

ЗАВЕРШЕННЯ

Пре/пост процесор FEMAP і аналізатор NX Nastran адаптовано до ЕОМ з різними типами процесорів і з різними операційними системами, з одним або більшою кількістю процесорів (паралельні розрахунки). Комплекс FEMAP 9.3 & NX Nastran 5.0, що розглядається (скорочена назва: UGS.F93), є неповною версією з цих і деяких інших програм обслуговування для ПЕОМ з операційною системою Windows NT. Основне призначення UGS.F93 для Windows – початкове навчання та розрахунки відносно невеликих задач декількох основних типів. Крім того, комплектація комплексу UGS.F93 і можливість розв’язування ним неосновних типів задач залежить від умов контракту, за яким поставляється програма.

У цій книзі описані тільки основи роботи у FEMAP для NX Nastran. Але якщо оволодіти цим об’ємом інформації, можна розв’язувати значний обсяг типів крайових задач, представлених у NX Nastran. Крім того, FEMAP має інтерфейс з багатьма іншими програмами, в яких реалізовано метод скінченних елементів. Кожна з цих програм має свою специфіку, описання якої (для FEMAP) потребує багато місця. Але практика показує, що майже завжди дані для них формуються та передаються неточно, з проблемами. Тому рекомендують користуватися „рідними” пре- та постпроцесорами. Крім того, всі ці програми дуже багато коштують, тому рідко одна фірма має декілька програм, які може „обслуговувати” FEMAP. Саме з цих причин у книзі не описано створення моделей та інтерфейс з іншими програмами (не NX Nastran).

Крім описаних у книзі, FEMAP має й інші інструменти, команди та діалоги, дуже прості для розуміння, які з цієї причини не описані у книзі. Зокрема, деякі команди меню „**File**” (загальні для проекту дії), меню „**List**” (виведення даних у вигляді тексту у вікно „**Messages**” або файл).

Крім цього, у FEMAP і NX Nastran є ще ресурси, для користування якими потрібно мати спеціальну підготовку. Таку інформацію поміщено у „**Help**”. Причому, окрім основних відомостей у файлах формату **HTML**, є ще значна кількість файлів у форматі **PDF** (розділ „**More Resources**”). Зокрема, фахівець може мати прямий доступ у базу даних FEMAP. У FEMAP можна створювати нові макроси, для чого застосовується мова програмування FEMAP. Докладні відомості про внутрішні функції, типи даних, опис різноманітних об’єктів та їх властивостей тощо поміщені у файлі **...\\FEMAP93\\PDF\\api.pdf**. А у файлі **...\\FEMAP93\\PDF\\neutral.pdf** докладно описані формати трьох типів файлів, що застосовуються у FEMAP: **FEMAP Neutral File Format**, **FEMAP Material Definition File**, **FEMAP Binary Output File Format**.

Для FEMAP створено програму керування чергою задач з назвою **VisQ**, яка має дві частини: **VisQ Server** та **VisQ Client**. **VisQ Client** використовується на ПЕОМ користувача, посилає через мережу завдання для розрахунків, отримує результати розрахунків. **VisQ Server** керує програмним забезпеченням ЕОМ, яка розв’язує задачу (звичайно це окрема дуже потужна багатопроцесорна машина), чергою задач, файлами і каталогами на сервері. Наявність цієї програми дозволяє автоматизувати вказані процеси.

Розрахунки крайових задач за допомогою МСЕ стають все більш популярними. Але треба пам’ятати, що ці розрахунки – наближені. Теоретично для одержання більш точного результату необхідно зменшувати відстань між вузлами скінченно-елементної сітки та застосовувати СЕ другого порядку наближення (параболічні), що приводить до різкого збільшення кількості вузлів та СЕ, а це, у свою чергу, потребує дуже багато пам’яті (оперативної та дискової) та часу для розв’язування системи алгебраїчних рівнянь, яка породжується МСЕ. Крім того, процес створення розрахункової моделі (див. Розділ 1.6) часто не є простим. Це дійсно творчий процес, від якості якого залежить, зокрема, не тільки точність та час проведення розрахунків, а й правильність (збіжність) отриманих результатів.

Багато залежить від наявності у користувача фахових знань з таких дисциплін, як опір матеріалів, теорія пружності, теорія пластичності та повзучості, будівельна механіка, теорія

коливань, чисельні методи тощо. У Додатках 4 ... 8 наведено лише основні відомості з цих питань для загального (тривимірного) випадку. Одновимірні, двовимірні та оболонкові СЕ мають специфіку, часто дуже значну. Ці відомості можна одержати з літературних джерел.

ЛІТЕРАТУРА

Примітка. Документи FEMAP, що позначені *, збережені у файлах формату PDF, доступні за допомогою команди **Help→Help Topics→More Resources→More Resources→...**, яка викликає їх із папки ...\\FEMAP93\\PDF\\. Документи NX Nastran, що позначені **, збережені у файлах формату PDF, доступні за допомогою команди **Help→NX Nastran→Help Library—PDF Connection ...**, яка викликає їх із папки ...\\FEMAP93\\nastranhelp\\NXNastran\\nast\\mics\\doc\\docs\\pdf\\. Іншою літературою автор користувався тією чи іншою мірою при підготовці цієї книги.

1. FEMAP. API Reference. Version 9.3. (api.pdf *)
2. FEMAP. Commands. Version 9.3. (commands.pdf *)
3. FEMAP. Examples. Version 9.3. (examples.pdf *)
4. Installing FEMAP in a Network Environment. (network.pdf *)
5. Installation Guide. (network.pdf *)
6. FEMAP Neutral File Format. FEMAP Material Definition File. FEMAP Binary Output File Format (neutral.pdf *).
7. What's New in FEMAP 9.3. (newfeat.pdf *)
8. Other Analysis Program Interfaces. (othertrans.pdf *)
9. FEMAP v9.3. New Features and Corrections. (readme.pdf *)
10. Welcome to FEMAP README for Previous Versions. (readprev.pdf *)
11. FEMAP. User Guide. Version 9.3. (user.pdf *)
12. VisQ. Queue Manager System Guide. Version 9.3. (visqman.pdf *)
13. NX Nastran. Advanced Dynamic. Analysis User's Guide. (adv_dyn.pdf **)
14. NX Nastran. Advanced Nonlinear Theory and Modeling Guide. (advanced_nonlinear_tmg.pdf **)
15. NX Nastran. Aeroelastic Analysis User's Guide. (aero.pdf **)
16. NX Nastran. Basic Nonlinear Analysis User's Guide. (bas_nonlinear.pdf **)
17. NX Nastran. Basic Dynamic Analysis User's Guide. (basic_dynamics.pdf **)
18. NX Nastran. Installation and Operations Guide. (cog.pdf **)
19. NX Nastran. DMAP Programmer's Guide. (dmap.pdf **)
20. NX Nastran. DMAP Changes from NX Nastran Version 1 to Version 4. (dmap_changes_V1_to_V4.pdf **)
21. NX Nastran. Element Library Reference. (element.pdf **)
22. NX Nastran. Getting Started Tutorials. (get_start.pdf **)
23. NX Nastran. Glossary. (glossary.pdf **)
24. NX Nastran. Handbook of Nonlinear Analysis (SOL 106). (nonlinear_106_NXN.pdf **)
25. NX Nastran. Numerical Methods User's Guide. (numerical.pdf **)
26. NX Nastran. Design Sensitivity and Optimization User's Guide. (optimization.pdf **)
27. NX Nastran. Parallel Processing Guide. (parallel_processing_users_guide.pdf **)
28. Using the PDF Search. (pdf_search.a.pdf **)
29. NX Nastran. Quick Reference Guide. (QRG.pdf **)
30. NX Nastran 4. New Features. (release_guide_40.pdf **)
31. NX Nastran 4.1. Release Guide. (release_guide_41.pdf **)
32. NX Nastran 5. Release Guide. (release_guide_50.pdf **)
33. NX Nastran 5. DMAP Updates and Additions. (released_dmaps.pdf **)
34. NX Nastran. Rotor Dynamics User's Guide. (rotordyn.pdf **)
35. NX Nastran. Superelement User's Guide. (super.pdf **)
36. NX Nastran. Nastran Theoretical Manual. (theoretical_NXN.pdf **)

37. NX Nastran. Thermal Analysis User's Guide. (thermal.pdf **)
38. NX Nastran. User's Guide. (User.pdf **)
39. Бате Н., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
40. Валях Е. Последовательно-параллельные вычисления. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 456 с., ил.
41. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
42. Василенко М.В., Алексейчук О.М. Теорія коливань і стійкості руху: Підручник. – К.: Вища шк., 2004. – 525 с., іл.
43. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
44. Джордж А., Лю Дж. Численное решение больших разреженных систем уравнений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984 – 333 с.
45. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 539 с.
46. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
47. Колтунов М.А., Кравчук А.С., Майборода В.П. Прикладная механика деформируемого твердого тела. – М.: Высш. школа, 1983 – 349 с.
48. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1989. – 608 с.
49. Метод конечных элементов в механике твердых тел / Под ред. А.С. Сахарова, И. Альтенбаха. – К.: Вища школа, Лейпциг: ФЭБ Фахбухферлаг, 1982. – 480 с.
50. Нестационарные тепловые процессы в энергетических установках летательных аппаратов / Коваленко Н.Д., Шмукин А.А., Гужва М.И., Махин В.В. – К.: Наук. думка, 1988. – 224 с.
51. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
52. Опір матеріалів: Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; За ред. Г.С. Писаренка. – К.: Вища шк., 1993. – 655 с.
53. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений. Численные методы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 384 с.
54. Победря Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 366 с.
55. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
56. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
57. Рудаков К.М. FEMAP. Геометричне та скінченно-елементне моделювання конструкцій для розрахунків у MSC.Nastran: Посібник. К.: НТУУ „КПІ”, 2005. – 210 с., іл.
58. Рудаков К.М. FEMAP. Геометричне та скінченно-елементне моделювання конструкцій у MSC.visualNastran for Windows: Посібник. К.: НТУУ „КПІ”, 2005. – 218 с., іл.
59. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник. – К.: НТУУ „КПІ”, 2007. – 379 с.
60. Рычков С.П. MSC.visualNASTRAN для Windows. – М.: НТ Пресс, 2004. – 552 с.: ил. (Проектирование и моделирование).
61. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учебн. пособие для вузов. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
62. Хан Х. Теория упругости: Основы линейной теории и ее применения: Пер. с нем. – М.: Мир, 1988. – 344 с.
63. Хейгеман Л., Янг Д. Прикладные итерационные методы / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 448 с.

64. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с., ил. (Серия „Проектирование”).
65. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC.visualNastran for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 704 с., ил. (Серия „Проектирование”).
66. K.J. Bathe. Finite Element Procedures. – Prentice Hall, 1996.
67. D. Chapelle, K.J. Bathe. The Finite Element Analysis of Shells. Fundamentals. – Springer, 2003.
68. Crisfield M.A. Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Volume 1: Essentials. – John Wiley & Sons, 2000.
69. Crisfield M.A. Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Volume 2: Advanced Topics. – John Wiley & Sons, 2000.
70. Doltsinis I. Large Deformation Processes of Solids. From Fundamentals to Numerical Simulation and Engineering Applications. – WIT Press, 2004.
71. Ogden R.W. Non-linear Elastic Deformations. – Dover, 1997.
72. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Fifth edition. Volume 1: The Basis. – Butterworth-Heinemann, 2000.
73. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Fifth edition. Volume 2: Solid Mechanics. – Butterworth-Heinemann, 2000.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	5
1.1. Меню FEMAP	6
1.2. „Гарячі” клавіші FEMAP	6
1.3. Перемикачі, мнемонічні меню, панелі та кнопки FEMAP	7
1.4. Файли FEMAP та NX Nastran	12
1.5. Настроювання FEMAP	13
1.6. Про створення розрахункової моделі	20
1.7. Рівні та групи	21
1.7.1. Рівні	21
1.7.2. Групи	22
1.8. Функції та макроси	26
1.8.1. Створення функцій	26
1.8.2. Перегляд графіків функцій	27
1.8.3. Створення макросів	28
Розділ 2. СТВОРЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ТІЛА	29
2.1. Імпорт та експорт геометричної моделі тіла	30
2.2. Створення геометричної моделі тіла	34
2.2.1. Системи координат, орієнтація і розміри зображення, робоча площина	34
2.2.2. Введення точок	36
2.2.3. Побудова ліній	38
2.2.3.1. Побудова прямих ліній	38
2.2.3.2. Побудова окружностей та їх частин (дуг)	39
2.2.3.3. Побудова ліній сплайнами	40
2.2.3.4. Побудова ліній на поверхні	42
2.2.4. Побудова поверхонь	42
2.2.5. Побудова об'ємів і „твердих” тіл	44
2.2.5.1. Побудова об'ємів	44
2.2.5.2. Побудова „твердих” тіл	45
2.2.5.3. Очищення „твердих” тіл	48
2.2.6. Загальні операції з елементами геометричної моделі	49
2.2.6.1. Операції копіювання	49
2.2.6.2. Операції модифікації	50
2.2.6.3. Операції контролю геометрії	50
2.2.6.4. Операції вимірювання	51
Розділ 3. СТВОРЕННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ТІЛА	53
3.1. Завдання властивостей матеріалів	53
3.2. Завдання атрибутів „Properties” скінченних елементів	56
3.3. Створення скінченно-елементної моделі тіла на основі геометричної моделі	61
3.3.1. Підготовка до автоматичного створення скінченно-елементної сітки	61
3.3.1.1. Завдання параметрів автоматичного створення скінченно-елементної сітки	61
3.3.1.2. Призначення атрибутів скінченно-елементної сітки геометричним об'єктам	63
3.3.1.3. Впорядкування майбутньої скінченно-елементної сітки на поверхні	64
3.3.1.4. Виключення несуттєвих особливостей у „твердих” тілах	65

3.3.2 Створення скінченно-елементної сітки тіла або конструкції на основі геометричної моделі	65
3.3.2.1. Завдання параметрів вузлів та скінченних елементів	65
3.3.2.2. Створення скінченних елементів у точках	66
3.3.2.3. Створення скінченно-елементної сітки на лініях	66
3.3.2.4. Створення двовимірної та вісесиметричної скінченно-елементної сітки	66
3.3.2.5. Створення двовимірної скінченно-елементної сітки на основі серединних поверхонь	67
3.3.2.6. Створення тривимірної скінченно-елементної сітки для „твердого” тіла	68
3.3.2.7. Створення тривимірної скінченно-елементної сітки на основі об’єму	71
3.3.2.8. Створення скінченно-елементної конструкції з різних матеріалів	71
3.4. Створення скінченно-елементної моделі тіла без геометричної моделі	72
3.4.1. Створення скінченно-елементної сітки на основі повного набору вузлів	72
3.4.2. Створення скінченно-елементної сітки на основі опорних вузлів	73
3.4.3. Створення скінченно-елементної сітки на основі операцій видавлювання, обертання та витягування	74
3.4.4. Створення тривимірної скінченно-елементної сітки на основі двовимірних скінченних елементів	76
3.5. Модифікація скінченно-елементної моделі тіла	77
3.5.1. Створення зв’язків між вузлами	77
3.5.2. Редагування скінченно-елементної сітки	78
3.5.3. Регенерація та очищення скінченно-елементної сітки	78
3.5.4. Перетворення скінченно-елементної сітки у STL-моделях	79
3.5.5. Створення ребер жорсткості	79
3.5.6. Згладжування скінченно-елементної сітки	80
3.5.7. Операції маніпулювання вузлами та скінченними елементами	80
3.5.8. Перенумерування об’єктів скінченно-елементної сітки тіла	80
3.5.9. Команди змін параметрів скінченно-елементної сітки тіла	81
3.6. Контроль параметрів скінченно-елементної моделі тіла	83
3.6.1. Контроль функцій, характеристик матеріалів та властивостей скінченних елементів	83
3.6.2. Контроль вузлів та скінченних елементів, що співпадають	83
3.6.3. Контроль розташування вузлів на заданій площині	84
3.6.4. Контроль геометричних параметрів скінченних елементів	84
Розділ 4. ЗАГАЛЬНІ ІНСТРУМЕНТИ МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ	86
4.1. Загальні інструменти для завдання граничних умов	86
4.1.1. Об’єкти прикладання граничних умов	86
4.1.2. Асоціації між об’єктами СЕС та геометричної моделі	87
4.1.3. Введення значень граничних умов	88
4.1.4. Маніпулювання наборами граничних умов	92
4.1.4.1. Копіювання наборів граничних умов	92
4.1.4.2. Видалення та редагування наборів граничних умов	92
4.1.4.3. Лінійне комбінування наборів граничних умов	92
4.1.4.4. Масштабування наборів граничних умов	93
4.1.4.5. Використання результатів розрахунків для завдання граничних умов	93
4.1.4.6. Перетворення граничних умов	95
4.2. Створення завдання й запуск процесу розрахунку крайової задачі	95
4.2.1. Про запуск процесу розрахунку крайової задачі	96
4.2.2. Коди основних типів крайових задач у NX Nastran	96
4.2.3. Діалогова панель „Analysis Set Manager”: створення завдань на проведення аналізу зі стандартним набором параметрів	96

4.2.4. Настроювання рестарту процесу розрахунку крайової задачі у Nastran	99
4.2.5. Опції панелі „NASTRAN Executive and Solution Options”	99
4.2.6. Опції панелі „NASTRAN Bulk Data Options”	100
4.2.7. Опції панелі „GEOMCHECK”	103
4.2.8. Опції панелі „MODELCHECK”	104
4.2.9. Інші панелі розділу „Options” для Nastran	105
4.2.10. Панелі розділу „Master Requests and Conditions”	105
4.2.11. Створення завдання для багатоваріантного аналізу	107
4.3. Процес розрахунку крайової задачі	107
4.4. Майстер створення моделі	108
Розділ 5. МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ	111
5.1. Моделювання крайової задачі стаціонарної теплопровідності	111
5.1.1. Завдання початкових умов крайової задачі теплопровідності	111
5.1.2. Завдання граничних умов крайової задачі стаціонарної теплопровідності	111
5.1.2.1. Величини для граничних умов крайової задачі теплопровідності	111
5.1.2.2. Завдання граничних умов першого роду	111
5.1.2.3. Завдання граничних умов у вигляді теплового джерела або стоку тепла	113
5.1.2.4. Завдання граничних умов за тепловим потоком	113
5.1.2.5. Завдання граничних умов конвекційного нагріву	113
5.1.2.5.1. Завдання граничних умов „вільного” конвекційного нагріву	113
5.1.2.5.2. Завдання граничних умов „примусового” конвекційного нагріву	114
5.1.2.6. Завдання граничних умов радіаційного нагріву	116
5.1.3. Запуск процесу розрахунку крайової задачі стаціонарної теплопровідності	117
5.2. Моделювання крайової задачі нестационарної теплопровідності	118
Розділ 6. МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ПРО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ТІЛ. СТАТИКА	120
6.1. Завдання початкових і граничних умов у FEMAP	120
6.1.1. Завдання початкових умов	120
6.1.2. Завдання граничних умов 1-го роду (закріплення, переміщення, зв'язків)	120
6.1.2.1. Створення власної системи координат	121
6.1.2.2. Завдання граничних умов 1-го роду у вигляді закріплення	121
6.1.2.3. Завдання граничних умов 1-го роду у вигляді переміщення або кутів обертання	123
6.1.2.4. Завдання граничних умов 1-го роду у вигляді зв'язків	123
6.1.2.5. Редагування або видалення граничних умов 1-го роду	124
6.1.2.6. Контроль закріплення тіла	124
6.1.3. Завдання силових граничних умов	125
6.1.3.1. Завдання об'ємних силових граничних умов	125
6.1.3.2. Завдання статичних лінійних силових граничних умов	125
6.1.3.3. Завдання силових граничних умов „болтового з'єднання”	125
6.1.3.4. Завдання силових граничних умов типу „нестислива рідина”	126
6.1.3.5. Завдання нелінійних силових граничних умов	127
6.2. Завдання опцій та параметрів нелінійного аналізу	128
6.3. Моделювання статичних крайових задач про НДС тіл	130
6.3.1. Крайові задачі лінійної пружності та термopужності	131
6.3.2. Крайові задачі нелінійної пружності для ізотропного матеріалу	131
6.3.3. Крайові задачі нелінійної пружності для матеріалу типу „гума”	132
6.3.4. Крайові задачі пружно-пластичності	133
6.3.5. Крайові задачі повзучості	134
6.3.6. Крайові задачі про пружну стійкість тіл	134
6.3.7. Крайові задачі про оптимізацію конструкції	136

6.4. Застосування модифікованого підходу Лагранжа для розв'язування крайових задач із всіма видами нелінійності	137
6.4.1. Опції діалогової панелі „NXSTRAT Solver Parameters”	138
6.4.2. Опції діалогової панелі „NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters”	139

Розділ 7. МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ПРО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТІЛ. ДИНАМІКА

7.1. Загальні відомості щодо моделювання динамічних крайових задач	142
7.2. Завдання загальних параметрів динамічних розрахунків	142
7.2.1. Діалогова панель „Load Set Options for Dynamic Analysis”	142
7.2.2. Про застосування граничних умов типу „нестислива рідина”	144
7.2.3. Роторний регіон	145
7.3. Моделювання динамічних крайових задач	145
7.3.1. Крайова задача про власні частоти та форми коливань	145
7.3.2. Крайова задача про перехідний процес при динамічному негармонійному навантаженні тіла	147
7.3.2.1. Метод прямого інтегрування, лінійна задача	147
7.3.2.2. Метод розкладання за власними частотами	148
7.3.2.3. Нелінійний перехідний процес	148
7.3.2.3.1. Нелінійний перехідний процес, малі деформації	148
7.3.2.3.2. Нелінійний перехідний процес, великі деформації	149
7.3.2.4. Спектральний відгук тіла при ударному навантаженні	149
7.3.2.5. Динамічні задачі при наявності гіроскопічних сил	150
7.3.2.6. Розрахунок повної реакції спектрального відгуку тіла	152
7.3.3. Крайова задача про вимушені гармонійні коливання тіла	152
7.3.4. Крайова задача про стохастичне збудження тіла	154
7.3.5. Модальний аналіз методом DDAM	156

Розділ 8. МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ПРО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТІЛ. КОНТАКТНІ ЗАДАЧІ

8.1. Формування зон контакту методом „вузол-вузол”	158
8.2. Формування зон контакту із застосуванням регіонів	159
8.2.1. Загальні відомості	159
8.2.2. Автоматичний та „ручний” варіанти формування зон контакту із застосуванням регіонів	159
8.2.3. Діалогова панель „Define Connection Property”	160
8.2.3.1. Вкладка „NX Linear” діалогової панелі „Define Connection Property”	160
8.2.3.2. Вкладка „NX Adv Nonlin” діалогової панелі „Define Connection Property”	162
8.2.3.3. Вкладка „NX Implicit” діалогової панелі „Define Connection Property”	163
8.2.4. Команди створення/редагування об'єктів контактної області	165
8.3. Додаткові пояснення про контактні алгоритми	166
8.4. Створення завдання для проведення розрахунку крайової контактної задачі	167

Розділ 9. ПЕРЕГЛЯД РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ІНШИХ ВВЕДЕНИХ ДАНИХ

9.1. Завантаження результатів розрахунків крайової задачі	168
9.1.1. Імпорт результатів розрахунків крайової задачі іншими програмами	168
9.1.2. Завантаження результатів розрахунків NX Nastran	169
9.2. Комбінування та редагування результатів розрахунків крайової задачі	169
9.3. Керування зображеннями на робочому полі FEMAP	173
9.3.1. Команди меню „Window” та „View”	173
9.3.2. Діалогова панель „View Options”	174
9.4. Перегляд функцій та результатів розрахунків крайової задачі	177

Додаток 1. ОБ'ЄКТИ СПИСКУ Option ДІАЛОГОВОЇ ПАНЕЛІ View Options	184
--	-----

Додаток 2. ЕЛЕМЕНТАРНІ ФУНКЦІЇ FEMAP (Function reference)	191
Додаток 3. БІБЛІОТЕКА СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ	194
Д3.1. Одновимірні скінченні елементи	194
Д3.1.1. Стрижневий елемент типу ROD	194
Д3.1.2. Елемент труби типу TUBE	194
Д3.1.3. Криволінійний елемент труби типу CURVED TUBE	194
Д3.1.4. Балкові елементи типу BAR, BEAM	194
Д3.1.5. Елемент криволінійної балки типу CURVED BEAM	195
Д3.1.6. Елемент типу LINK	196
Д3.1.7. Пружний елемент типу SPRING/DAMPER	196
Д3.1.8. Пружний елемент типу DOF SPRING	196
Д3.1.9. Контактний елемент типу GAP (зазор)	196
Д3.1.10. Графічний елемент типу PLOT ONLY	197
Д3.2. Двовимірні (плоскі) скінченні елементи	197
Д3.2.1. Елемент типу SHEAR PANEL (зсувна панель)	197
Д3.2.2. Елемент типу MEMBRANE (мембранний)	198
Д3.2.3. Елемент згину типу BENDING ONLY	198
Д3.2.4. Універсальний оболонковий елемент типу PLATE	198
Д3.2.5. Елемент типу LAMINATE (шаруватий)	198
Д3.2.6. Елемент типу PLANE STRAIN (що деформується плоско)	199
Д3.2.7. Вісесиметричний оболонковий елемент типу AXISYMMETRIC SHELL	199
Д3.2.8. Графічний елемент типу PLOT ONLY	199
Д3.3. Просторові (об'ємні, тривимірні) скінченні елементи	199
Д3.3.1. Вісесиметричний елемент типу AXISYMMETRIC	200
Д3.3.2. Об'ємний елемент типу SOLID	200
Д3.4. Інші скінченні елементи	201
Д3.4.1. Елемент типу MASS	201
Д3.4.2. Елемент типу MASS MATRIX	201
Д3.4.3. Елемент типу RIGID	201
Д3.4.4. Елемент типу STIFFNESS MATRIX	202
Д3.4.5. Контактний елемент типу SLIDE LINE	202
Д3.4.6. Елемент типу WELD	202
Д3.5. Примітки	202
Додаток 4. КРАЙОВІ ЗАДАЧІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ (теорія)	203
Д4.1. Постановка крайової задачі незв'язаної теплопровідності	203
Д4.2. Урахування температурної залежності характеристик матеріалу	204
Д4.3. Ослаблення постановки крайової задачі теплопровідності	204
Д4.4. Скінченно-елементне представлення крайової задачі теплопровідності	206
Д4.5. Алгоритм Ньютона-Рафсона розв'язування нелінійної САР крайової задачі стаціонарної теплопровідності	207
Д4.6. Алгоритм Ньюмарка розв'язування крайової задачі нестационарної теплопровідності	208
Додаток 5. КРАЙОВІ ЗАДАЧІ ПРО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТВЕРДИХ ТІЛ. СТАТИКА. МАЛІ ДЕФОРМАЦІЇ (теорія)	210
Д5.1. Основні рівняння механіки тіла, що деформується, у елементарному об'ємі тіла	210
Д5.1.1. Системи координат	210
Д5.1.2. Рівняння статичної рівноваги в елементарному об'ємі тіла	210
Д5.1.3. Геометричні співвідношення в елементарному об'ємі тіла	210
Д5.1.4. Рівняння фізичних моделей матеріалу в елементарному об'ємі тіла	211

Д5.1.4.1. Рівняння для визначення температурних деформацій	211
Д5.1.4.2. Рівняння для визначення лінійно-пружних деформацій	212
Д5.1.4.3. Рівняння для визначення нелінійно-пружних деформацій	213
Д5.1.4.4. Рівняння для визначення пружно-пластичних деформацій	215
Д5.1.4.5. Рівняння для визначення деформацій повзучості	216
Д5.1.5. Граничні умови	217
Д5.1.6. Варіаційна постановка статичної крайової задачі	217
Д5.2. Скінченно-елементне представлення крайових задач про НДС твердого тіла, що деформується. Малі деформації	217
Д5.2.1. Вектори переміщень, деформацій, напружень	217
Д5.2.2. Малі деформації	218
Д5.2.3. САР при малих деформаціях	219
Д5.3. Крайова задача про втрату стійкості твердого тіла, що деформується	219
Д5.3.1. Геометричні рівняння при значних деформаціях	220
Д5.3.2. САР при значних деформаціях і методи її розв'язування у NX Nastran	221
Д5.3.3. Крайова задача про втрату стійкості твердого тіла, що деформується	223
Д5.4. Алгоритм „двох кроків” одержання розв'язку у NX Nastran задачі для тіл з малою жорсткістю	224
Додаток 6. КРАЙОВІ ЗАДАЧІ ПРО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТВЕРДИХ ТІЛ. СТАТИКА. ВЕЛИКІ ДЕФОРМАЦІЇ (теорія)	225
Д6.1. Про класичні типи формулювань алгоритмів розв'язування геометрично нелінійних крайових задач	225
Д6.2. Основні визначення та співвідношення, необхідні для формулювання алгоритмів розв'язування геометрично нелінійних крайових задач	226
Д6.2.1. Системи координат. Метричний тензор	226
Д6.2.2. Тензор деформацій Гріна-Лагранжа	228
Д6.2.3. Про міри тензорів напружень	230
Д6.2.4. Співвідношення між компонентами першого та другого тензорів напружень Піола-Кірхгофа в початковій конфігурації	231
Д6.2.5. Символи Леві-Чівіта	231
Д6.2.6. Зміна елементарного об'єму при деформуванні	232
Д6.2.7. Слідство із закону збереження маси тіла	233
Д6.2.8. Формула Нансона	233
Д6.2.9. Співвідношення між компонентами першого і другого тензорів напружень Піола-Кірхгофа з компонентами тензора Ейлера-Коші	235
Д6.3. Принцип можливих переміщень в поточній конфігурації	236
Д6.3.1. Закони руху та рівноваги елементарного об'єму тіла	236
Д6.3.2. Принцип (початок) можливих переміщень (в поточній конфігурації)	237
Д6.4. Принцип можливих переміщень при TL-формулюванні	238
Д6.4.1. Вираз для роботи напружень на варіаціях переміщень у TL-формулюванні принципу можливих переміщень	238
Д6.4.2. Вираз для об'ємного інтеграла у TL-формулюванні принципу можливих переміщень	239
Д6.4.3. Вираз для поверхневого інтеграла у TL-формулюванні принципу можливих переміщень	240
Д6.4.4. Вираз принципу можливих переміщень при TL-формулюванні	241
Д6.5. Скінченно-елементне наближення крайових задач при TL-формулюванні та метод розв'язування системи алгебраїчних рівнянь	241
Д6.5.1. Скінченно-елементне наближення	241
Д6.5.2. Алгоритм розв'язування крайової задачі з урахуванням геометричної нелінійності на основі методу Ньютона-Рафсона	242

Д6.6. Основні положення UL-формулювання алгоритмів розв'язування геометрично нелінійних крайових задач	245
Д6.6.1. Розкладення матриці градієнта деформації Гріна на матриці розтягнення та обертальну (теорема про полярну декомпозицію)	245
Д6.6.2. Логарифмічні деформації Генкі (Hencky)	246
Д6.6.3. Подібності та особливості UL- та TL-формулювання алгоритмів розв'язування геометрично нелінійних крайових задач	247
Додаток 7. КРАЙОВІ ЗАДАЧІ ПРО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТВЕРДИХ ТІЛ. ДИНАМІКА (теорія)	248
Д7.1. Постановка крайової динамічної задачі термopружності	248
Д7.2. Скінченно-елементна апроксимація крайової динамічної задачі	248
Д7.3. Скінченно-елементне розв'язування крайових динамічних задач	249
Д7.3.1. Безпосереднє розв'язування динамічного рівняння	249
Д7.3.1.1. Метод Ньюмарка	249
Д7.3.1.2. Явний центрально-різницевий алгоритм	249
Д7.3.1.3. Розв'язок на першому часовому кроці	250
Д7.3.2. Задача про власні частоти та форми коливань	250
Д7.3.2.1. Розв'язування при відсутності демпфірування	251
Д7.3.2.2. Розв'язування при наявності демпфірування	251
Д7.3.3. Розв'язування динамічного рівняння із застосуванням методу розкладання розв'язку за власними формами коливань (модальний розв'язок)	252
Д7.3.4. Задача про стохастичне збудження тіла	252
Д7.4. Динамічна задача при наявності гіроскопічних сил	255
Додаток 8. КРАЙОВІ КОНТАКТНІ ЗАДАЧІ ПРО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТВЕРДИХ ТІЛ (теорія)	257
Д8.1. Особливості постановки крайових контактних задач про напружено-деформований стан тіл	257
Д8.2. Моделі коефіцієнта тертя Кулона	258
Д8.3. Моделі контакту	259
Додаток 9. СТРУКТУРОВАНІ ТА НЕСТРУКТУРОВАНІ ТИПИ ЗАДАЧ У NX Nastran 5.0	261
Додаток 10. ЗНАЧЕННЯ ОПЦІЇ „Diagnostics” ДІАЛОГОВОЇ ПАНЕЛІ „NASTRAN Executive and Solution Options”	262
Додаток 11. ХАРАКТЕРНІ ПОВІДОМЛЕННЯ NX Nastran 5.0	265
Додаток 12. ОСНОВНІ ВЕКТОРИ – РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ	268
ЗАВЕРШЕННЯ	271
ЛІТЕРАТУРА	273