

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до самостійної роботи
з вивчення дисципліни

«Математичне моделювання процесів
технічних систем»

для студентів спеціальності
131 «Прикладна механіка»
освітньої програми «Технології машинобудування»
галузі знань «Механічна інженерія»
всіх форм навчання

2019

Методичні рекомендації до самостійної роботи з вивчення дисципліни «Математичне моделювання процесів технічних систем» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» галузі знань «Механічна інженерія» всіх форм навчання / Укл. Н.В. Гончар, Д.М. Степанов – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 16 с.

Укладачі: Гончар Н.В., доцент, канд. техн. наук, доц. каф.ТМБ
Степанов Д.М., старш. викладач каф. ТМБ

Рецензент: Кононов В.В., доц., к.т.н.

Відповідальний за випуск: доц., к.т.н. Дядя С.І.

Затверджено
на засіданні кафедри ТМБ
протокол № 1
від 22.08.2019 р.

Рекомендовано до видання НМК
машинобудівного факультету
протокол № 1
від 03.09.2019 р.

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Мета і завдання дисципліни, її місце в навчальному процесі	5
1.1 Мета вивчення дисципліни	5
1.2 Завдання вивчення дисципліни	5
2 Робоча програма дисципліни	6
2.1 Назва та зміст тем дисципліни, методичні вказівки до їх вивчення	6
2.2 Перелік лабораторних занять та їх тривалість	10
2.3 Контрольні питання	10
3 Контрольні заходи з перевірки якості засвоєння навчального матеріалу дисципліни	12
4 Рекомендована література	14
4.1 Базова література	14
4.2 Допоміжна література	15
4.4 Інформаційні ресурси	15
4.3 Навчально-методична література	15

ВСТУП

Дисципліна «Математичне моделювання процесів технічних систем» необхідна для освоєння студентами наукового підходу до моделювання робочих процесів та експлуатаційних навантажень і розрахунків на міцність деталей на етапі проектування виробу, що забезпечує якісну підготовку фахівця-науковця за спеціальністю «Технологія машинобудування».

Термін, що передбачений робочим планом на аудиторні заняття з дисципліни, не дає можливості у необхідному обсязі викласти передбачений навчальний матеріал. Тому частина робочої навчальної програми дисципліни може не викладатися на аудиторних заняттях, що передбачає її самостійне вивчення. До того ж, і той матеріал, що викладається в аудиторії, теж повинен бути закріплений шляхом самостійної роботи студента.

Згідно діючого навчального плану викладання дисципліни здійснюється у 10-му семестрі загальною кількістю 120 годин (4 кредитів), в тому числі лекції – 14 годин, лабораторні заняття – 28 годин, індивідуальна самостійна робота студента – 78 годин. По закінченню семестру передбачено залік з дисципліни.

Мета методичних рекомендацій полягає в наступному:

- ознайомити студентів з повним обсягом навчального матеріалу з дисципліни, який він повинен засвоїти, в тому числі і з тією частиною, яка повністю виносить на самостійне вивчення;
- навести необхідну навчальну літературу по кожній тематиці дисципліни;
- надати методичні вказівки та контрольні питання для самоперевірки знань;
- ознайомити студентів з заходами контролю засвоєння навчального матеріалу в умовах кредитно-модульної системи організації навчального процесу.

1 МЕТА І ЗАВДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ, ЇЇ МІСЦЕ В НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ

1.1 Мета вивчення дисципліни

«Математичне моделювання процесів технічних систем» – інженерна дисципліна, мета якої є надання студентам цілісних знань та навичок щодо практичного використання чисельних методів розрахунку деталей машин з врахуванням умов експлуатації роботи за допомогою програмного пакету ANSYS.

1.2 Завдання вивчення дисципліни

Загальним завданням курсу є підготовка висококваліфікованих фахівців, що на сучасному рівні добре володіють методами забезпечення міцності надійності елементів конструкцій деталей машин, зокрема, з використанням методів кінцевих елементів.

Після вивчення курсу магістри повинні уміти:

- використовувати професійно-профільовані знання для математичного моделювання;
- розкласти вібраційний спектр частот конструкцій, визначити власні частоти коливань, уникати явища резонансу;
- раціонально спростувати складні конструкції до відносно простих моделей; створювати твердотільні моделі відповідних деталей, особливо складно-навантажених в процесі експлуатації, включаючи коливання та теплові навантаження;
- аналізувати отримані результати, розробляти рекомендації щодо критичних навантажень або недоліків конструкцій досліджуваних деталей.

Повинні знати:

- теоретичні основи розрахунку на міцність деталей машин чисельними методами;
- основи спадного та висхідного твердотільного моделювання;
- основи методу кінцевих елементів;
- основні моделі міцності надійності деталей машин;
- методи розрахунків на міцність основних елементів конструкцій деталей.

Перелік дисциплін, засвоєння яких є необхідним для вивчення дисципліни:

- вища математика;
- фізика;
- матеріалознавство;
- теоретична механіка;
- опір матеріалів;
- деталі машин;
- теорія механізмів і машин;
- комп'ютерне конструювання;
- комп'ютерне моделювання;
- твердотільне моделювання і основи інженерних розрахунків.

2 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

По кожній тематиці вказані години на лекційні заняття. Години на самостійну роботу студента при вивченні кожної теми надані у розділі 3.

2.1 Назва та зміст тем дисципліни, методичні вказівки до їх вивчення

2.1.1 Використання методів кінцевих елементів для розрахунку на міцність. Критерії надійності – 4 години

Сучасні підходи до аналізу конструкцій деталей на міцність, особливо деталей складної форми, складнонавантажених конструкцій, деталей надто великих або малих розмірів, конструкцій, що експлуатуються в особливих умовах. Основні етапи чисельного дослідження міцності деталей. Зміна конструкції деталі для зниження конструктивної концентрації напружень. Порівняльний аналіз подібних моделей, що відрізняються зміненою конструкцією елементів. Забезпечення прикладення до моделі навантажень, еквівалентних експлуатаційним.

Методичні вказівки

При розгляді цієї теми звернути увагу на можливості візуалізації результатів розрахунку (напруженого стану; деформованого стану) в ANSYS, на відмінності аналізу напружено-деформованого стану в залежності від мети проведення досліджень.

[4] с.92-96; [7] с.203-234; [8] с.7-35; [9] с.168-194

Питання для самоперевірки

1. Етапи аналізу конструкцій на міцність при різних підходах.
2. Поняття: надійність, міцність, довговічність, строк служби, коефіцієнт неруйнування, відмова.
3. Метод кінцевих елементів.
4. Можливості пакету ANSYS та його блоків.
5. Етапи міцностного аналізу в ANSYS. Отримання рішень в різних видах.
6. Коефіцієнт запасу міцності, його визначення і забезпечення.
7. Коефіцієнт концентрації напружень, теоретичний та ефективний. Чутливість матеріалів до концентрації напружень.
8. Моделі матеріалів. Їх різновиди.

2.1.2 Коливання. Гармонійні коливання. Модальний аналіз; визначення власних коливань конструкцій. Порівняння спрощених та повнорозмірних моделей деталей машин – 2 години

Явище резонансу в деталях відповідальних конструкцій на прикладі лопаток та дисків авіаційних двигунів. Руйнування деталей через недостатню втомну міцність (втомне руйнування). Види коливань. Спрощені моделі форми. Пошук конструктивних рішень для зміни частоти власних коливань і виводу їх значень з експлуатаційних діапазонів частот виробів або складальних одиниць. Перевірка впливу зміни розмірів в границях допусків (за кресленням) конструктивних елементів на зміну їх власних частот. Використання гармонійного аналізу для порівняння з результатами тензометрування деталей складних конструкцій перед випробуваннями на витривалість та отримання значень напружень в місцях, де за якихось причин неможливе закріплення тензодатчиків.

Методичні вказівки

При розгляді цієї теми звернути увагу на використання ANSYS для аналізу форм коливань, визначення власної частоти коливань конструкції.

[8] с.181-206

Питання для самоперевірки

1. Коливання, параметри коливання, види: періодичні, гармонійні, випадкові тощо.
2. Гармонійні коливання – період, амплітуда, максимальні та мінімальні напруження; види – віднульові, симетричні, несиметричні

тощо.

3. Модальний аналіз, його мета. Моді коливань. Власна частота конструкцій.

4. Явище резонансу, визначення причин, способи уникнення.

5. Тензометрування. Будування графічної залежності $\sigma = f(2A)$. Яким чином проводять математичне моделювання процесу тензометрування зразків в міцностному блоці пакету ANSYS.

6. Втомленість. Втомне руйнування. Втомна тріщина. «Живучість» матеріалів.

7. Опір втоменості. Границя витривалості. Довговічність.

8. Крива втоменості, її ліва та права частини. Етапи її отримання.

2.1.3 Використання методу кінцевих елементів для розрахунку теплових деформацій при складних схемах теплових навантажень – 4 години

Різні види прикладення термограничних умов: точкові, лінійні джерела тепла, теплові потоки, температура зовнішнього середовища, вихідна температура конструкцій, ізолювання тепла, ізотермічні поверхні в ANSYS. Розмірність величин, необхідних для теплового розрахунку; моделі матеріалів, в тому числі білінійні, які характерні для жароміцних сплавів. Два підходи до термоміцностного аналізу. Відмінність термічних кінцевих елементів в цих випадках. Аналіз отриманих результатів.

Методичні вказівки

При розгляді цієї теми звернути увагу на можливості візуалізації результатів, в тому числі за допомогою ліній рівня (ізотермічні лінії), а також у виді графіків та таблиць.

[4] с.194-268; [8] с.157-174; [9] с.226-234

Питання для самоперевірки

1. Поняття теплопередачі: конвекція, кондукція; теплопровідність, коефіцієнт теплового лінійного розширення.

2. Джерела тепла, тепловий потік, вплив зовнішнього середовища.

3. Ізолювання тепла, ізотермічні поверхні, властивості вакууму.

4. Відмінність кінцевих елементів, що використовують для теплового аналізу.

5. Візуалізація результатів розрахунку в ANSYS за допомогою отримання картинки розподілу температур в конструкціях, анімація.

6. Отримання результатів в графічній формі.
7. Два підходи до термоміцностного аналізу.
8. Етапи виконання термоміцностного аналізу кострукцій.

2.1.4 Прикладення теплових навантажень при проведенні міцностного та вібраційного аналізу – 4 години

Особливості теплового розрахунку відповідальних деталей, що несуть у виробі в умовах високих температур (або їх перепаду) складне навантаження, в тому числі і вібраційне, зокрема диски, вали, лопатки газотурбінних двигунів, що використовують для літальних апаратів та наземних енергоустановок. Аналіз термонапруженого стану таких деталей. Використання змішаного аналізу для порівняння з результатами тензометрування деталей, що будуть випробувані на втомленість при експлуатаційних температурах.

Методичні вказівки

При розгляді цієї теми звернути увагу на можливості виконання прикладних реальних завдань розрахунку деталей машин, особливо складнонавантажених, на етапі проектування або конструювання.

[9] с.242-276

Питання для самоперевірки

1. Аналіз термонапруженого стану деталей складної форми. Переваги пакета ANSYS.
2. Моделювання процесу випробувань зразків та деталей на втомленість при високих температурах, що проводять на спеціальних модифікованих ВЕДС з піччю.
3. Яким чином можна врахувати білінійність моделі матеріалу в умовах термічного навантаження при термоміцностних розрахунках.
4. Лінійні, білінійні, мультилінійні моделі матеріалів. Їх відмінності.
5. Яким чином для білінійної моделі матеріалу отримати залежність $\sigma = f(2A)$ для напружень до границі σ_T і після неї.
6. Лінійний і нелінійний тепловий аналіз.
7. Стаціонарний і нестаціонарний тепловий аналіз.
8. Етапи визначення часу повного прогрівання або охолодження деталі.

2.2 Перелік лабораторних занять та їх тривалість

2.2.1 Визначення критичного числа обертів диска компресора з урахуванням тиску газового потоку – 4 години

2.2.2 Моделювання процесу роботи лопатки компресора – 4 години

2.2.3 Дослідження коливань плоского зразка з концентратором напружень – 4 годин

2.2.4 Модальний аналіз лопатки компресора та її простої моделі – 4 години

2.2.5 Термічне навантаження деталей з нерівномірним прогрівом – 4 годин

2.2.6 Проведення міцностного аналізу деталей з додатковими термічними навантаженнями – 4 години

2.2.7 Проведення вібраційного аналізу деталей з додатковими термічними навантаженнями – 4 години

Методичні вказівки

При підготовці до виконання лабораторних занять слід користуватися методичними вказівками [23], а також звернутися до відповідних розділів робочої програми.

2.3 Контрольні питання

При підготовці до поточного та остаточного контролю знань студент може перевірити свою готовність, відповідаючи на нижченаведені питання, які охоплюють вузлові положення дисципліни «Математичне моделювання процесів технічних систем».

1. Порядок закріплення та навантаження вісесиметричних тіл обертання, типу дисків.

2. Поняття запасу міцності, послідовність його визначення в ANSYS.

3. Поняття концентрації напружень. Коефіцієнти концентрації напружень. Послідовність їх визначення в ANSYS.

4. Особливості напруженого стану дисків компресорів. Характерні точки. Небезпечні місця, в яких можливе зародження тріщин.

5. «Парасолькове» навантаження і деформація дисків.

6. Засоби забезпечення достатньої точності розрахунку напружено-деформованого стану деталей ГТД у місцях концентрації напружень.

7. Яким чином перерахувати частоту обертів з відомої розмірності об/хв або об/с в необхідну в ANSYS окружну швидкість в рад/с.
8. Критичні частоти обертання дисків.
9. Номінальні частоти обертання дисків.
10. Коефіцієнт запасу міцності. Послідовність його визначення в ANSYS.
11. Послідовність завдання кутової швидкості обертання.
12. Закономірності розподілу компонент напруженого стану при комплексному навантаженні. Їх особливості.
13. Поняття критичної частоти обертання ротора ГТД за критерієм міцності пера лопаток компресора. Способи визначення і чинники, що на неї впливають.
14. Конструктивні концентратори напружень в лопатках компресора і методи зниження величини концентрації напружень.
15. Забезпечення еквівалентних початкових і граничних умов для консольно закріплених балок.
16. Методи досягнення найліпшої топології для створення регулярної сітки кінцевих елементів.
17. Моделювання процесу тарирування зразків.
18. Модальний аналіз, його мета.
19. Гармонійний аналіз, мета його проведення.
20. Визначення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень.
21. Ефективний коефіцієнт концентрації напружень, його визначення для плоских лабораторних зразків з концентраторами напружень.
22. Прийняті спрощення геометрії деталей.
23. Завдання властивостей матеріалу моделі деталі.
24. Типи елементів, які вживаються при модальному аналізі моделей лопатки.
25. Особливості визначення граничних умов.
26. Анімація одержаних модальних коливань моделей деталей машин.
27. Оцінка результатів модального аналізу.
28. Етапи аналізу конструкцій на міцність при різних підходах.
29. Поняття: надійність, міцність, довговічність, строк служби, коефіцієнт неруйнування, відмова.
30. Можливості пакету ANSYS та його блоків.
31. Етапи міцностного аналізу в ANSYS. Отримання рішень в різних видах.

32. Коефіцієнт запасу міцності, його визначення і забезпечення.

33. Коефіцієнт концентрації напружень, теоретичний та ефективний. Чутливість матеріалів до концентрації напружень.

34. Моделі матеріалів. Їх різновиди.

35. Теплопередача: конвекція, кондукція; теплопровідність, коефіцієнт теплового лінійного розширення.

36. Джерела тепла, тепловий потік, вплив зовнішнього середовища.

З КОНТРОЛЬНІ ЗАХОДИ З ПЕРЕВІРКИ ЯКОСТІ ЗАСВОЄННЯ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ ДИСЦИПЛІНИ

На підставі робочої програми дисципліни та вимог кредитно-модульної системи організації навчального процесу кафедра розробляє контрольні заходи з перевірки якості засвоєння студентом навчального матеріалу дисципліни.

Контрольні заходи з дисципліни «Математичне моделювання процесів технічних систем» передбачають наступні кваліфікаційні завдання:

- опитування за окремими темами лекційного курсу;
- виконання та захист звітів лабораторних занять;
- складання заліку.

Склад, обсяг і терміни виконання змістових модулів, на які підрозділяється робоча програма дисципліни, надані у таблиці 3.1.

У десятому семестрі планується проведення підсумкового модульного залікового контролю.

Для закріплення поточних знань на протязі семестру, до проведення підсумкового модульного контролю, проводяться контрольні заходи (письмове опитування студентів за матеріалами лекцій, що були прочитані), на підставі яких студент отримує попередню оцінку. Слід зазначити всі заходи, що плануються, повинні бути складені позитивно. Негативна оцінка з будь якого контрольного заходу свідчить про незасвоєння студентом навчального матеріалу.

Студент, який отримав на модульному контролі незадовільну оцінку або не з'явився на нього, має можливість повторного складання протягом одного-двох тижнів.

Таблиця 3.1- Структура навчальної дисципліни

Модулі (блоки змістових модулів)	Найменування змістових модулів дисципліни	Розподіл навчального часу за елементами модуля (видами занять), години				Номер лабораторного заняття	Обсяг навантаження студента	
		Лекції	Практичні роботи	Лабораторні заняття	Самостійна робота		Годин	Кредитів
Блоки змістових модулів, що виносяться на перший модульний контроль								
1	Використання методів кінцевих елементів для розрахунку на міцність. Критерії надійності	4	–	6	20	№1, 2	30	1
2	Коливання. Гармонійні коливання. Модальний аналіз; визначення власних коливань конструкцій. Порівняння спрощених та повнорозмірних моделей деталей	2	–	8	20	№3, 4	30	1
	Всього	6	–	14	40		60	2
Термін I-го підсумкового контролю – 7-й тиждень X семестру								
Блоки змістових модулів, що виносяться на другий модульний контроль								
3	Використання методу кінцевих елементів для розрахунку теплових деформацій при складних схемах теплових навантажень	4	–	6	20	№5	30	1
4	Прикладення теплових навантажень при проведенні міцностного та вібраційного аналізу	4	–	8	18	№6, 7	30	1
	Всього	8	–	14	38		60	2
Термін II-го підсумкового контролю – 14-й тиждень X семестру								
Загальна кількість		14	–	28	78		120	4

Студент, який одержав за результатами модульного контролю позитивні оцінки, виконав всі завдання, що передбачені робочим навчальним планом дисципліни, отримує позитивну оцінку.

4 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Надається частковий перелік навчальної та довідникової літератури, що рекомендується при вивченні дисципліни «Математичне моделювання процесів технічних систем». Слід мати на увазі, що джерела, які можуть бути використані, не обмежуються тільки цим переліком.

4.1 Базова література

1. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник. Под общ. ред. В.И. Мяченкова / М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.

2. Галлагер Р. Метод конечных элементов: Основы / Перевод с англ. – М.: Мир, 1984. – 215 с.

3. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.

4. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения / М.: Наука, 1980. – 256 с.

5. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике / М.: Мир, 1975. – 541 с.

6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов/М.: Мир, 1979.– 392с.

7. Басов К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.

8. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / М.:Компьютер Пресс, 2002.– 224с.

9. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие / М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.

10. Конюхов А.В. Основы анализа конструкций в системе ANSYS / Казань: КГУ, 2001. – 101 с.

11. Югов В.П. Решение задач теплообмена в ANSYS / М.: Техноинжинеринг, 2001. – 110 с.

12. Басов К. А. ANSYS для конструкторов. – М.: ДМК Пресс, 2009. – С. 248.

4.2 Допоміжна література

13. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопrotивление материалов / М.: Наука, 1986. – 560 с.

14. Маслов Л.Б. Численные методы для решения задач теории упругости: Методическое пособие / Иваново: ИГЭУ, 1999. – 28с.

15. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов / Перевод с англ. – М.: Мир, 1981. – 304 с.

16. Самарский А.А. Введение в численные методы / М.: Наука, 1987. – 459 с.

17. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / М.: Машиностроение, 1981. – 550 с.

18. Механическое поведение металлов при различных видах нагружения. Справочник / В.Т.Трощенко, А.А.Лебедев, В.А.Стрижало и др. / К.:Логос, 2000.– 571 с.

19. Трощенко В.Т. и др. Сопrotивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие в 2-х т. / К.: Наукова думка, 1993. –Т.1. – 285 с.

20. Гребенников А.Г., Светличный С.П., Король В.Н., Анпилов В.Н. Анализ НДС авиационных конструкций с помощью системы ANSYS, КНК, 2002. – 433 с.

4.3 Інформаційні ресурси

21. Офіційний сайт ANSYS. Електронний ресурс: www.ansys.com.

22. Руководство по основным методам проведения анализа в программе ANSYS. Справочное руководство. Електронний ресурс: www.femdoc.by.ru, 2004. – 512 с.

4.4 Навчально-методична література

23. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Математичне моделювання процесів технічних систем» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої про-

грами «Технології машинобудування» галузі знань «Механічна інженерія» всіх форм навчання / Укл.: Гончар Н.В., Степанов Д.М. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 27 с.

24. Файли з розширенням *.avi для ознайомлення з можливостями рішення складних завдань на міцність за допомогою пакету ANSYS.