



## Силабус освітнього компонента Програма навчальної дисципліни



# Динаміка роторів у магнітних підшипниках

**Шифр та назва спеціальності**  
113 – Прикладна математика

**Інститут**  
ННІ Комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики

**Освітня програма**  
Комп'ютерне та математичне моделювання

**Кафедра**  
Математичне моделювання та інтелектуальні обчислення в інженерії (161)

**Рівень освіти**  
Магістр-професіонал (1 рік 4 місяці)  
Магістр-науковець (1 рік 9 місяців)

**Тип дисципліни**  
Профільна, вибіркова

**Семестр**  
1

**Мова викладання**  
Українська

## Викладачі, розробники



**Мартиненко Геннадій Юрійович**  
(відповідальний лектор та викладач лабораторного практикуму)

[gennadii.martynenko@khpі.edu.ua](mailto:gennadii.martynenko@khpі.edu.ua)

Доктор технічних наук, професор, професор кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії НТУ «ХПІ».

Досвід науково-педагогічної роботи – 18 років. Автор понад 180 наукових та навчально-методичних праць.

*Лектор та викладач лабораторного практикуму з дисциплін:*  
«Організація баз даних», «Інтелектуальний аналіз даних», «Програмні комплекси проектування та аналізу», «Програмні засоби моделювання фізичних процесів», «Моделювання об'єктів та процесів в CAD/CAE системах», «Аналіз динамічних процесів в CAD/CAE системах», «Моделювання в CAE системах», «Наближені та чисельні методи розв'язання нелінійних задач», «Педагогічні та інформаційні технології у прикладній математиці».

[Детальніше про викладача на сайті кафедри](#)

## Загальна інформація

### Анотація

Дисципліна входить до блоку вибірових дисциплін за спрямуванням «Моделювання динамічних процесів» і присвячена розгляду як загальних питань щодо моделювання динамічних процесів в роторних системах та машинах різного призначення, а саме лінійних та нелінійних явищ роторної динаміки, так вузькоспеціальних проблем моделювання процесів при застосуванні як опор

роторів магнітних підшипників пасивного та активного типу. Дисципліна спрямована на формування знань, вмінь та навичок, необхідних для аналітичного математичного опису динаміки роторів в жорстких, пружних, та ,як окремих випадок, магнітних опорах. Розглядаються підходи до створення аналітичних математичних моделей застосованих для опису як жорстких, так і гнучких роторів з врахуванням жорсткості опираючого в підшипникових вузлах. Для пасивних та активних магнітних підшипників надаються відомості щодо визначення цієї жорсткості із застосуванням аналітичних та чисельних підходів. Практичне використання теоретичних основ математичного моделювання динаміки роторів, тобто обертових валів з навісними елементами (дисками, робочими колесами, цапфами, муфтами тощо), демонструється із використанням сучасних багатоцільових пакетів проектування та аналізу, а саме CAE (Computer-Aided Engineering) системи скінченноелементного аналізу процесів ANSYS APDL/Workbench. Розглянуто усі етапи комп'ютерного аналізу роторної динаміки з урахуванням можливих нелінійностей силових характеристик магнітних підшипників, включаючи особливості геометричного моделювання, застосовні типи скінченних елементів, методи сіткового розбиття з використанням різних видів постановок задач та відповідних їм типів скінченних елементів, побудову розрахункової моделі з граничними умовами та навантаженнями, виведення результатів розрахунку, оцінку якості скінченноелементної моделі та результатів розрахунків. Таке поєднання теоретичних та практичних знань дозволяє підійти до вирішення наукових та прикладних завдань в галузі професійної та дослідницько-інноваційної діяльності та оволодінню сучасними світовими тенденціями розвитку методів комп'ютерного моделювання розглянутого класу об'єктів та процесів, що відбуваються в них.

### **Мета та цілі дисципліни**

Метою викладання дисципліни є: вивчення студентами та формування у них знань за існуючими сучасними підходами про способи, теоретичні методи математичного опису та практичні методики комп'ютерного моделювання за допомогою комп'ютерних CAE-систем інженерного проектування та аналізу динаміки роторів систем та турбомашин різного призначення з акцентом на особливості при наявності магнітних підшипників пасивного та активного типу. Цілями викладання дисципліни є: надання студентам поглиблених знань про способи та програмні засоби розв'язання задач про пошук динамічних характеристик роторних систем з різними типами підшипникових опір (жорстких, пружних, зокрема магнітних) та симуляцію динамічних процесів, що відбуваються в таких системах при різних типах навантаження, зокрема обумовленого власною незрівноваженістю системи. Практичне розв'язання типових задач відбувається із застосуванням сучасного спеціалізованого програмного комплексу моделювання та скінченноелементного аналізу процесів ANSYS APDL/Workbench для з опанування процедури аналізу та симуляції процесів та явищ, яка складається з побудови фізичних моделей реальних об'єктів, геометричного моделювання, створення розрахункових моделей, задання налаштувань розв'язання та самого розв'язання, виведення розв'язку у графічному та текстовому вигляді, оцінки точності чисельних результатів та їх аналізу з перевіркою умов працездатності в залежності від типу аналізу. При розв'язанні більшості таких задач основну трудомісткість займає визначення параметрів, що характеризують стан об'єкту в залежності від постановки задачі та виконаного аналізу, тому підвищена увага приділяється розв'язанню задач на основі методу скінчених елементів. При цьому розглядаються методи пониження розмірності задач за допомогою використання різних типів скінчених елементів, а також за рахунок застосування зосереджених факторів. Перераховані методи та прийоми дослідження параметрів конструкцій та механічних систем демонструються на розв'язанні конкретних задач, що часто зустрічаються на практиці, з використанням інтерактивного режиму роботи програмного комплексу ANSYS APDL/Workbench.

### **Формат занять**

Лекції, лабораторні роботи, розрахункова робота, консультації. Підсумковий контроль – залік.

### **Компетентності**

згідно освітньої програми:

СК1: Здатність розв'язувати задачі й проблеми, які можуть бути формалізовані, потребують оновлення й інтеграції знань, зокрема в умовах неповної інформації;

СК2: Здатність проводити наукові дослідження з розробки нових та адаптації існуючих математичних та комп'ютерних моделей для дослідження різноманітних процесів, явищ і систем, здійснювати відповідні експерименти та аналізувати одержані результати;

СК4: Здатність розробляти та досліджувати математичні та комп'ютерні моделі, проводити обчислювальний експеримент та розв'язувати формалізовані задачі за допомогою спеціалізованих програмних засобів;

СК9: Здатність математично формалізувати постановку наукових та практичних задач, обирати математичний аналітичний або чисельний метод її розв'язання, що забезпечує потрібну точність і надійність результату;

СК10: Здатність розробляти математичні методи та алгоритми комп'ютерного моделювання нелінійних фізичних явищ та процесів в інноваційних технологічних системах;

СК11: Здатність до математичного опису різноманітних динамічних процесів, що можуть відбуватись в системах об'єктів проектування.

## Результати навчання

згідно освітньої програми:

РН4: Будувати математичні моделі складних систем і вибирати методи їх дослідження, реалізувати побудовані моделі програмно та перевіряти їх адекватність за допомогою комп'ютерних технологій;

РН14: Мати знання математично формалізувати постановку наукових та практичних задач, обирати математичний аналітичний або чисельний метод її розв'язання, що забезпечує потрібну точність і надійність результату;

РН17: Володіти знаннями математичного опису різноманітних динамічних процесів, що можуть відбуватись в системах об'єктів проектування.

## Обсяг дисципліни

Загальний обсяг дисципліни 4 кредити / 120 год.: лекції – 32 год., лабораторні роботи – 16 год., самостійна робота – 72 год.

## Передумови вивчення дисципліни (пререквізити)

Вивчення курсу базується на знаннях, отриманих під час проходження бакалаврської освітньої програми за спеціальністю 113 – Прикладна математика, зокрема освітньої програми «Комп'ютерне та математичне моделювання», а саме: поняттях, постановках, підходах та методах математичного аналізу, моделювання, теоретичної і аналітичної механіки, механіки деформівного твердого тіла та теорії коливань, та на відомостях, що розглядаються в дисциплінах навчального плану (ОНП/ОПП): ВВП 3: Дисципліна за профільним спрямуванням «Спеціальні чисельні методи».

## Особливості дисципліни, методи та технології навчання

В рамках авторського курсу «Динаміка роторів у магнітних підшипниках» лекції проводяться інтерактивно з використанням мультимедійних технологій. На лабораторних заняттях застосовується практично-орієнтований підхід до навчання, виконуються загальні та індивідуальні завдання, що дозволяє отримати знання та навички у застосуванні програмних засобів та застосунків для моделювання динамічних лінійних та нелінійних процесів у роторних системах та машинах, а саме динаміки роторів в різних підшипниках, з метою оцінки міцнісного та стійкісного стану цих об'єктів. При проведенні лабораторного практикуму використовується програмне забезпечення, що є вільноліцензованим для навчання (Free Student Software), зокрема студентська версія пакетів ANSYS Mechanical APDL та ANSYS Workbench, що розташована у вільному доступі на сайті компанії ANSYS, Inc. для завантаження.

## Програма навчальної дисципліни

### Теми лекційних занять

**МОДУЛЬ 1. Лекційні заняття (Лк) 2 кредити / 32 год. «ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОЇ І НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ РОТОРІВ У ЖОРСТКИХ, ПРУЖНИХ І МАГНІТНИХ ПІДШИПНИКАХ»**

*(на одному занятті за 2 год. розглядається по 1 темі)*

#### **Тема 1. Вступ до лінійної та нелінійної динаміка роторів.**

1. Історичні основи теорії роторної динаміки. 2. Сучасні роторні машини та системи. 3. Типи підшипникових опор. 4. Підходи до моделювання та аналізу динаміки роторів.

#### **Тема 2. Магнітні підшипники (типи і принцип дії).**

1. Принципи магнітної левітації та типи магнітних підшипників (МП). 2. Пасивні магнітні підшипники (ПМП) на постійних магнітах. 3. Активні магнітні підшипники (АМП). 4. Системи і алгоритми управління АМП. 4. Способи та засоби розрахунку силових і жорсткісних характеристик.

#### **Тема 3. Засоби аналізу динаміки роторів в різних типах підшипникових опор.**

1. Існуючі аналітичні та чисельні підходи до моделювання динаміки роторів в підшипниках різних типів та засоби їх реалізації. 2. Перспективні напрямки наукових досліджень в галузі динаміки роторів в магнітних підшипниках.

#### **Тема 4. Аналіз динаміки роторів в ANSYS APDL/Workbench.**

1. Вступ до аналізу роторної динаміки за допомогою чисельного методу скінченних елементів. 2. Загальні рівняння динаміки. 3. Переваги методу скінченних елементів для моделювання конструкцій, що обертаються. 4. Огляд процесу аналізу роторної динаміки. 5. Інструменти аналізу роторної динаміки. 6. Команди, що використовуються в аналізі роторної динаміки. 7. Скінченні елементи, що використовуються в аналізі роторної динаміки. 8. Термінологія, що використовується в аналізі роторної динаміки (гіроскопічний ефект, вихровий рух - прецесія, еліптична орбіта, стійкість, критична швидкість, карта критичних швидкостей, діаграма Кемпбела).

#### **Тема 5. Аналіз динаміки роторів в ANSYS APDL/Workbench.**

1. Етапи аналізу роторної динаміки. 2. Побудова моделі. 3. Моделювання деталей. 4. Моделювання підшипників з використанням скінченних елементів COMBIN14, COMBI214, FLUID218, MATRIX27 та MPC184, їх призначення, відмінності та налаштування. 5. Поради та приклади з моделювання (додавання нерухомої деталі, перетворення невіесиметричних деталей в еквівалентну вісесиметричну масу, визначення кількох обертових частин, перевірка моделі за допомогою роздруківки зведеної інформації про масу ротора). 6. Застосування навантажень та граничних умов (обмежень) в аналізі роторної динаміки (квазістатичні навантаження, обертові сили в гармонічному аналізі та аналізі перехідних процесів). 7. Розподілені сили, що виникають через дисбаланс моделі твердого тіла або оболонки.

#### **Тема 6. Аналіз динаміки роторів в ANSYS APDL/Workbench.**

1. Розв'язання аналізу роторної динаміки. 2. Додавання демпфування. 3. Задання швидкості обертання та врахування гіроскопічного ефекту. 4. Процедура розв'язання для подальшого аналізу Кемпбелла попередньо напруженої конструкції з використанням лінійного збурення. 5. Виконання гармонічного аналізу з використанням обертових синхронних або асинхронних сил (використання команд OMEGA, CMOMEGA). 6. Вибір відповідного розв'язувача для модального, гармонічного аналізів та для аналізу перехідних процесів. 7. Використання модального аналізу лінійних збурень.

#### **Тема 7. Аналіз динаміки роторів в ANSYS APDL/Workbench.**

1. Постобробка результатів аналізу роторної динаміки (постпроцесінг). 2. Постобробка складних результатів в постпроцесорах POST1 та POST26. 3. Візуалізація, друк характеристик та анімація орбіт після модального чи гармонічного аналізу. 4. Візуалізація орбіт після аналізу перехідних процесів. 5. Постобробка опорних та протидіючих сил в скінченних елементах COMBI214 та FLUID218. 6. Діаграма Кемпбелла (візуалізація еволюції частот зі зміною швидкості обертання, перевірка стійкості та прецесійного обертання в кожному режимі, визначення критичних швидкостей та порогів стійкості).

#### **Тема 8. Побудова аналітичних математичних моделей для опису динаміки жорстких роторів в магнітних підшипниках різних типів.**

1. Опис роторів в магнітних підшипниках як динамічних електромагнітомеханічних систем. 2. Математичний опис динамічної поведінки ротора в МП в залежності від прийнятих спрощень («механічна» частина математичної моделі). 3. Постановка задачі та нелінійні рівняння руху, що описують коливання твердих тіл в потенційному полі сил. 4. Розрахункова схема жорсткого ротора в магнітних підшипниках. 5. Визначення сил інерції. 6. Неінерційні сили, що діють на жорсткий ротор в магнітних підшипниках. 7. Лінеаризовані рівняння руху жорсткого ротора в магнітних підшипниках. 8. Нелінійні рівняння руху жорсткого ротора в магнітних підшипниках.

**Тема 9. Побудова аналітичних математичних моделей для опису динаміки жорстких роторів в магнітних підшипниках різних типів.**

1. Принципи та специфіка математичного опису роторної динаміки при використанні АМП (електромагнітна частина математичної моделі). 2. Недоліки спрощених підходів. 3. Побудова лінеаризованої зв'язаної багатовимірної моделі ротора з керованими електромагнітними підшипниками. 4. Спосіб аналізу електромагнітних кіл активних МП з метою знаходження уточнених аналітичних виразів магнітних енергії і сил.

**Тема 10. Побудова аналітичних математичних моделей для опису динаміки жорстких роторів в магнітних підшипниках різних типів.**

1. Повна нелінійна динамічна модель жорсткого ротора в МП. 2. Загальні принципи формування моделі динаміки жорстких роторів в МП. 3. Особливості математичних моделей при наявності в системі пасивних МП для реалізації комбінованих магнітних підвісів. 4. Методика скінченноелементного розрахунку силових і жорсткісних характеристик пасивних і активних МП з урахуванням закону управління.

**Тема 11. Аналітичні математичні моделі динамічної поведінки гнучких роторів в МП.**

1. Першочерговість і достатність аналізу динаміки жорстких роторів в МП. 2. Особливості побудови математичних моделей гнучких роторів. 3. Комп'ютерні та програмні засоби для розрахунку параметрів МП і роторної динаміки з їх урахуванням.

**Тема 12. Системи управління і контролю динамічних характеристик роторних систем з активними магнітними підшипниками.**

1. Принципи побудови систем управління активними МП. 2. Способи і алгоритми аналогового і дискретного управління. 3. Приклад реалізації способу управління для лабораторної моделі ротора в комбінованому магнітному підвісі. 4. Демонстрація явищ нелінійної роторної динаміки на основі експериментальних досліджень динаміки модельного ротора.

**Тема 13. Динаміка роторів в комбінованому пасивно-активному магнітному підвісі на прикладі модельного ротору.**

1. Лабораторна модель ротору в комбінованому магнітному підвісі. 2. Розрахунок параметрів лінійних коливань ротора. 3. Побудова нелінійної аналітичної моделі, її лінеаризація і визначення власних частот, а також критичних швидкостей обертання. 4. Розв'язання задачі про нелінійну динаміку ротора лабораторної моделі. 5. Побудова нелінійної моделі. 6. Аналіз нелінійної динаміки ротора лабораторної установки. 7. Оцінка стійкості обертового ротора в комбінованому магнітному підвісі

**Тема 14. Приклади розрахунку характеристик та моделювання динаміки роторів енергетичних турбомашин з магнітними підшипниками.**

1. Конструкція ротору детандер-компресорного агрегату (ДКА) в комбінованому магнітному підвісі. 2. Визначення власних частот, а також критичних швидкостей обертання із застосуванням чисельного скінченноелементного підходу. 3. Радіальний пасивний магнітний підшипник для ротора ДКА. 4. Осьовий активний МП для ротора ДКА. 5. Побудова нелінійної аналітичної моделі, її лінеаризація і лінійний аналіз динаміки ротора ДКА. 6. Аналіз нелінійної динаміки ротора ДКА. 7. Оцінка стійкості обертового ротора ДКА в комбінованому магнітному підвісі.

**Тема 15. Приклади розрахунку характеристик та моделювання динаміки роторів енергетичних турбомашин з магнітними підшипниками.**

1. Конструкція ротора енергетичної газотурбінної установки (ГТУ) з активними магнітними підшипниками. 2. Характеристики валопроводу ГТУ. 3. Аналіз лінійних коливань роторів ГТУ із застосуванням чисельного скінченноелементного підходу. 4. Побудова нелінійної аналітичної імітаційної моделі для дослідження динаміки роторів ГТУ в АМП. 5. Аналіз динаміки роторів компресора і генератора ГТУ в АМП на робочих режимах.

**Тема 16. Підсумки курсу «Динаміка роторів у магнітних підшипниках».**

1. Короткий огляд основних моментів курсу (лінійна та нелінійна динаміка роторів різних систем та машин з різними підшипниковими опорами, зокрема пасивними та активними магнітними підшипниками). 2. Резюме до моделювання динамічної поведінки роторів та обчислення характеристик роторної динаміки в САЕ системі ANSYS APDL/Workbench.

## **Теми практичних занять**

Немає.

## Теми лабораторних робіт

**МОДУЛЬ 2. Лабораторні заняття (Лб) 1 кредит / 16 год. «КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОЇ ТА НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ РОТОРІВ В ЖОРСТКИХ, ПРУЖНИХ І МАГНІТНИХ ПІДШИПНИКАХ В САЕ СИСТЕМІ ANSYS APDL/WORKBENCH»**

*(на одному занятті за 2 год. розглядається по 1 темі)*

**Тема 1. Аналіз лінійної та нелінійної динаміки роторів в ANSYS APDL/Workbench:**

**Завдання 1** – Аналіз діаграми Кемпбелла просто опертої балки (валу) в ANSYS APDL/Workbench (Campbell Diagram Analysis of a Simply Supported Beam).

**Тема 2. Аналіз лінійної та нелінійної динаміки роторів в ANSYS APDL/Workbench:**

**Завдання 1** – Гармонічний аналіз незбалансованого ротора. в ANSYS APDL/Workbench (Unbalance Harmonic Analysis).

**Завдання 2** – Визначення гармонічного відгуку валу з диском на базове збудження методом суперпозиції форм. в ANSYS APDL/Workbench (Mode-Superposition Harmonic Response to Base Excitation).

**Тема 3. Аналіз лінійної та нелінійної динаміки роторів в ANSYS APDL/Workbench:**

**Завдання 1** – Аналіз перехідних динамічних процесів вісесиметричного валу складної форми при імпульсному збудженні методом суперпозиції форм в ANSYS APDL/Workbench (Mode-Superposition Transient Response to an Impulse).

**Завдання 2** – Аналіз перехідних динамічних процесів валу з жорстким диском при розгоні від нуля до певної швидкості обертання. в ANSYS APDL/Workbench (Transient Response of a Startup).

**Тема 4. Аналіз лінійної та нелінійної динаміки роторів в ANSYS APDL/Workbench:**

**Завдання 1** – Геометричне моделювання роторів турбомашин і розрахунок масових характеристик навісних елементів для побудови балково- або об'ємно-масових розрахункових моделей роторів.

**Завдання 2** – Створення картки критичної швидкості для восьмиступінчастого відцентрового компресора, що підтримується двома підшипниками з похилими подушками, із застосуванням балково-масової (або об'ємно-масової) розрахункової моделі в ANSYS APDL/Workbench (Critical Speed Map Generation).

**Тема 5. Аналіз лінійної та нелінійної динаміки роторів в ANSYS APDL/Workbench:**

**Завдання 1** – Розрахунок характеристик циліндричного радіального підшипника ковзання в ANSYS APDL/Workbench (Calculation of a Plain Cylindrical Journal Bearing Characteristics).

**Завдання 2** – Розрахунок характеристик підшипникового вузла з демпфуючим пристроєм в ANSYS APDL/Workbench (Calculation of a Squeeze Film Damper Characteristics).

**Завдання 3** – Аналіз перехідних процесів циліндричного підшипника ковзання в ANSYS APDL/Workbench (Transient Analysis of a Plain Cylindrical Journal Bearing).

**Завдання 4** – Аналіз перехідних процесів циліндричного підшипника ковзання (3D-підхід) в ANSYS APDL/Workbench (Transient Analysis of a Plain Cylindrical Journal Bearing (3D Approach)).

**Тема 6. Аналіз лінійної та нелінійної динаміки роторів в ANSYS APDL/Workbench:**

**Завдання 1** – Розрахунок силових характеристик пасивних магнітних підшипників із кільцевих постійних магнітів за допомогою серії аналізів магнітостатики в ANSYS APDL/Workbench.

**Завдання 2** – Розрахунок силових характеристик активних магнітних підшипників із врахуванням закону управління аналітично та за допомогою серії аналізів електромагнітостатики в ANSYS APDL/Workbench.

**Завдання 3** – Аналіз діаграми Кемпбелла та гармонічний аналіз незбалансованого ротора турбодетандера в пасивних радіальних і активному осьовому підшипниках в ANSYS APDL/Workbench.

**Тема 7. Підсумки курсу «Динаміка роторів у магнітних підшипниках»:**

*Модульний контроль №1.* Комп'ютерний тест (40 випадкових коротких запитань), присвячений теоретичним основам математичного моделювання явищ динаміки роторів в жорстких, пружних та магнітних підшипниках та її чисельному аналізу в САЕ системі ANSYS APDL/Workbench.

**Тема 8. Підсумки курсу «Динаміка роторів у магнітних підшипниках»:**

*Модульний контроль №2.* Презентація та захист індивідуального розрахункового завдання, присвяченого аналізу динаміки одного з варіантів конструкцій роторів в ANSYS APDL/Workbench.

## Самостійна робота

1. Основні поняття, рівняння та методи теорії вимушених лінійних та нелінійних коливань дискретних систем при розв'язанні задач різних класів при різних видах динамічного навантаження – 12 год.

2. Основні поняття, рівняння та методи теорії електромагнетизму та методика виконання аналізу магнітостатики (Magnetostatic Analysis) в ANSYS APDL/Workbench – 11 год.
3. Основні поняття, рівняння та методи теорії керування – 11 год.
4. Забезпечення аудиторних занять (опрацювання лекційного матеріалу та оформлення звітів за результатами лабораторних робіт) – 16 год.
5. Забезпечення індивідуальних завдань (виконання індивідуального розрахункового завдання та його оформлення) – 12 год.
6. Забезпечення семестрового контролю (підготовка до модульного контролю) – 10 год.

## Література та навчальні матеріали

### Основна література

1. Мартиненко Г.Ю. Динаміка роторів турбомашин в пасивних і активних магнітних підшипниках: дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.02.09 : галузь знань 13. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків, 2018. 601 с. (<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/38023>)
2. Симоновський В.І. Динаміка роторних машин: конспект лекцій. Суми: Сумський державний університет, 2011. 119 с. (<https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/.../Simonovs.pdf>)
3. Matsushita O., Tanaka M., Kanki H., Kobayashi M., Keogh P. Vibrations of Rotating Machinery: Volume 1. Basic Rotordynamics: Introduction to Practical Vibration Analysis. Springer Japan, Tokyo, 2017 (<https://books.google.co.ve/books?id=wNQkDwAAQBAJ&printsec...>).
4. Matsushita O., Tanaka M., Kanki H., Kobayashi M., Keogh P. Vibrations of Rotating Machinery: Volume 2. Advanced Rotordynamics: Applications of Analysis, Troubleshooting and Diagnosis. Springer Japan, Tokyo, 2019.
5. Schweitzer G., Maslen E.H. eds. Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery. Springer, 2009. (<https://books.google.co.ve/books?id=1Kyg5dWYBasC&printsec...>)
6. Lee H.H. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2021.-SDC Publications, 2021. (<https://www.sdcpublications.com/Textbooks/Finite-Element-Simulations-ANSYS-Workbench/ISBN/978-1-63057-456-7/>)
7. Мартиненко Г.Ю., Розова Л.В. Комп'ютерне моделювання елементів конструкцій та визначення їх міцності при статичних навантаженнях: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», ТОВ «Естет Принт», 2021. 242 с. (<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/54247>)
8. ANSYS 2023R1. Mechanical User's Guide. ANSYS Inc., Southpointe, 2600 Ansys Drive, Canonsburg, PA 15317, 2023. (Magnetostatic Analysis) ([https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v231/en/pdf/Workbench\\_Users\\_Guide.pdf](https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v231/en/pdf/Workbench_Users_Guide.pdf))
9. Rotordynamic Analysis Guide. ANSYS, Inc., 2023, Southpointe, 2600 Ansys Drive, Canonsburg, PA 15317. (<http://www.ansys.com>)
10. Дубенець В.Г., Хільчевський В.В., Савченко О.В. Основи методу скінченних елементів: навч. посіб. Чернігів: ЧДТУ, 2007. 288 с. ([http://ir.stu.cn.ua/jspui/.../Основи\\_методу\\_скінченних\\_елементів.pdf](http://ir.stu.cn.ua/jspui/.../Основи_методу_скінченних_елементів.pdf))
11. Прокопенко Ю.В., Татарчук Д.Д., Казміренко В.А. Обчислювальна математика: навч. посіб. К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2003. 120 с. (<http://kist.ntu.edu.ua/textPhD/matem.pdf>)

### Додаткова література

1. Васильків В.В., Данильченко Л.М., Радик Д.Л., Дивдик О.В. Інженерний аналіз в Ansys Workbench. Тернопіль : Вид-во ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2021. 58 с. ([https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/35162/1/Metod\\_Ansys\\_2021.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/35162/1/Metod_Ansys_2021.pdf))
2. Бабенко А.Є., Боронко О.О., Лавренко Я.І., Трубочев С.І. Коливання неконсервативних механічних систем: монографія. Київ: Нац.техн.ун-т України «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2020. 153 с. (<https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38187/1/Kolyvanniia.pdf>)
3. Воробйов В.В., Воробйова Л.Д., Коба С.П. Основи прикладної теорії коливань: підручник. Кременчук, 2020. 156 с. ([http://document.kdu.edu.ua/metod/2020\\_2201.pdf](http://document.kdu.edu.ua/metod/2020_2201.pdf))
4. Соколов С.В., Писаренко Л.Д., Журба В.О. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ: навч. посіб. / за заг. ред. Г.С. Воробйова. Суми: Сумський державний університет, 2011. 393 с. (<https://core.ac.uk/download/pdf/324275564.pdf>)
5. Лімонов О.С. Теорія електромагнітного поля: конспект лекцій. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2011. 140 с. ([http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/850/1/LimonovOS\\_Radiometeorolohichnyy\\_monitorynh\\_KL\\_2011.pdf](http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/850/1/LimonovOS_Radiometeorolohichnyy_monitorynh_KL_2011.pdf))

6. Бахрушин В.Є., Огаренко Т.Ю. Теорія керування: навч. посіб. Запоріжжя: КПУ, 2014. 224 с. ([https://www.researchgate.net/profile/Vladimir-Bakhrushin/publication/288835039\\_Theory\\_of\\_Control/.../Theory-of-Control-in-Ukrainian-Teoria-keruvanna.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vladimir-Bakhrushin/publication/288835039_Theory_of_Control/.../Theory-of-Control-in-Ukrainian-Teoria-keruvanna.pdf))
7. Корнієнко В.І., Гусєв О.Ю., Герасіна О.В., Щокін В.П. Теорія систем керування: підручник. Дніпро: НГУ, 2017. 497 с. (<https://core.ac.uk/reader/168413410>)
7. Новицький І.В., Ус С.А. Сучасна теорія керування: навч. посіб. Дніпро: НГУ, 2017. 263 с. (<https://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/150797/1/CD942.pdf>)
8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. and Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Butterworth-Heinemann, Sixth edition, 2013. 802 p.
9. Ansys Student - Free Software Download. ANSYS, Inc., 2023. URL: <https://www.ansys.com/academic/students>

## Система оцінювання

### Критерії оцінювання успішності студента та розподіл балів

*Змістовий модуль 1 (Лк)* – максимум 50 балів: комп'ютерний тест (40 випадкових коротких запитань з 4 варіантами відповідей, з яких 1 вірна – 1,25 бал за кожну правильну відповідь) або екзамен (2 теоретичні розгорнуті питання з теоретичних основ та практичного моделювання динаміки роторів в різних, зокрема магнітних підшипниках – максимум 25 балів за правильну відповідь на кожне з двох питань).

*Змістовий модуль 2 (Лб)* – максимум 50 балів: 14 завдань лабораторних робіт (максимум 3,0 балів за кожне виконане та здане завдання лабораторних робіт) та 1 індивідуальне розрахункове завдання (максимум 8,0 балів за виконане та захищене розрахункове завдання).

*Загалом* – максимум 100 балів.

### Шкала оцінювання

Сума балів	Національна оцінка	ECTS
90–100	Відмінно	A
82–89	Добре	B
75–81	Добре	C
64–74	Задовільно	D
60–63	Задовільно	E
35–59	Незадовільно (потрібне додаткове вивчення)	FX
1–34	Незадовільно (потрібне повторне вивчення)	F

## Норми академічної етики і політика курсу

Студент повинен дотримуватися «Кодексу етики академічних взаємовідносин та доброчесності НТУ «ХПІ»: виявляти дисциплінованість, вихованість, доброзичливість, чесність, відповідальність. Конфліктні ситуації повинні відкрито обговорюватися в навчальних групах з викладачем, а при неможливості вирішення конфлікту – доводитися до відома співробітників дирекції інституту. Нормативно-правове забезпечення впровадження принципів академічної доброчесності НТУ «ХПІ» розміщено на сайті: <http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/nv/akademichna-dobrochesnist/>

## Погодження

Силабус погоджено

Дата погодження  
30.08.2023

Завідувач кафедри  
Олексій ВОДКА

Дата погодження  
30.08.2023

Гарант ОПП (1 рік 4 місяці)  
Олексій ЛАРІН

Гарант ОНП (1 рік 9 місяців)  
Геннадій МАРТИНЕНКО