

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)

Олег КИСЛОВ
(ім'я та прізвище)

« 30 » 08 2023 р.

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

***КОНСТРУКЦІЯ ТА МІЦНІСТЬ
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ТА УСТАНОВОК***

(назва навчальної дисципліни)

Галузь знань

14 «Електрична інженерія»

(шифр і найменування галузі знань)

Спеціальність

142 «Енергетичне машинобудування»

(код та найменування спеціальності)

Освітня програма

Газотурбінні установки і компресорні станції

(найменування освітньої програми)

Форма навчання: денна

Рівень вищої освіти:

перший (бакалаврський)

Харків 2023 рік

Розробник Юрій ГУСЄВ, професор каф. 203, к.т.н., доц.
(ім'я та прізвище, посада, науковий ступінь і вчене звання)


(підпис)

Робочу програму розглянуто на засіданні кафедри
Конструкції авіаційних двигунів (№ 203)
(назва кафедри)

Протокол № 1 від « 28 » серпня 2023 р.

Завідувач каф. 203 д.т.н., професор
(науковий ступінь і вчене звання)


(підпис)

Сергій ЄПІФАНОВ
(ім'я та прізвище)

1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показника	Галузь знань, спеціальність, освітня програма, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни (денна форма навчання)	
Кількість кредитів – 6	Галузь знань <u>14 «Електрична інженерія»</u> (шифр і найменування)	Обов'язкова	
Кількість модулів – 3		Навчальний рік	
Кількість змістовних модулів – 3	Спеціальність <u>142 «Енергетичне машинобудування»</u> (код і найменування)	2023/2024	
Індивідуальне завдання <i>Розрахункова робота на тему: «Розрахувати на міцність лопатку компресора авіаційного газотурбінного двигуна»</i> (назва)		Семестр	
Загальна кількість годин – 88* / 180	Освітня програма <u>Газотурбінні установки і компресорні станції</u> (найменування)	4-й	6-й
		Групи	
Кількість тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 5,5 самостійної роботи здобувача – 5,75	Рівень вищої освіти <u>перший (бакалаврський)</u>	221ст	231
		Лекції*	
		48 год.	
		Практичні, семінарські*	
		32 год.	
		Лабораторні*	
8 год.			
Самостійна робота		92 год.	
Вид контролю		модульний контроль, іспит	

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить: – 88 / 92

* Аудиторне навантаження може бути зменшене або збільшене на одну годину залежно від розкладу занять.

Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета: теоретично і практично підготувати майбутніх фахівців до аналізу конструкцій газотурбінних двигунів та установок та міцності і стійкості їх елементів.

Завдання: вивчення сучасних конструкцій газотурбінних двигунів та установок та методів розрахунку міцності та стійкості їх елементів.

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

Загальні компетентності: ЗК3. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. ЗК4. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності; ЗК8. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями; ЗК9. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел; ЗК10. Здатність працювати в команді; ЗК11. Навички міжособистісної взаємодії; ЗК14. Навички здійснення безпечної діяльності; ЗК15. Здатність забезпечувати якість виконуваних робіт.

Спеціальні (фахові) компетентності: ФК2. Здатність застосовувати свої знання і розуміння для визначення, формулювання і вирішення інженерних завдань з використанням теоретичних і експериментальних методів дослідження процесів в газотурбінних установках та енергетичному обладнанні компресорних станцій; ФК3. Здатність аналізувати інформацію з літературних джерел, здійснювати патентний пошук, а також використовувати бази даних та інші джерела інформації для здійснення професійної діяльності. ФК6. Здатність вибирати основні й допоміжні матеріали та способи реалізації основних теплотехнологічних процесів при створенні газотурбінної техніки і енергетичного обладнання компресорних станцій та застосовувати прогресивні методи експлуатації газотурбінної техніки і енергетичного обладнання компресорних станцій для транспортування природного газу. ФК7. Здатність брати участь у роботах з розробки і впровадження теплотехнологічних процесів при проектуванні газотурбінної техніки та енергетичного обладнання компресорних станцій, перевіряти якість монтажу й налагодження при випробуваннях і здачі в експлуатацію нових газотурбінних установок та енергетичного обладнання компресорних станцій; ФК8. Здатність визначати режими експлуатації газотурбінних установок та енергетичного обладнання компресорних станцій і застосовувати способи раціонального використання сировинних, енергетичних та інших видів ресурсів

Програмні результати навчання: ПРН 1. Демонструвати знання і розуміння математики, фізики, технічної термодинаміки, гідрогазодинаміки, теорій лопаткових машин, газотурбінних двигунів і тепломасообміну, технічної механіки, конструкційних матеріалів, систем автоматизованого проектування енергетичних машин на рівні, необхідному для досягнення результатів освітньої програми. ПРН 2. Демонструвати знання і розуміння інженерних наук на рівні, необхідному для досягнення головних результатів освітньої програми, в тому числі певна обізнаність в останніх досягненнях. ПРН 4. Застосовувати процеси, системи, обладнання, інженерні технології відповідно до потреб газотурбобудування та машинобудування енергетичного обладнання компресорних станцій; обирати і застосовувати придатні типові розрахункові та експериментальні методи; правильно інтерпретувати результати досліджень. ПРН 5. Виявляти, формулювати і вирішувати інженерні завдання відповідно до потреб газотурбобудування та машинобудування енергетичного обладнання компресорних станцій; розуміти важливість нетехнічних (суспільство, здоров'я і безпека, навколишнє середовище, економіка і промисловість) обмежень. ПРН 6. Розробляти і проектувати газотурбінні установки та енергетичне обладнання компресорних станцій, що задовольняють конкретним вимогам, які можуть включати обізнаність про нетехнічні (суспільство, здоров'я і безпека, навколишнє середовище, економіка і промисловість) аспекти; обрання і застосовування адекватної методології проектування. ПРН 7. Застосувати сучасні комерційні та авторські програмні продукти при проектуванні об'єктів газотурбобудування та

енергетичного машинобудування. ПРН 9. Застосовувати нормативні документи і правила техніки безпеки при вирішенні професійних завдань. ПРН 10. Планувати і виконувати експериментальні дослідження за допомогою інструментальних засобів (вимірювальних приладів), оцінювати похибки проведення досліджень, робити висновки. ПРН 11. Виявляти розуміння методик проектування і досліджень в галузі газотурбобудування та машинобудування енергетичного обладнання компресорних станцій, а також їх обмежень. ПРН13. Використовувати обладнання, матеріали та інструменти, інженерні технології і процеси при вирішенні професійних завдань в галузі газотурбобудування та машинобудування енергетичного обладнання компресорних станцій з урахуванням наявності обмежень та розумінням їх природи. ПРН 14. Застосовувати норми інженерної практики у сфері газотурбобудування та машинобудування енергетичного обладнання компресорних станцій. ПРН 20. Засвоїти розуміння необхідності самостійного навчання протягом життя. ПРН 21. Виявляти здатність аналізувати розвиток науки і техніки.

Пререквізити: інженерне матеріалознавство, вища математика, теоретична механіка, механіка матеріалів та конструкцій, технології конструкційних матеріалів, теорія газотурбінних двигунів і установок, теорія та розрахунок лопатевих машин, газотурбінні установки, компресорні станції та газотранспортні мережі, нагнітачі природнього газу, теплообмінне обладнання в енергетиці та газовій галузі, технологія газотурбобудування.

Кореквізити: деталі машин, технологія двигунобудування.

3. Зміст навчальної дисципліни

Модуль 1

Змістовий модуль № 1

ТЕМА 1. Предмет вивчення та задачі дисципліни. Місце дисципліни в учбовому плані. Рекомендована література. Класифікація авіаційних двигунів. Основні параметри. Області використання.

ТЕМА 2. Термодинамічний цикл Брайтона. Залежність питомої роботи від параметрів польоту, температури газу перед турбіною та ступеня підвищення тиску. Покоління ГТД. Формула для визначення тяги. Питома тяга та питома витрата палива. Зміна температури та тиску у характерних перерізах проточної частини.

ТЕМА 3. Головні вузли та силові системи ГТД. Умови роботи і навантаження на основні вузли та деталі двигуна. Газові сили і моменти, які діють на вузли ГТД. Засоби зменшення осьових сил, які діють на ротори двигунів. Конструкції опор роторів ГТД. Сили інерції, які діють на вузли ГТД. Статичне та динамічне балансування роторів. Силові системи роторів і статорів. Трансмсії ГТД, конструкція з'єднувальних муфт. Джерела температурних напружень у вузлах та деталях АД і ЕУ.

ТЕМА 4. Визначення навантажень та аналіз міцності валів. Аналіз характерних режимів роботи та зміни осьових та радіальних сил, крутного моменту, гіроскопічного моменту. Визначення критичного режиму польоту для аналізу міцності вала та відповідних навантажень. Побудова розрахункової схеми вала.

ТЕМА 5. Призначення, умови роботи та вимоги до компресорів АД та ЕУ. Класифікація компресорів ГТД, параметри, порівняльна оцінка. Осьові та відцентрові компресори. Конструктивні схеми осьових компресорів. Вимоги до конструкції компресора та шляхи їх реалізації. Типи роторів осьових компресорів, їх порівняльна оцінка. Конструкція робочих лопаток компресора та вузлів їх кріплення. Навантаження, що діють на ротор компресора. Статори компресорів. Зазори між ротором і статором. Ущільнення проточної частини компресорів. Засоби забезпечення безпомпажної роботи компресора на всіх режимах роботи двигуна. Конструкційні матеріали виготовлення деталей компресорів.

ТЕМА 6. Призначення, умови роботи та вимоги до турбін АД і ЕУ. Робочі лопатки турбін, засоби їх сполучення з диском. Диски турбін, їх сполучення між собою та з валом. Розрахунок осьової сили, яка діє на ротор турбіни. Статори газових турбін. Соплові апарати, умови роботи,

силові схеми та засоби кріплення до корпусів. Корпуси газових турбін. Охолодження деталей турбін. Визначення температури лопаток та дисків турбіни. Зазори проміж ротором і статором. Конструктивні матеріали для виготовлення деталей турбін.

ТЕМА 7. Призначення, умови роботи та вимоги до камер згоряння АД і ЕУ. Особливості робочого процесу у камерах згоряння. Призначення, умови роботи, конструктивне оформлення та навантаження на основні елементи КЗ: корпуси, дифузор, жарові труби, фронтний пристрій, форсунки, запальвальний пристрій, газозбірник. Особливості форсажних камер. Вібраційне горіння та його вплив на міцність КЗ.

Модульний контроль

Модуль 2

Змістовий модуль № 2

ТЕМА 8. Розрахунок на міцність лопаток від дії відцентрових сил. Розрахунок на міцність лопаток від дії газових сил. Сумарні напруження, коефіцієнт запасу міцності. Розвантаження пера робочої лопатки від згинаючих моментів газових сил моментами від відцентрових сил. Коефіцієнт розвантаження. Особливості розрахунку лопаток з бандажними полицями, нерівномірно нагрітих лопаток.

ТЕМА 9. Розрахунок на міцність дисків компресорів і турбін, виведення головних розрахункових рівнянь напруженого стану. Зведення розрахункових рівнянь диску до системи звичайних диференціальних рівнянь. Граничні умови для суцільного диска та диска із центральним отвором. Особливості розрахунку дисків зі стрибкоподібною зміною товщини та дисків відцентрових компресорів. Аналіз термонапруженого стану диска на прикладі диска постійної товщини. Визначення запасу міцності диска за еквівалентними напруженнями та за руйнуючою частотою обертання.

ТЕМА 10. Види та форми коливань лопаток. Вільні та вимушені коливання лопаток компресорів і турбін. Визначення частоти першої форми власних коливань моделі лопатки (плоскої пластини) за методом Релея. Вплив форми лопатки та умов її роботи на частоту вільних коливань. Визначення частот кількох форм коливань реальної лопатки за методом скінчених елементів. Вплив конструкційних та експлуатаційних факторів на частоту власних коливань лопаток. Джерела змінних сил, що примушують лопатку коливатися. Визначення резонансних режимів. Побудова та аналіз частотної діаграми для робочої лопатки компресора або турбіни. Методи демпфування коливань лопаток. Автоколивання лопаток.

ТЕМА 11. Коливання дисків. Форми коливань. Сумісні коливання лопаток із дисками.

Модульний контроль

Модуль 3

Змістовий модуль №3

ТЕМА 12. Коливання роторів. Критична частота обертання невагомого вала з одним диском. Поняття «жорсткого» та «гнучкого» вала.

ТЕМА 13. Згинальні коливання роторів ГТД. Власні згинальні коливання роторів. Власні згинальні коливання не обертового одно-дискового ротора. Власні рухи не обертового одно-дискового ротора.

ТЕМА 14. Коливання обертового ротора. Власні прецесійні рухи не обертового одно-дискового ротора. Прецесійний рух вала. Силкові фактори при прецесійному русі вала.

ТЕМА 15. Змушені та резонансні коливання роторів. Роторні коливання валів. Не роторні коливання валів. Вплив пружності опор на коливання роторів.

ТЕМА 16. Розрахунок згинальних коливань роторів ГТД методом скінчених елементів.

ТЕМА 17. Основні поняття та вимоги до опор. Конструкція та проектування пужнодемпферних опор.

Модульний контроль

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	денна форма				
	усього	у тому числі			
л		пр	лаб	с.р.	
1	2	3	4	5	6
Модуль 1					
Змістовий модуль 1					
ТЕМА 1. Предмет вивчення та задачі дисципліни. Місце дисципліни в учбовому плані. Рекомендована література. Класифікація авіаційних двигунів. Основні параметри. Області використання.	6	1	1	–	4
ТЕМА 2. Термодинамічний цикл Брайтона. Залежність питомої роботи від параметрів польоту, температури газу перед турбіною та ступеня підвищення тиску. Покоління ГТД. Формула для визначення тяги. Питома тяга та питома витрата палива. Зміна температури та тиску у характерних перерізах проточної частини.	6	1	1	–	4
ТЕМА 3. Головні вузли та силові системи ГТД. Умови роботи і навантаження на основні вузли та деталі двигуна. Газові сили і моменти, які діють на вузли ГТД. Засоби зменшення осьових сил, які діють на ротори двигунів. Конструкції опор роторів ГТД. Сили інерції, які діють на вузли ГТД. Статичне та динамічне балансування роторів. Силові системи роторів і статорів. Трансмсії ГТД, конструкція з'єднувальних муфт. Джерела температурних напружень у вузлах та деталях АД і ЕУ.	10	2	4	–	4
ТЕМА 4. Визначення навантажень та аналіз міцності валів. Аналіз характерних режимів роботи та зміни осьових та радіальних сил, крутного моменту, гіроскопічного моменту. Визначення критичного режиму польоту для аналізу міцності вала та відповідних навантажень. Побудова розрахункової схеми вала.	6	2	2	–	2
ТЕМА 5. Призначення, умови роботи та вимоги до компресорів АД та ЕУ. Класифікація компресорів ГТД, параметри, порівняльна оцінка. Осьові та відцентрові компресори. Конструктивні схеми осьових компресорів. Вимоги до конструкції компресора та шляхи їх реалізації. Типи роторів осьових компресорів, їх порівняльна оцінка. Конструкція робочих лопаток компресора та вузлів їх кріплення. Навантаження, що діють на ротор компресора. Статори компресорів. Зазори між ротором і статором. Ущільнення проточної частини компресорів. Засоби забезпечення безпомпажної роботи компресора на всіх режимах роботи двигуна. Конструкційні матеріали виготовлення деталей компресорів.	14	5	–	3	6
ТЕМА 6. Призначення, умови роботи та вимоги до турбін АД і ЕУ. Робочі лопатки турбін, засоби їх сполучення з диском. Диски турбін, їх сполучення між	15	6	–	3	6

собою та з валом. Розрахунок осьової сили, яка діє на ротор турбіни. Статори газових турбін. Соплові апарати, умови роботи, силові схеми та засоби кріплення до корпусів. Корпуси газових турбін. Охолодження деталей турбін. Визначення температури лопаток та дисків турбіни. Зазори проміж ротором і статором. Конструктивні матеріали для виготовлення деталей турбін.					
ТЕМА 7. Призначення, умови роботі та вимоги до камер згоряння АД і ЕУ. Особливості робочого процесу у камерах згоряння. Призначення, умови роботи, конструктивне оформлення та навантаження на основні елементів КЗ: корпуси, дифузор, жарові труби, фронтний пристрій, форсунки, запальвальний пристрій, газозбірник. Особливості форсажних камер. Вібраційне горіння та його вплив на міцність КЗ.	13	5	–	2	6
Модульний контроль*	1	1	–	–	–
Разом за змістовим модулем 1	70	22	8	8	32
Модуль 2					
Змістовий модуль 2					
ТЕМА 8. Розрахунок на міцність лопаток від дії відцентрових сил. Розрахунок на міцність лопаток від дії газових сил. Сумарні напруження, коефіцієнт запасу міцності. Розвантаження пера робочої лопатки від згинаючих моментів газових сил моментами від відцентрових сил. Коефіцієнт розвантаження. Особливості розрахунку лопаток з бандажними полицями, нерівномірно нагрітих лопаток. – 6 (28)	16	4	4	–	8
ТЕМА 9. Розрахунок на міцність дисків компресорів і турбін, виведення головних розрахункових рівнянь напруженого стану. Зведення розрахункових рівнянь диску до системи звичайних диференціальних рівнянь. Граничні умови для суцільного диска та диска із центральним отвором. Особливості розрахунку дисків зі стрибкоподібною зміною товщини та дисків відцентрових компресорів. Аналіз термонапруженого стану диска на прикладі диска постійної товщини. Визначення запасу міцності диска за еквівалентними напруженнями та за руйнуючою частотою обертання.	16	4	4	–	8
ТЕМА 10. Види та форми коливань лопаток. Вільні та вимушені коливання лопаток компресорів і турбін. Визначення частоти першої форми власних коливань моделі лопатки (плоскої пластини) за методом Релея. Вплив форми лопатки та умов її роботи на частоту вільних коливань. Визначення частот кількох форм коливань реальної лопатки за методом скінчених елементів. Вплив конструкційних та експлуатаційних факторів на частоту власних коливань лопаток. Джерела змінних сил, що примушують лопатку коливатися. Визначення резонансних режимів. Побудова та аналіз частотної діаграми для робочої лопатки компресора або турбіни. Методи демпфування	17	4	5	–	8

коливань лопаток. Автоколивання лопаток.					
ТЕМА 11. Коливання дисків. Форми коливань. Сумісні коливання лопаток із дисками.	8	2	2	–	4
Модульний контроль*	1	1	–	–	–
Разом за змістовим модулем 2	57	14	15	–	28
Модуль 3					
Змістовий модуль 3					
ТЕМА 12. Коливання роторів. Критична частота обертання невагомго вала з одним диском. Поняття «жорсткого» та «гнучкого» вала.	8	2	–	–	6
ТЕМА 13. Згинальні коливання роторів ГТД. Власні згинальні коливання роторів. Власні згинальні коливання не обертового одно-дискового ротора. Власні рухи не обертового одно-дискового ротора	7	2	–	–	5
ТЕМА 14. Коливання обертового ротора Власні прецесійні рухи не обертового одно-дискового ротора. Прецесійний рух валу. Силові фактори при прецесійному русі вала.	12	2	4	–	6
ТЕМА 15. Змушені та резонансні коливання роторів. Роторні коливання валів. Не роторні коливання валів. Вплив пружності опор на коливання роторів.	7	2	–	–	5
ТЕМА 16. Розрахунок згинальних коливань роторів ГТД методом скінченних елементів.	7	2	–	–	5
ТЕМА 17. Основні поняття та вимоги до опор. Конструкція та проектування пружнодемпферних опор.	12	2	5	–	5
Модульний контроль*	1	1	–	–	–
Разом за змістовим модулем 3	53	12	9	–	32
Усього годин	180	48	32	8	92

*Не входить до розрахунку годин

5. Теми семінарських занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		0
	Разом	0

6. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Класифікація авіаційних двигунів. Основні параметри. Области використання	1
2	Покоління ГТД. Формула для визначення тяги. Питома тяга та питома витрата палива. Зміна температури та тиску у характерних перерізах проточної частини	1
3	Головні вузли та силові системи ГТД. Умови роботи і навантаження на основні вузли та деталі двигуна. Силові системи роторів і статорів. Трансмисії ГТД, конструкція з'єднувальних муфт. Джерела температурних напружень у вузлах та деталях АД і ЕУ.	4
4	Визначення навантажень та аналіз міцності валів. Аналіз характерних режимів роботи та зміни осьових та радіальних сил, крутного моменту, гіроскопічного моменту. Побудова розрахункової схеми вала.	2
5	Розрахунок на міцність лопаток від дії відцентрових сил. Розрахунок на	4

	міцність лопаток від дії газових сил. Сумарні напруження, коефіцієнт запасу міцності.	
6	Розрахунок на міцність дисків компресорів і турбін, виведення головних розрахункових рівнянь напруженого стану. Визначення запасу міцності диска за еквівалентними напруженнями та за руйнуючою частотою обертання	4
7	Види та форми коливань лопаток. Вільні та вимушені коливання лопаток компресорів і турбін. Визначення частоти першої форми власних коливань моделі лопатки (плоскої пластини) за методом Релея	5
8	Колівання дисків. Форми коливань. Сумісні коливання лопаток із дисками	2
9	Колівання обертового ротора Власні прецесійні рухи не обертового однодискового ротора. Прецесійний рух валу	4
10	Основні поняття та вимоги до опор. Конструкція та проектування пружнодемпферних опор.	5
	Разом	32

7. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Конструкція осьових та відцентрових компресорів ГТД, матеріали компресорів	3
2	Конструкція газових турбін ГТД	3
3	Камери згоряння ГТД	2
	Разом	8

8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Конструктивно-компонувальні схеми ГТД	4
2	Компресори АД та ЕУ	4
3	Газові турбіни	4
4	Розрахунок лабіринтного ущільнення	2
5	Розрахунок навантаження на радіально упорний підшипник	6
6	Основні камери згоряння ГТД	6
7	Форсажні камери згоряння ГТД	6
8	Вихідні та реверсивні авіаційних пристрої ГТД	8
9	Екологічні характеристики ГТД	8
10	Силові системи, трансмісії та основні фактори навантаження, що діють на деталі ГТД	8
11	Розрахунки на міцність лопаток компресорів та турбін	4
12	Розрахунки на міцність дисків компресорів та турбін	6
13	Аналіз напружено-деформованого стану диска	5
14	Розрахунок на міцність замків кріплення робочих лопаток	6
15	Розрахунки на міцність та стійкість оболонок	5
16	Конструкційна міцність матеріалів. Малоциклова і багатоциклова втома. Вибір запасів міцності і способів їх розрахунку	5
17	Розрахункова робота на тему «Розрахунок лопатки компресора на статичну міцність»	5
	Разом	92

9. Індивідуальне завдання

РГР на тему: «Розрахувати на міцність лопатку компресора авіаційного газотурбінного двигуна».

10. Методи навчання

Основні форми навчання:

- лекційна;
- лабораторні роботи
- самостійна робота студента;
- іспит.

На лекціях студентів даються основні поняття, основи теорії, закономірності, необхідні для підготовки до виконання лабораторних робіт, самостійної роботи.

Лекція, розв'язує тільки одну дидактичну задачу – дає первісне знайомство з темою, організовує первісне сприйняття матеріалу, формулює основні проблеми.

Проведення лабораторних робіт базується на словесному (аналітичному) описанні об'єкта, а також й на матеріальному його відображенні за допомогою спеціальних дидактичних матеріалів (розрізні макети, плакати та ін.). Під час проведення лабораторних робіт використовується бригадний характер праці студентів.

Основною формою навчання є самостійна робота. До неї не можна приступати без певного багажу знань, які даються на лекції. Під час самостійної роботи студенти поглиблено вивчають лекційний матеріал, готуються до проведення лабораторних робіт.

11. Методи контролю

Оформлення лабораторних робіт – *письмово*, захист – *усно*.

Проведення, письмового модульного контролю, фінальний контроль у вигляді іспиту.

Семестр 6(4) – іспит.

Питання для самостійної роботи студентів

Модуль 1

Змістовий модуль 1

1. Класифікація ГТД, сфери застосування по висоті та швидкості польоту. Основні параметри ГТД. Ресурс двигуна, поняття про експлуатацію двигуна за його технічним станом, поняття про модульну конструкцію двигуна.

2. Компресори. Основні вимоги до конструкції компресорів ГТД. Конструктивні заходи, що розширюють діапазон сталої роботи осьових компресорів. Конструктивні параметри робочого колеса щаблі компресора. Класифікація компресорів, їх коротка характеристика. Конструктивні особливості роторів барабанно-дискового типу. Відцентрові компресори, особливості конструкції. Конструкційні матеріали, що застосовуються для лопаток, дисків та корпусів компресорів.

3. Газові турбіни Класифікація газових турбін. Конструктивні заходи, створені задля підвищення ККД турбіни. Вимоги до вузла кріплення диска турбіни з валом, приклади з'єднання. Зміна радіального зазору між лопатками турбіни та корпусом. Охолодження робочих лопаток турбіни. Нові технологічні методи виробництва турбінних лопаток з метою підвищення їх жароміцності. Матеріали деталей газових турбін.

4. Камери згоряння ВМД, основні вимоги до них. Класифікація камер згоряння. Конструкція кільцевих та трубчатокільцевих камер згоряння. Форсажні камер ВМД, конструктивні схеми. Матеріали, що застосовуються.

Модуль 2

Змістовий модуль 2

Розрахунок на міцність лопаток від дії відцентрових сил. Розрахунок на міцність лопаток від дії газових сил. Сумарні напруження, коефіцієнт запасу міцності. Розвантаження пера робочої лопатки від згинаючих моментів газових сил моментами від відцентрових сил. Коефіцієнт розвантаження. Особливості розрахунку лопаток з бандажними полицями, нерівномірно нагрітих лопаток.

Розрахунок на міцність дисків компресорів і турбін, виведення головних розрахункових рівнянь напруженого стану. Зведення розрахункових рівнянь диску до системи звичайних диференціальних рівнянь. Граничні умови для суцільного диска та диска із центральним отвором. Особливості розрахунку дисків зі стрибкоподібною зміною товщини та дисків відцентрових компресорів. Аналіз термонапруженого стану диска на прикладі диска постійної товщини. Визначення запасу міцності диска за еквівалентними напруженнями та за руйнуючою частотою обертання.

Види та форми коливань лопаток. Вільні та вимушені коливання лопаток компресорів і турбін. Визначення частоти першої форми власних коливань моделі лопатки (плоскої пластини) за методом Релея. Вплив форми лопатки та умов її роботи на частоту вільних коливань. Визначення частот кількох форм коливань реальної лопатки за методом скінчених елементів. Вплив конструкційних та експлуатаційних факторів на частоту власних коливань лопаток. Джерела змінних сил, що примушують лопатку коливатися. Визначення резонансних режимів. Побудова та аналіз частотної діаграми для робочої лопатки компресора або турбіни. Методи демпфування коливань лопаток. Автоколивання лопаток.

Коливання дисків. Форми коливань. Сумісні коливання лопаток із дисками

Модуль 3

Змістовий модуль 3

Коливання роторів. Критична частота обертання невагомго вала з одним диском. Поняття «жорсткого» та «гнучкого» вала.

Згинальні коливання роторів ГТД. Власні згинальні коливання роторів. Власні згинальні коливання не обертового одно-дискового ротора. Власні рухи не обертового одно-дискового ротора.

Коливання обертового ротора. Власні прецесійні рухи не обертового одно-дискового ротора. Прецесійний рух валу. Силкові фактори при прецесійному русі вала.

Змусені та резонансні коливання роторів. Роторні коливання валів. Не роторні коливання валів. Вплив пружності опор на коливання роторів.

Розрахунок згинальних коливань роторів ГТД методом скінчених елементів.

Основні поняття та вимоги до опор. Конструкція та проектування пружнодемпферних опор.

12. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

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

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)	Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів
Змістовий модуль 1			
Робота на лекціях	0...0,5	11	0...5,5
Виконання і захист лабораторних (практичних) робіт	1...2	8	8...16
Модульний контроль	14...17	1	14...17
Змістовий модуль 2			
Робота на лекціях	0...0,5	7	0...3,5
Виконання і захист лабораторних (практичних) робіт	1...2	7	7...14
Модульний контроль	14...17	1	14...17
Змістовий модуль 3			
Робота на лекціях	0...0,5	6	0...3
Виконання і захист лабораторних (практичних) робіт	1...2	4	4...8
Модульний контроль	13...16	1	13...16
Усього за семестр			60...100

Семестровий контроль (іспит) проводиться у разі відмови студента від балів поточного тестування й за наявності допуску до іспиту. Допуск до іспиту надається за умов відпрацювання та здачі усіх лабораторних робіт.

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

Білет для іспиту складається з двох теоретичних запитань. Теоретичні запитання розподілено таким чином:

Перше запитання - змістовий модуль 1,2 або 3.

Друге запитання – тематика розрахунково-графічної роботи.

Максимальна кількість балів за кожне запитання –50.

12.2. Якісні критерії оцінювання

Для одержання позитивної оцінки студент повинен

знати:

– типи газотурбінних силових установок за способом створення рушійної сили та здійснення робочих процесів у двигуні;

– області їх застосування;

– основні питомі параметри авіаційних двигунів;

– вхідні пристрої. Будова, засоби підвищення ефективності роботи.;

– повітряні лопаткові компресори ГТД: принцип, ефективність, сталість роботи;

– газові турбіни ГТД: принцип, ефективність роботи, будова, засоби підвищення ефективності роботи;

– конструкцію робочих лопаток компресора і турбіни. Розрахунок на міцність лопаток від дії відцентрових сил;

– Конструкцію та розрахунок на міцність вузлів кріплення робочих лопаток компресорів.

Конструкцію та розрахунок на міцність вузлів кріплення робочих лопаток турбін;

– камери згоряння ГТД. Принцип роботи, будова, засоби підвищення ефективності роботи;

– вихідні пристрої ГТД. Принцип роботи, будова;

– системи які забезпечують роботу двигуна;

– Види та форми коливань лопаток. та дисків ГТД Вільні та вимушені коливання лопаток компресорів і турбін. Побудова та аналіз частотної діаграми для робочої лопатки компресора або турбіни

Коливання роторів. Критична частота обертання невагомго валу з одним диском. Поняття «жорсткого» та «гнучкого» валу. Основні поняття та вимоги до опор. Конструкція та проектування пружно-демпферних опор.

– Прецесійний рух валу. Силкові фактори при прецесійному руху валу

вміти:

– визначати загальну будову та робочі процеси різновидів авіаційних теплових двигунів;

– виконувати оцінку призначення, будови та ефективності вузлів ГТД;

– виконувати порівняльну оцінку існуючих конструкцій, пропонувати шляхи їх вдосконалення.

– Виконувати розрахунки на міцність робочих лопаток та дисків компресора і турбін.

12.3. Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру

Задовільно (60-74). Мати необхідний мінімум знань та умінь. Відпрацювати та захистити всі лабораторні та практичні роботи. Виконати та захистити індивідуальне завдання (розрахунково-графічну роботу). Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Мати уяву про вимоги норм льотної гідності; конструкцію авіаційних ГТД різних типів; порядок проектування авіаційного двигуна та його випробувань; конструкцію вузлів і деталей двигуна, проблеми, що виникають під час їх експлуатації; норми міцності; методи розрахунків основних деталей двигуна на міцність (лопаток, дисків, барабанів, замків, валів, оболонок); режими

роботі двигуна, мати уяву про вплив конструкційних і експлуатаційних факторів на напружено-деформований стан деталей двигуна та про вплив режимів роботи двигуна на малоциклову втому його деталей.

Добре (75-89). Твердо опанувати мінімум знань та вмінь. Відпрацювати та захистити всі лабораторні та практичні роботи. Виконати та добре захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати вимоги норм льотної гідності; конструкцію авіаційних ГТД усіх типів, які призначаються для дозвукових та надзвукових авіаційних літальних апаратів, вимоги до двигунів різного призначення, конструкцію вузлів цих двигунів та деталей; порядок проектування авіаційного двигуна та його випробувань; конструкцію вузлів і деталей двигуна, проблеми, що виникають під час їх експлуатації; норми міцності; методи розрахунків основних деталей двигуна на міцність (лопаток, дисків, барабанів, замків, валів, оболонки); режими роботи двигуна, зміну навантажень при різних режимах роботи; конструкційні матеріали, які використовуються у двигунах; мати уяву про вплив конструкційних і експлуатаційних факторів на напружено-деформований стан деталей двигуна; вплив режимів роботи двигуна на малоциклову втому його деталей.

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»). Повно знати основний та додатковий матеріал. Знати вимоги норм льотної гідності; конструкцію авіаційних ГТД усіх типів, які призначаються для дозвукових та надзвукових авіаційних літальних апаратів, вимоги до двигунів різного призначення, конструкцію вузлів цих двигунів та деталей; порядок проектування авіаційного двигуна та його випробувань; обмеження діапазону використання літального апарата, які дає двигун; конструкцію вузлів і деталей двигуна, проблеми, що виникають під час їх експлуатації; статичні і динамічні навантаження, які діють на елементи ГТД і літак від двигуна; норми міцності; методи розрахунків основних деталей двигуна на міцність (лопаток, дисків, барабанів, замків, валів, оболонки); режими роботи двигуна, зміну навантажень при різних режимах роботи; конструкційні матеріали, які використовуються у двигунах; вплив конструкційних і експлуатаційних факторів на напружено-деформований стан деталей двигуна; вплив режимів роботи двигуна на малоциклову втому його деталей.

Шкала оцінювання: бальна і традиційна

Сума балів	Оцінка за традиційною шкалою	
	Іспит, диференційований залік	Залік
90 – 100	Відмінно	Зараховано
75 – 89	Добре	
60 – 74	Задовільно	
0 – 59	Незадовільно	Не зараховано

13. Методичне забезпечення

Електронні матеріали курсу: <https://mentor.khai.edu/user/index.php?id=2793>.

14. Рекомендована література

Базова

1. Єпіфанов С. В., Чигрин В. С. Конструкція авіаційних газотурбінних двигунів [Текст] : – Х. – 2023. – 336 с.
2. Шошин, Ю. С. Основні технічні дані маршевих авіаційних газотурбінних двигунів СРСР, України, Росії [Текст]: навч. посібник/Ю. С. Шошин. - Х.: 2002 - 69 с.
3. Шошин Ю. С. Компресори авіаційних газотурбінних двигунів. [Текст]: навч. посібник/Ю. С. Шошин. - Х. 2002 - 26 с.
4. Шошин Ю. С. Турбіни авіаційних газотурбінних двигунів [Текст]: навч. Посібник / Ю. С. Шошин. - Х. 2003 - 37 с.

5. Камери згоряння газотурбінних двигунів авіаційного та наземного застосування [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Ю. О. Гусєв, І. Ф. Кравченко, С. О. Євсєєв, О. В. Бондаренко. - Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2023. 72 с.
6. Шошин, Ю. С. Розрахунок на міцність робочих лопаток компресорів та турбін [Текст]: навч. посібник / Ю. С. Шошин, С. В. Єпіфанов, Р. Л. Зеленський. - Х. 2006 - 28 с.
7. Шошин, Ю. С. Розрахунок на міцність дисків компресорів та турбін [Текст]: навч. посібник / Ю. С. Шошин., С. В. Єпіфанов., Ф. М. Муравченко. - Х. 1998 - 28 с.
8. Польотучий, А. І. Основи конструювання авіаційних редукторів [Текст] / О. І. Полетучий., В. М. Ридченко. - Х.; 1994. - Ч.1 - 335с., Ч.2 - 28 с.
9. Кириченко, В. І. Редуктори ТВД та вертолітних двигунів [Текст]: навч. посібник / В. І. Кириченко. - Х, 1978. - 82 с.
10. Опір матеріалів [Текст]; за ред. Г. С. Писаренко. - К.: Вища шк., 1986. - 775 с.

Допоміжна

1. Нерубаський, В. В. Турбореактивні двоконтурні двигуни для магістральних пасажирських і транспортних літаків [Текст]: довід. посібник: о 4 ч. / В. В. Нерубаський. – Харків: ХАІ, 2006. – Ч. 1: Двигуни великої тяги. - 261 с.
2. Нерубаський, В. В. Турбореактивні двоконтурні двигуни для магістральних пасажирських і транспортних літаків [Текст]: довід. посібник: о 4 ч. / В. В. Нерубаський. - Харків: ХАІ, 2007. - Ч. 2: Двигуни середньої тяги. - 378 с.
3. Нерубаський, В. В. Турбореактивні двоконтурні двигуни для магістральних пасажирських і транспортних літаків [Текст]: довід. посібник: о 4 ч. / В. В. Нерубаський. - Харків: ХАІ, 2008. - Ч. 3: Двигуни малої тяги. - 217 с.
4. Нерубаський, В. В. Турбореактивні двоконтурні двигуни для магістральних пасажирських і транспортних літаків [Текст]: довід. посібник: о 4 ч. / В. В. Нерубаський. – Харків: ХАІ, 2011. – Ч. 4: Двигуни з форсажною камерою. - 284 с.
5. Технічні описи конструкцій авіаційних газотурбінних двигунів.

15. Інформаційні ресурси

Електронні креслення повздовжніх розрізів двигунів, електронні посібники по лабораторним заняттям й програми ПЕОМ з розрахунків на міцність і коливання елементів ГТД, креслення поздовжніх розрізів ГТД.

Сайт кафедри: <https://education.khai.edu/department/203>; <https://k203.khai.edu>.