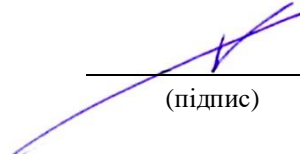


Міністерство освіти і науки України  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Кафедра Конструкції авіаційних двигунів (№ 203)

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми



(підпис)

Павло ГАКАЛ

(ім'я та прізвище)

« 30 » 08 2024 р.

### РОБОЧА ПРОГРАМА *ОБОВ'ЯЗКОВОЇ* НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

#### КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ СИСТЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ (КП)

(назва навчальної дисципліни)

**Галузь знань:**

14 «Електрична інженерія»

(шифр і найменування галузі знань)

**Спеціальність:**

144 «Теплоенергетика»

(код і найменування спеціальності)

**Освітня програма:**

Інжиніринг та експлуатація теплоенергетичних систем

(найменування освітньої програми)

**Форма навчання: денна**

**Рівень вищої освіти:**

Другий (магістерський)

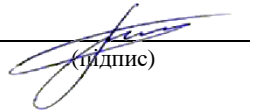
(рівень освіти)

**Харків 2024**

Розробник

ст. викл. Євген МАРЦЕНЮК

(посада, науковий ступінь і вчене звання, ім'я та прізвище)

  
(підпис)

Робочу програму розглянуто на засіданні кафедри

(№ 203 )Конструкції авіаційних двигунів

(назва кафедри)

Протокол № 1 від « 30 » серпня 2024.

Завідувач кафедри

д.т.н, професор

(науковий ступінь і вчене звання)

(підпис)

Сергій ЄПІФАНОВ

(ім'я та прізвище)

## 1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, спеціальність, освітня програма, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни (денна форма навчання)
Кількість кредитів – 2	<p><b>Галузь знань:</b> <u>14 «Електрична інженерія»</u> (шифр і найменування)</p> <p><b>Спеціальність:</b> <u>144 «Теплоенергетика»</u> (код і найменування)</p> <p><b>Освітня програма:</b> <u>Інжиніринг та експлуатація теплоенергетичних систем</u> (найменування)</p> <p><b>Рівень вищої освіти:</b> <u>другий (магістерський)</u></p>	Обов'язкова
Кількість модулів – 1		<b>Навчальний рік</b> 2024 / 2025
Кількість змістових модулів – 1		<b>Семестр</b> <u>1</u> -й
<b>Індивідуальне завдання:</b> <b>Курсовий проєкт:</b> <u>«Розрахунок термо-напруженого стану диска турбіни»</u> (назва)		<b>Лекції</b> * -
<b>Загальна кількість годин – 32*/60</b>		<b>Практичні, семінарські</b> * 32 год.
<b>Кількість тижневих годин для денної форми навчання:</b> аудиторних – 2 самостійної роботи студента – 1,75		<b>Лабораторні</b> * - <b>Самостійна робота</b> 28 год. <b>Вид контролю</b> диф. залік

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить 32 / 28

\* Аудиторне навантаження може бути зменшене або збільшене на одну годину в залежності від розкладу занять.

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Мета:** придбання знань та умінь, необхідних для виконання інженерних розрахунків основних деталей авіаційного газотурбінного двигуна в програмному пакеті ANSYS.

**Завдання:** вивчення особливостей виконання інженерних розрахунків в програмному комплексі ANSYS.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких **компетентностей:**

### **Загальні компетентності:**

*ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу.*

*ЗК3. Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми.*

### **Спеціальні (фахові) компетентності:**

*СК1. Здатність застосовувати та удосконалювати математичні та комп'ютерні моделі, наукові і технічні методи та сучасне комп'ютерне програмне забезпечення для розв'язання складних інженерних задач в теплоенергетиці.*

*СК13. Здатність аналізувати тепловий та теплонапружений стан деталей поршневих, газотурбінних двигунів та іншого енергетичного обладнання.*

### **Програмні результати навчання:**

*РПН2. Аналізувати і обирати ефективні аналітичні, розрахункові та експериментальні методи розв'язання складних задач теплоенергетики.*

*ПРН4. Відшуковувати необхідну інформацію з різних джерел, оцінювати, обробляти та аналізувати цю інформацію.*

*ПНР25. Аналізувати умови функціонування теплонапружених деталей, тепловий стан та термоміцність деталей в різних умовах функціонування.*

**Пре-реквізити:** Вища математика, Фізика, Теоретична механіка, Термодинаміка і теплообмін.

**Ко-реквізити:** Моделювання та розрахунок процесів в енергетичних системах.

## 3. Програма навчальної дисципліни

### Модуль 1

#### Змістовий модуль 1

#### ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ АД ТА ЕУ

##### *Курсовий проєкт*

Курсовий проєкт є самостійною роботою студента. Для керівництва, контролю та допомоги студенту призначається керівник курсового проєкту з числа викладачів.

Курсовий проєкт містить у собі створення розрахункової моделі диска турбіни високого тиску та його оточення, визначення граничних умов теплообміну, розрахунки теплового, напружено-деформованого та термонапруженого стану диска.

За бажанням студента та за згодою викладача завдання на курсовий проєкт може бути змінено у разі його відповідності до загального змісту даної дисципліни та збереженні обсягу й складності роботи.

##### *Зміст курсового проєкту – базове завдання*

Числові методи в розрахунках на міцність.

Аналіз конструкції турбіни високого тиску (ТВТ) авіаційного газотурбінного двигуна.

Створення геометричної моделі диска ТВТ та його оточення.

Призначення матеріалу диска, визначення його фізичних властивостей.

Аналіз узагальненого польотного циклу двигуна-прототипу.

Визначення граничних умов теплообміну.

Розрахунок теплового стану диска ТВТ: стаціонарний і нестаціонарний аналізи.

Розрахунок напружено-деформованого стану диска ТВТ.

Розрахунок термонапруженого стану диска ТВТ: стаціонарний і нестаціонарний аналізи.

#### 4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	денна форма				
	усього	у тому числі			
л		п	лаб	с.р.	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<b>Модуль 1</b>					
<b>Змістовий модуль 2 (ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ АД ТА ЕУ)</b>					
<b>Індивідуальне завдання</b>					
<b>Курсовий проєкт на тему: “Розрахунок термонапруженого стану диска турбіни високого тиску”</b>	<b>58</b>	-	<b>30</b>	-	<b>28</b>
<b>Контрольний захід</b>	2	-	2	-	-
<b>Разом за змістовим модулем 2</b>	<b>60</b>	-	<b>24</b>	-	<b>28</b>
<b>Усього годин</b>	<b>60</b>	-	<b>32</b>	-	<b>28</b>

#### 5. Темі практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
<b>Модуль 1</b>		
<b>Змістовий модуль 2 (ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ АД ТА ЕУ)</b>		
8	Аналіз конструкції турбіни високого тиску (ТВТ) авіаційного газотурбінного двигуна та узагальненого польотного циклу двигуна-прототипа. Створення геометричної моделі диска ТВТ та його оточення.	4
9	Призначення матеріалу диска, визначення його фізичних властивостей.	2
10	Визначення граничних умов теплообміну на всіх режимах роботи двигуна відповідно до узагальненого польотного циклу.	8
11	Розрахунок теплового стану диска ТВТ: стаціонарний та нестаціонарний аналізи.	8
12	Розрахунок термонапруженого стану диска ТВТ: стаціонарний та нестаціонарний аналізи.	8
	Контрольний захід	2
	<b>Разом</b>	<b>32</b>

#### 6. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
<b>Модуль 1</b>		
<b>Змістовий модуль 2 (ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ АД ТА ЕУ)</b>		
6	Виконання курсового проєкту	28
	<b>Разом</b>	<b>28</b>

## 7. Індивідуальне завдання

1. **Курсовий проєкт на тему:** «Розрахунок термонапруженого стану диска турбіни високого тиску газотурбінного двигуна».

Розділи роботи:

1. Аналіз конструкції турбіни високого тиску (ТВТ) авіаційного газотурбінного двигуна та узагальненого польотного циклу двигуна-прототипа.
2. Створення геометричної моделі диска ТВТ та його оточення.
3. Призначення матеріалу диска, визначення його фізичних властивостей.
4. Визначення граничних умов теплообміну на всіх режимах роботи двигуна відповідно до узагальненого польотного циклу.
5. Розрахунок теплового стану диска ТВТ: стаціонарний та нестаціонарний аналізи.
6. Розрахунок напружено-деформованого стану диска ТВТ.
7. Розрахунок термонапруженого стану диска ТВТ: стаціонарний та нестаціонарний аналізи.
8. Складання розрахунково-пояснювальної записки.

## 8. Методи навчання

*Основні форми навчання:*

- практичні роботи;
- курсовий проєкт;
- самостійна робота студента;
- залік.

Проведення практичних занять базується на індивідуальному виконанні студентами розрахунків теплового, напружено-деформованого й термонапруженого стану для деталей газотурбінних двигунів з подальшим аналізом і поясненням отриманих результатів.

Основною формою навчання є самостійна робота. До неї не можна приступати без певного багажу знань, які даються на лекції. Під час самостійної роботи студенти виконують курсовий проєкт.

## 9. Методи контролю

### 9.1. Тестування

Матеріал дисципліни складається з одного змістового модулю - Курсовий проєкт на тему: «Розрахунок термонапруженого стану диска турбіни високого тиску».

**Складання модуля – на 16-му тижні 1-го семестру (один раз).**

До складання модуля студент допускається за умови виконання всіх видів обов'язкових робіт, передбачених у модулі.

Строк захисту курсового проєкту – 16-й тиждень. Затримка захисту курсового проєкту на тиждень – мінус 2 бали, на 2 тижні – мінус 4 бали.

Семестр – *диференційний залік.*

### 9.2. Питання для контролю та самостійної роботи студентів

#### Модуль 1

#### Змістовий модуль 1

1. Спрощення геометрії під час створення розрахункових моделей.
2. Можливі припущення у тепловому та міцнісному аналізі дисків компресорів і турбін, лопаток турбін.
3. Особливості побудови розрахункової моделі тіла обертання у тривимірній

постановці: типи елементів, геометрія, орієнтація відносно системи координат.

4. Особливості побудови розрахункової моделі тіла обертання у пласкій постановці: типи елементів, геометрія, орієнтація відносно системи координат.

5. Особливості побудови та підготовки розрахункової моделі тіла обертання у циклосиметричній постановці: типи елементів, геометрія, орієнтація відносно системи координат.

6. Від'ємності умов кріплення для різних типів розрахункових моделей тіл обертання (на прикладі диска).

7. Типи граничних умов для виконання теплового аналізу конструкції. Чим зумовлений вибір запропонованого типу?

8. Основні залежності для розрахунку граничних умов у тепловому аналізі конструкції (на прикладі диска або лопатки турбіни).

9. Тип елементів, що застосовують для пласкій моделі у тепловому та міцнісному аналізах конструкції.

10. Призначення залежності фізичних властивостей матеріалу від температури у програмному комплексі ANSYS – як програма розуміє та використовує подібну залежність?

11. Зв'язок умов навантаження деталей ГТД з узагальненим польотним циклом у програмному комплексі ANSYS.

12. Особливості підготовки та виконання розрахунку теплового стану конструкції у стаціонарній постановці.

13. Особливості підготовки та виконання розрахунку теплового стану конструкції у нестационарній постановці.

14. Особливості підготовки та проведення розрахунку термонапруженого стану конструкції у стаціонарній постановці.

15. Можливі способи визначення термонапруженого стану конструкції у нестационарній постановці.

## 10. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

### 10.1. Розподіл балів, які отримують студенти (кількісні критерії оцінювання)

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)	Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів
<b>Модуль 1</b>			
<b>Змістовний модуль 1</b>			
Виконання і захист лабораторних (практичних) робіт	0,5...1	16	8...16
Модульний контроль	28...44	1	28...44
Виконання і захист КП	24...40	1	24...40
<b>Усього за семестр 1</b>			<b>60...100</b>

Семестровий контроль (диференційний залік) проводиться у разі відмови студента від балів поточного тестування й за наявності допуску. Допуск до заліку надається за умови виконання та успішного захисту курсового проекту.

Під час складання семестрового заліку студент має можливість отримати максимум 100 балів.

Білет для заліку складається з трьох теоретичних запитань та одного практичного завдання. Питання по білетах розподілені таким чином:

## 10.2. Розподіл питань у білетах заліку

Семестр	1-й
Тип контролю	Диференційний залік
Теоретичні питання ( <i>перше, друге, третє</i> )	Змістовий модуль 2
Четверте питання	Тематика курсового проекту

Курсовий проект стосується аналізу термонапруженого стану диска турбіни в умовах польотного циклу і надається у вигляді полів температури та напруження у перетині диску, а також у вигляді графіків зміни температури та напруження у критичних точках диску під час польоту. Наведені результати необхідно проаналізувати та сформулювати пропозиції щодо поліпшення термонапруженого стану конструкції.

Максимальна кількість балів за кожне теоретичне питання – 20, за практичне завдання – 40.

## 10.3. Якісні критерії оцінювання

Для одержання позитивної оцінки студент повинен

### знати:

- основи методу кінцевих елементів;
- рекомендації щодо побудови якісної сітки кінцевих елементів;
- основні правила обмеження ступенів свободи та/або навантаження розрахункової моделі;
- принципи та порядок виконання різних типів інженерних розрахунків методом кінцевих елементів в програмному пакеті ANSYS;

### вміти:

- створювати розрахункові моделі деталей і вузлів АД та ЕУ на базі балочних, оболонкових, тримірних елементів або їх комбінації для виконання інженерних розрахунків у програмному пакеті ANSYS;
- виконувати розрахунки двовимірної та тривимірної температурної та напруженого стану деталей із використанням відповідних програмних засобів;
- проводити частотний аналіз конструкції та аналіз на втрату стійкості;
- виконувати критичний аналіз отриманих результатів щодо їх достовірності, тобто теорії або реального фізичного експерименту;
- самостійно визначати в складній конструкції зони «інтересу» для проведення подальшого аналізу відповідно до поставленої задачі;
- виконувати порівняльну оцінку існуючих конструкцій, пропонувати шляхи їх вдосконалення за результатами виконаних розрахунків.

## 10.4. Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру

**Задовільно (60-74).** Мати необхідний мінімум знань та умінь. Відпрацювати та захистити всі практичні заняття. Виконати та захистити індивідуальне завдання (курсний проект). Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати, які типи інженерних задач можуть бути вирішені програмними продуктами на базі методу кінцевих елементів. Знати основну ідею методу кінцевих елементів. Розуміти різницю між елементами та вузлами. Орієнтуватися у інтерфейсі програмного продукту ANSYS та вміти пояснити, для чого призначені різні вікна та різні процесори програми. Бути спроможним виконувати прості міцнісні та теплові розрахунки окремих деталей типу балка або пластина за допомогою рекомендацій з навчальних посібників.

**Добре (75-89).** Твердо опанувати мінімум знань та умінь. Відпрацювати та захистити всі практичні заняття. Виконати та добре захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати хто або що сприяв розвиненню методу кінцевих елементів. Знати чим відрізняються елементи першого та другого порядків. Вміти самостійно налагоджувати прості моделі (типу балки, пластини тощо) до виконання усіх типів стаціонарних розрахунків, розглянутих у змістових модулях. Бути спроможним надавати оцінку вірності отриманих результатів – чи не протирічають вони теорії. Знати, що призводить до появи помилок у результатах розрахунків та розуміти їхнє чисельне співвідношення.



**Відмінно (90-100).** Відпрацювати та захистити всі лабораторні та практичні роботи. Виконати та добре або відмінно захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з відмінною оцінкою (припускається здати один з двох модулів з оцінкою «добре» і кількістю балів не менше 80). Повно знати основний та додатковий матеріал. Вміти робити вибір між елементами першого та другого порядків в залежності від отриманої задачі. Вміти самостійно налагоджувати складні моделі, у тому числі і складових вузлів з декількох окремих деталей, до виконання усіх типів стаціонарних та нестаціонарних розрахунків, розглянутих у змістових модулях. Розуміти різницю між окремими типами контактних граничних умов і вміти налагоджувати їх властивості. Вміти пояснювати та аналізувати отримані результати, розрізняти у них механічні та методологічні помилки підготовки розрахункової моделі. Пояснювати фізику симульованих процесів та пропонувати заходи з оптимізації моделі щодо її «полегшення», тобто зменшення часу на підготовку та розрахункового часу, а також щодо підвищення точності результатів симулювання.

### Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка за національною шкалою	
	Для іспиту	Для заліку
90-100	Відмінно	Зараховано
75-89	Добре	
60-74	Задовільно	
01-59	Незадовільно	Не зараховано

## 11. Методичне забезпечення

1. <https://mentor.khai.edu/course/view.php?id=1171>.
2. Моделювання нестаціонарного термонапруженого стану елементів ГТД [Текст] : навч. посіб: до курс. та дипл. проектування / Є. В. Марценюк. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2022. – 88 с. ([http://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Marcenuk\\_Modeluvanna.pdf](http://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Marcenuk_Modeluvanna.pdf)).

## 12. Рекомендована література

### Базова

1. ANSYS Mechanical User's Guide

### Допоміжна

2. Опір матеріалів: підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський [та інші]. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К. : Вища шк., 2004. – 655 с.

## 13. Інформаційні ресурси

1. Розрахункові та контрольні програми ПЕОМ: ANSYS STUDENT (<https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>).
2. Файли та інтернет ресурси довідкової системі програмного комплексу ANSYS.