

СИЛАБУС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

1. Загальна інформація про навчальну дисципліну

Повна назва навчальної дисципліни	Динаміка роторних машин
Повна офіційна назва закладу вищої освіти	Сумський державний університет
Повна назва структурного підрозділу	Факультет технічних систем та енергоефективних технологій. Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського
Розробник(и)	Павленко Іван Володимирович
Рівень вищої освіти	Перший рівень вищої освіти, НРК – 6 рівень, QF-LLL – 6 рівень, FQ-EHEA – перший цикл
Семестр вивчення навчальної дисципліни	16 тижнів протягом 7-го семестру
Обсяг навчальної дисципліни	Обсяг навчальної дисципліни становить 5 кредитів ЄКТС, 150 годин, з яких 52 години становить контактна робота з викладачем (16 годин лекцій, 32 години практичних занять, 4 години атестаційних заходів), 98 годин самостійної роботи.
Мова викладання	Українська

2. Місце навчальної дисципліни в освітній програмі

Статус дисципліни	Вибіркова навчальна дисципліна для освітньої програми "Комп'ютерний інжиніринг в механіці"
Передумови для вивчення дисципліни	Теорія коливань, Програмування задач механіки, Теорія і розрахунки відцентрових машин
Додаткові умови	Додаткові умови відсутні
Обмеження	Обмеження відсутні

3. Мета навчальної дисципліни

Формування у студента практичних навичок побудови на високому технічному рівні математичних моделей вільних і вимушених коливань роторних систем та їх балансування із застосуванням сучасних програмних засобів.

4. Зміст навчальної дисципліни

Тема 1 Теоретичні основи динаміки роторних систем

Проста консервативна одномасова модель динаміки ротора. Пряма синхронна прецесія. Явище самовирівнювання. Рівняння одномасової моделі неврівноваженого ротора. Урахування зовнішнього опору. Кінематика прецесій ротора, що обертається. Рівняння динаміки ротора з урахуванням анізотропії пружних сил. Втрата стійкості. Вимушені коливання врівноваженого горизонтального ротора. Кінематика горизонтального ротора. Рівняння динаміки ротора з урахуванням впливу рідинного шару. Вплив циркуляційної сили. Визначення амплітудної та фазової частотних характеристик. Стійкість ротора відцентрового насоса.

Тема 2 Дослідження динаміки роторів за дискретними моделями їх коливань

Автоколивання ротора без контакту зі статором. Автоколивальна прецесія ротора за умови контакту зі статором. Математична модель автоколивань плаваючого кільця з урахуванням сухого тертя. Стійкість і автоколивання одномасової моделі при анізотропії пружних сил. Вплив внутрішнього в'язкого тертя на динаміку горизонтального ротора. Основні підходи до створення дискретних моделей роторів. Традиційна дискретна багатомасова модель ротора. Способи врахування гіроскопічного моменту при дослідженні динаміки ротора. Вплив гіроскопічного моменту на критичні частоти ротора. Застосування методу скінченних елементів для дослідження динаміки роторних систем. Матричне рівняння поперечних коливань ротора. Вільні коливання консервативної системи. Вимушені коливання консервативної системи. Вимушені коливання дисипативної системи.

Тема 3 Основи балансування роторів відцентрових машин

Умови динамічної рівноваги ротора. Види неврівноваженості. Еквівалентні системи дисбалансів. Поняття жорсткого ротора. Критерії якості балансування ротора. Статичне балансування. Динамічне балансування. Явище розбалансування ротора, урівноваженого в двох площинах на низьких оборотах. Розкладання прогинів синхронної процесії неврівноваженого ротора за власними формами. Балансування за власними формами. Спосіб Ден-Гартога.

Тема 4 Оцінювання параметрів математичних моделей коливань роторів

Прості алгебраїчні моделі. Загальний вигляд алгебраїчної моделі. Неалгебраїчні моделі. Одиничний експеримент. Серія експериментів. Випадок моделі в неявному вигляді. Лінійне оцінювання параметрів. Формула лінійної регресії. Балансування гнучкого ротора як задача оцінювання системи дисбалансів. Консервативна дискретна модель. Лінійне оцінювання параметрів. Нелінійне оцінювання параметрів із застосуванням штучних нейронних мереж. Нелінійна дискретна модель.

5. Очікувані результати навчання навчальної дисципліни

Після успішного вивчення навчальної дисципліни здобувач вищої освіти зможе:

PH1	Застосовувати сучасні комп'ютерні засоби чисельного моделювання вільних і вимушених коливань роторів.
PH2	Досліджувати вібраційний стан роторних машин.
PH3	Розв'язувати практичні задачі із забезпечення вібраційної надійності роторних машин із застосуванням математичного і числового моделювань.

7. Види навчальних занять та навчальної діяльності

7.1 Види навчальних занять

Тема 1. Теоретичні основи динаміки роторних систем
<p>Лк1 "Одномасова модель ротора. Прецесія ротора." (денна)</p> <p>Проста консервативна одномасова модель динаміки ротора. Пряма синхронна прецесія. Явище самовирівнювання. Рівняння одномасової моделі неврівноваженого ротора. Урахування зовнішнього опору. Кінематика прецесій ротора, що обертається.</p>
<p>Лк2 "Динаміка ротора двоякої жорсткості. Одномасова модель ротора відцентрового насоса." (денна)</p> <p>Рівняння динаміки ротора з урахуванням анізотропії пружни сил. Втрата стійкості. Вимушені коливання врівноваженого горизонтального ротора. Кінематика горизонтального ротора. Рівняння динаміки ротора з урахуванням впливу рідинного шару. Вплив циркуляційної сили. Визначення амплітудної та фазової частотних характеристик. Стійкість ротора відцентрового насоса.</p>
<p>Пр1 "Динамічний аналіз консервативної одномасової моделі ротора." (денна)</p> <p>Побудова амплітудної частотної характеристики одномасової моделі ротора. Визначення максимального прогину вала на робочій частоті. Встановлення сумарної динамічної реакції опор на робочій частоті.</p>
<p>Пр2 "Динамічний аналіз одномасової моделі ротора з урахуванням зовнішнього тертя." (денна)</p> <p>Побудова амплітудної та фазової частотних характеристики одномасової моделі ротора. Визначення максимального прогину вала на критичній частоті. Встановлення сумарної динамічної реакції опор на критичній частоті.</p>
<p>Пр3 "Динамічний аналіз одномасової моделі ротора двоякої жорсткості." (денна)</p> <p>Визначення критичної частоти першого роду. Відлаштування від резонансу. Перевірка умов стійкості ротора на робочій частоті. Визначення критичної частоти другого роду. Побудова відносної та абсолютної траєкторій центра мас диска.</p>
<p>Пр4 "Дослідження динаміки одномасової моделі ротора відцентрового насоса." (денна)</p> <p>Визначення критичної частоти. Визначення амплітудної та фазової частотних характеристик. Перевірка стійкості ротора відцентрового насоса.</p>
Тема 2. Дослідження динаміки роторів за дискретними моделями їх коливань
<p>Лк3 "Автоколивання ротора. Динаміка ротора з урахуванням сил в ущільненнях, анізотропії пружних сил і внутрішнього в'язкого тертя." (денна)</p> <p>Основні співвідношення. Автоколивання ротора без контакту зі статором. Автоколивальна прецесія ротора за умови контакту зі статором. Математична модель автоколивань плаваючого кільця з урахуванням сухого тертя. Стійкість і автоколивання одномасової моделі при анізотропії пружних сил. Вплив внутрішнього в'язкого тертя на динаміку горизонтального ротора.</p>

<p>Лк4 "Дискретні багатомасові моделі" (денна)</p> <p>Основні підходи до створення дискретних моделей роторів. Традиційна дискретна багатомасова модель ротора. Способи врахування гіроскопічного моменту при дослідженні динаміки ротора. Вплив гіроскопічного моменту на критичні частоти ротора.</p>
<p>Лк5 "Дослідження скінченноелементної моделі динаміки ротора із застосуванням САЕ систем." (денна)</p> <p>Функції форми скінченного елемента. Рівняння Лагранжа II роду для поперечних коливань балки. Матричне рівняння поперечних коливань ротора. Дослідження вільних і вимушених коливань скінченноелементної моделі ротора із застосуванням сучасних САЕ систем.</p>
<p>Пр5 "Дослідження автоколивань ротора відцентрового насоса." (денна)</p> <p>Побудова гідродинамічних характеристик ущільнення. Визначення граничної частоти автоколивань ротора без контакту зі статором. Дослідження автоколивань ротора за умови контакту зі статором. Побудова залежності амплітуди автоколивань від частоти обертання ротора.</p>
<p>Пр6 "Дослідження стійкості плаваючого кільця ущільнювача." (денна)</p> <p>Дослідження динаміки горизонтального ротора з урахуванням впливу внутрішнього в'язкого тертя. Визначення характеристик автоколивальної прецесії плаваючого кільця з урахуванням сухого тертя. Перевірка стійкості одномасової моделі при анізотропії пружних сил. Визначення характеристик автоколивальної прецесії ротора з урахуванням сухого тертя.</p>
<p>Пр7 "Дослідження динаміки дискретної моделі ротора з урахуванням гіроскопічного моменту диска." (денна)</p> <p>Визначення гіроскопічного моменту диска. Визначення власних частот коливань ротора. Уточнення значень власних частот з урахуванням гіроскопічного моменту диска.</p>
<p>Пр8 "Застосування методу скінченних елементів для дослідження вільних і вимушених коливань роторних систем." (денна)</p> <p>Визначення локальних матриць інерції та жорсткості. Побудова глобальних матриць інерції та жорсткості. Визначення власних частот коливань.</p>
<p>Пр9 "Аналіз скінченноелементних моделей вільних і вимушених коливань ротора із застосуванням систем комп'ютерної алгебри." (денна)</p> <p>Дослідження динаміки ротора із застосуванням систем комп'ютерної алгебри. Порівняння першої власної частоти з результатом для одномасової моделі. Побудова власних форм коливань ротора. Побудова амплітудної та фазової частотних характеристик. Побудова форм вимушених коливань.</p>
<p>Тема 3. Основи балансування роторів відцентрових машин</p>

<p>Лк6 "Види неврівноваженості роторів. Способи балансування ротора." (денна)</p> <p>Умови динамічної рівноваги ротора. Види неврівноваженості. Еквівалентні системи дисбалансів. Поняття жорсткого ротора. Критерії якості балансування ротора. Статичне балансування. Динамічне балансування.</p>
<p>Лк7 "Перспективні способи балансування ротора. Балансування у декількох площинах." (денна)</p> <p>Явище розбалансування ротора, урівноваженого в двох площинах на низьких оборотах. Розкладання прогинів синхронної процесії неврівноваженого ротора за власними формами. Балансування за власними формами. Спосіб Ден-Гартога.</p>
<p>Пр10 "Статичне балансування диска." (денна)</p> <p>Розрахунок пробного дисбалансу. Визначення неврівноваженої маси. Визначення якості балансування.</p>
<p>Пр11 "Проведення динамічного балансування ротора в двох площинах корекції." (денна)</p> <p>Розрахунок пробного дисбалансу. Оцінювання системи еквівалентних дисбалансів. Визначення залишкового дисбалансу. Розрахунок амплітуди коливань. Визначення динамічного навантаження на опори.</p>
<p>Пр12 "Віртуальне балансування ротора." (денна)</p> <p>Визначення власних частот і форм коливань ротора. Вимушені коливання ротора на робочій частоті до балансування. Балансування за першою власною формою.</p>
<p>Пр13 "Балансування гнучкого ротора." (денна)</p> <p>Балансування за першою та другою власними формами. Вимушені коливання ротора на робочій частоті після балансування. Застосування формули лінійної регресії.</p>
<p>Тема 4. Оцінювання параметрів математичних моделей коливань роторів</p>
<p>Лк8 "Методи і алгоритми оцінювання параметрів математичних моделей коливань роторних систем." (денна)</p> <p>Прості алгебраїчні моделі. Загальний вигляд алгебраїчної моделі. Неалгебраїчні моделі. Одиничний експеримент. Серія експериментів. Випадок моделі в неявному вигляді. Лінійне оцінювання параметрів. Формула лінійної регресії. Балансування гнучкого ротора як задача оцінювання системи дисбалансів. Консервативна дискретна модель. Лінійне оцінювання параметрів. Нелінійне оцінювання параметрів із застосуванням сучасних комп'ютерних програм реалізації штучних нейронних мереж.</p>
<p>Пр14 "Практичне балансування гнучкого ротора на робочій частоті." (денна)</p> <p>Вимушені коливання ротора до балансування. Визначення корегуючих дисбалансів.</p>
<p>Пр15 "Балансування гнучких роторів способом Ден-Гартога." (денна)</p> <p>Вимушені коливання ротора після балансування. Визначення амплітуд і фаз динамічних прогинів після балансування. Застосування систем комп'ютерної алгебри.</p>

Пр16 "Дослідження нелінійних коливань ротора турбокомпресора." (денна)
 Оцінювання дискретних мас. Гармонічний аналіз нелінійної дискретної моделі. Перевірка динамічної стійкості.

7.2 Види навчальної діяльності

НД1	Підготовка до лекцій із застосуванням навчально-методичної літератури і системи eLearning.
НД2	Робота на практичних заняттях над виконанням окремих практичних завдань.
НД3	Виконання письмових модульних контрольних робіт.

8. Методи викладання, навчання

Дисципліна передбачає навчання через:

МН1	Лекції
МН2	Практичні заняття у комп'ютерному класі

Лекції надають студентам знання теоретичних основ створення математичних моделей роторних систем (РН1). Практичні роботи надають студентам практичні навички дослідження вібраційного стану роторних машин із застосуванням сучасних програмних засобів числової реалізації створених моделей вільних і вимушених коливань роторів та їх балансування (РН2, РН3). Самостійному навчанню сприяє підготовка до лекцій і практичних занять.

Під час проведення занять студенти одержують навички комп'ютерної грамотності та ефективної організації власної роботи, вміння працювати в команді та аргументувати свої думки, здатність аналізувати інформацію, логічно і системно мислити та формулювати висновки.

9. Методи та критерії оцінювання

9.1. Критерії оцінювання

Шкала оцінювання ECTS	Визначення	Чотирибальна національна шкала оцінювання	Рейтингова бальна шкала оцінювання
A	Відмінне виконання лише з незначною кількістю помилок	5 (відмінно)	$90 \leq RD \leq 100$
B	Вище середнього рівня з кількома помилками	4 (добре)	$82 \leq RD < 89$
C	Загалом правильна робота з певною кількістю помилок	4 (добре)	$74 \leq RD < 81$
D	Непогано, але зі значною кількістю недоліків	3 (задовільно)	$64 \leq RD < 73$

E	Виконання задовольняє мінімальні критерії	3 (задовільно)	$60 \leq RD < 63$
FX	Можливе повторне складання	2 (незадовільно)	$35 \leq RD < 59$
F	Необхідний повторний курс з навчальної дисципліни	2 (незадовільно)	$0 \leq RD < 34$

9.2 Методи поточного формативного оцінювання

МФО1	Опитування та усні коментарі викладача за його результатами
МФО2	Обговорення та самокорекція виконаної роботи студентами
МФО3	Експрес-тестування

9.3 Методи підсумкового сумативного оцінювання

МСО1	Письмове тестування
МСО2	Виконання письмових модульних контрольних робіт
МСО3	Комп'ютерне тестування

Контрольні заходи:

7 семестр	100 балів
МСО1. Письмове тестування	72
Експрес-тестування на лекції (8x3)	24
Опитування на практичних роботах (16x3)	48
МСО2. Виконання письмових модульних контрольних робіт	28
Модульні контрольні заходи (2x14)	28

Контрольні заходи в особливому випадку:

7 семестр	100 балів
МСО3. Комп'ютерне тестування	100
Опитування на практичних роботах (16x4)	64
Модульні контрольні заходи (2x18)	36

Студент, який протягом навчального періоду виконав всі заплановані види навчальної роботи та за наслідками модульних атестацій набрав не менше 60 рейтингових балів, отримує семестрову оцінку у відповідності до набраних балів. Складання ПМК для підвищення позитивної оцінки не здійснюється. Студент, який протягом поточної роботи не набрав кількість рейтингових балів, що відповідає позитивній оцінці, але не менше 35 балів, зобов'язаний скласти ПСК після завершення останнього модульно-атестаційного циклу або екзаменаційної сесії. Студент має право на два складання ПСК: викладачу та комісії. При незадовільному складанні ПСК комісії студент отримує оцінку «незадовільно» («F» за шкалою ECTS) і відраховується з університету. При успішному складанні ПСК використовується оцінка «задовільно» («E» за шкалою ECTS; 60 балів). Студент, який за

наслідками модульних атестацій та ДСК набрав менше 35 балів, не допускається до ПСК, отримує оцінку «незадовільно» («F» за шкалою ECTS) і відраховується з університету.

10. Ресурсне забезпечення навчальної дисципліни

10.1 Засоби навчання

ЗН1	Мультимедіа, відео- і звуковідтворювальна, проєкційна апаратура (відеокамери, проєктори, екрани, смартдошки тощо)
ЗН2	Комп'ютери, комп'ютерні системи та мережи

10.2 Інформаційне та навчально-методичне забезпечення

Основна література	
1	Павленко І. В. Методи ідентифікації параметрів математичних моделей коливальних процесів : монографія / І. В. Павленко, В. І. Симоновський. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 146 с. (https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/7686)
Допоміжна література	
1	Симоновський В. І. Динаміка роторних машин : конспект лекцій / В. І. Симоновський. – Суми : Сумський державний університет, 2011. – 119 с. (https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/21115/1/Simonovs.pdf)
2	Марцинковский В. А. Динамика роторів відцентрових машин : монографія / В. А. Марцинковский. - Суми : Сумський державний університет, 2012. - 562 с. (https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/30568/1/Marcinkovsky_rotori.pdf)
3	Pavlenko I. et al. Dynamic analysis of centrifugal machines rotors with combined using 3D and 2D finite element models : monograph. - Ludenscheid : RAM-Verlag, 2018. - 156 p. (https://cutt.ly/ucUdlvY)
4	Калінкевич М. В. Теорія турбокомпресорів : навчальний посібник / М. В. Калінкевич, О. Г. Гусак. - Суми : Сумський державний університет, 2014. - 269 с.