surface" (на поверхні) або "Submerged" (субмарина на глибині). У секції "Coefficient Type" (тип коефіцієнта) обирається "Elastic" (пружний) або "Elastic/Plastic" (пружний/пластичний). У секції "Cutoffs" призначається "Modal Mass Cutoff % (100=All)" – відсоток (від 0 до 100) зменшення маси. У секції "Axis Orientation" (орієнтація осей) у рядках "Fore/Aft" (ніс/корма) та "Vertical" (вертикаль) обираються потрібні осі (X, Y або Z).

Опції секції "Equation Type", а також опції "Minimum Acceleration (Gs)", "Dir Sequence (X=1,Y=2,Z=3)" та "Mass to Weight Factor" не є активними (не потрібні) для NX Nastran.