



МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Другий (магістерський)</i>
Галузь знань	<i>G «Інженерія, виробництво та будівництво»</i>
Спеціальність	<i>G3 «Електрична інженерія»</i>
Освітня програма	<i>ОПП Електричні машини і апарати (electric machines and apparatus)</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>I курс, 2 семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>150 годин / 5 кредити ECTS</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Екзамен/РГР/МКР</i>
Розклад занять	<i>http://rozklad.kpi.ua</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: д.т.н., проф. Васьковський Юрій Миколайович, тел. 0501022010 Практичні: проф. Васьковський Юрій Миколайович</i>
Розміщення курсу	<i>Посилання на дистанційний ресурс Moodle https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=3943</i>

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Програму навчальної дисципліни «Моделювання фізичних процесів і електричних машинах» складено відповідно до Освітньо-професійної програми другого (магістерського) рівня вищої освіти підготовки магістрів професійного спрямування за спеціальністю G3 «Електрична інженерія» та освітньою програмою «Електричні машини і апарати».

Метою навчальної дисципліни є формування та закріплення у студентів наступних **компетентностей**:

Загальні компетентності:

ЗК01. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

ЗК03. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ЗК05. Здатність приймати обґрунтовані рішення.

ЗК06. Здатність вчитися та оволодівати сучасними знаннями.

ЗК07. Здатність працювати в команді.

ЗК08. Здатність працювати автономно.

Фахові компетентності:

ФК4. Здатність демонструвати знання і розуміння математичних принципів і методів, необхідних для використання в електричній інженерії.

ФК 12. Здатність до виконання дослідно-конструкторських робіт, що передбачають розробку нових та модернізацію існуючих електричних машин та апаратів різного типу і призначення.

ФК 15. Здатність моделювати та досліджувати за допомогою сучасних програмних та апаратних засобів характеристики фізичних (електромагнітних, теплових, вібраційних тощо) полів в електричних машинах і апаратах.

ФК 18. Здатність до критичного аналізу та оцінки сучасних світових науково-технічних досягнень в сфері електричних машин та апаратів та прогноз створення та розвитку нових ефективних технічних рішень.

Предметом навчальної дисципліни є сукупність математичних методів для визначення на основі теорії мультифізичних процесів параметрів та експлуатаційних характеристик сучасних електричних машин, методи їх дослідження та розрахунку.

Програмні результати навчання:

ПРО7. Здійснювати математичний аналіз взаємопов'язаних фізичних процесів різної природи в електроенергетичному, електротехнічному та електромеханічному обладнанні, комплексах і системах.

ПРО9. Уміти оцінювати енергоефективність та надійність роботи електромеханічних систем за результатами математичного моделювання.

ПРО19. Застосовувати придатні емпіричні і теоретичні методи для зменшення втрат електричної енергії при її виробництві, транспортуванні, розподіленні та використанні.

ПРО23. Застосовувати сучасні методи дослідження електричних машин і апаратів, потужних електромеханічних перетворювачів енергії різного типу, електромеханічних комплексів.

ПРО 24. Планувати і виконувати типові науково-дослідні задачі щодо дослідження та розробки сучасних електричних машин, критично аналізувати результати власної інженерно-технічної діяльності у контексті усього комплексу сучасних знань щодо мультифізичних методів аналізу електричних машин.

ПРО25. Розуміти особливості фізичних процесів та відповідних математичних моделей в електричних машинах і апаратах при наявності ушкоджень конструкції з метою виявлення та діагностики ушкоджень.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Пререквізити: успішне засвоєння дисципліни базується на знаннях, отриманих студентом під час вивчення таких дисциплін, як «Фізика», «Вища математика», «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні машини», «Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії».

Постреквізити: В структурно-логічній схемі навчального плану підготовки магістрів дисципліна «Математичне моделювання фізичних процесів в електричних машинах» забезпечує подальше вивчення дисциплін на третьому рівні вищої освіти – доктор філософії (PhD).

3. Зміст навчальної дисципліни

Дисципліна структурно складається з 4-х змістовних модулів, а саме:

Змістовий модуль 1. Класифікація і особливості фізичних процесів різної природи в електротехнічних і електромеханічних пристроях.

Тема 1.1. Загальна характеристика фізичних явищ і процесів, що супроводжують функціонування електротехнічних і електромеханічних пристроїв. Класифікація фізичних явищ – електричні, електромагнітні, теплові, термомеханічні, вібраційні, тощо.

Тема 1.2. Взаємний вплив фізичних процесів різної природи на характеристики електричних машин.

Змістовий модуль 2. Математичні моделі фізичних процесів в електротехнічних і електромеханічних пристроях і їх класифікація.

Тема 2.1. Класифікація математичних моделей на основі різних теоретичних засад: ланцюгові, польові, коло-польові та мультифізичні математичні моделі.

Тема 2.2. Системи рівнянь та постановка задач розрахунку фізичних процесів різної природи в електричних машинах та апаратах. Обґрунтування достовірних припущень при визначенні характеристик об'єкту досліджень.

Тема 2.3. Мультифізичний аналіз взаємопов'язаних фізичних процесів в електротехнічних і електромеханічних пристроях.

Тема 2.4. Приклади мультифізичного моделювання: електромагнітні і теплові процеси в масивному роторі електричної машини, електромагнітні і теплові процеси в демпферній системі ротора потужного гідрогенератора.

Змістовий модуль 3. Математичні моделі фізичних процесів в електричних машинах, що мають ушкодження конструкції.

Тема 3.1 Математичні моделі фізичних процесів в електричних машинах при наявності ушкодження обмотки ротора короткозамкненого асинхронного двигуна.

Тема 3.2. Математичні моделі фізичних процесів в електричних машинах при наявності ексцентриситету ротора.

Змістовий модуль 4. Сучасні програмно-обчислювальні комплекси для розв'язання математичних моделей фізичних процесів.

Тема 4.1. Огляд сучасних програмно-обчислювальних комплексів.

Тема 4.2. Приклади використання комплексів Matlab – Simulink і Comsol Multiphysics для вирішення мультифізичних ланцюгових і польових моделей.

Навчальні матеріали та ресурси

Основні інформаційні ресурси:

1. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. Навчальний посібник для вузів з грифом МОН України, Київ, НТУУ “КПІ”, ВПІ ВПК “Політехніка”2007, 191с.
2. Віктор П. А. Том 3. Основи електродинаміки. – Book Chef, 2021. – 496 с.
3. Васьковський Ю.М., Гайденок Ю.А., Коваленко М.А. Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами. Навчальний посібник з грифом Вченої Ради КПІ, Київ, наш формат, 2017, 192 с
4. Мілих В.І. Електромагнітні поля, параметри та процеси в електротехнічних пристроях. Підручник. – Харків, 2020. – 396 с.
5. Васьковський Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії. Навчальний посібник для вузів з грифом МОН України, Київ, НТУУ “КПІ, ФЕА, 2013, 164с.
6. Подольцев А.Д., Кучерява И.Н. Мультифізичне моделювання в електротехніці. – Київ, Наш формат, 2015. – 306 с.
7. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделювання електромеханічних систем. Підручник.– Кременчук, 2011. – 410 с.
8. Курс: Технічна електродинаміка (kpi.ua) <https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=3942>
9. COMSOL – MULTIPHYSICS – <http://www.comsol.com>

Додаткові інформаційні ресурси:

10. Васьковський, Ю. і Мельник, А. 2019. Електромагнітні віброзбуджуючі сили у потужних дво- та чотириполюсних турбогенераторах АЕС України. Технічна Електродинаміка. 2019, 3 (Квітень 2019), 060. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2019.03.060>.
11. Васьковський, Ю. і Райчев, П. 2021. Еволюція електромагнітних рейкових прискорювачів. Технічна Електродинаміка. 1 (Січень 2021), 023. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2021.01.023>.
12. Васьковський, Ю. і Татарінов, К. 2022. Зовнішня демпферна система ротора

явнополюсної синхронної машини. *Технічна Електродинаміка*. 6 (Жов 2022), 019. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2022.06.019>.

13. Васьковський, Ю. і Павлюк, В. 2023. Порівняльний аналіз енергетичних характеристик різних типів синхронних тягових електродвигунів. *Технічна Електродинаміка*. 4 (Чер 2023), 043. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.04.043>.
14. Васьковський, Ю. і Гераскін, О. 2021. Вплив режимних і експлуатаційних факторів на демпферну систему ротора явнополюсної синхронної машини. *Технічна Електродинаміка*. 2 (Лют 2021), 047. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2021.02.047>.
15. Васьковський, Ю. і Пода, М. 2021. Моделювання процесів енергоперетворення в системі рекуперації енергії коливань транспортних засобів. *Технічна Електродинаміка*. 4 (Чер 2021), 035. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2021.04.035>.

Навчальний контент

4. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття:

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (посилання на літературу та завдання на СРС)
1	Лекція 1. Загальна характеристика фізичних явищ і процесів, що супроводжують функціонування електротехнічних і електромеханічних пристроїв. Класифікація фізичних явищ – електричні, електромагнітні, теплові, термомеханічні, вібраційні, тощо. Література: [1 - 7, Вступ]. Завдання на СРС: Фізичні явища в природі і техніці.
2	Лекція 2. Взаємний вплив фізичних процесів різної природи на характеристики електричних машин. Література : [1, с.13 - 46]. Завдання на СРС: Умови, при яких взаємним впливом фізичних процесів різної природи можна нехтувати.
3	Лекція 3. Класифікація математичних моделей на основі різних теоретичних засад: ланцюгові, польові, коло-польові та мультифізичні математичні моделі. Завдання на СРС: Визначення просторового розміру фізичного поля: двох - і тривимірні поля. Література: [1,с.40 - 79], [6, с.6 - 31].
4	Лекція 4 Системи рівнянь та постановка задач розрахунку електромагнітних процесів в електричних машинах та пристроях. Література: [1] с. 38 - 43. Завдання на СРС: Визначення основних електрофізичних параметрів середовищ.
5	Лекція 5. Системи рівнянь та постановка задач розрахунку теплових процесів в електричних машинах та пристроях. Література: [1], с. 43 - 45. Завдання на СРС: Визначення основних теплофізичних параметрів середовищ.
6	Лекція 6. Мультифізичні математичні моделі взаємопов'язаних фізичних процесів. Аналогія математичного запису рівнянь фізичних процесів різної природи. Література: [1], с .50-56. Завдання на СРС: Алгоритми формування мультифізичної ланцюгової

	математичної моделі.
7	Лекція 7. Приклад мультифізичного моделювання: аналіз електромагнітних і теплових процесів в масивному роторі електричної машини. Література: [1] с. 37- 43. Завдання на СРС: Особливості конструкції та робочих процесів в електричних машинах з масивним ротором.
8	Лекція 8. Приклад мультифізичного моделювання: електромагнітні і теплові процеси в демпферній системі ротора потужного гідрогенератора. Література: [12, 14]. Завдання на СРС: Способи теплообміну в електричних машинах.
9	Лекція 9. Аналітичні і чисельні методи розв'язання математичних моделей. Загальна характеристика і приклади. Література: [6] с. 43- 61. Завдання на СРС: Переваги аналітичних методів моделювання.
10	Лекція 10. Математичні моделі фізичних процесів в електричних машинах при наявності ушкоджень конструкції. Ушкодження обмотки ротора короткозамкненого асинхронного двигуна. Література: [10]. Завдання на СРС: Способи ефективної візуалізації розрахункової картини поля на моніторі ПК.
11	Лекція 11. Математичні моделі фізичних процесів в електричних машинах при наявності ушкоджень конструкції. Моделювання ексцентриситету ротора. Література: [12, 14] с. 61 - 78. Завдання на СРС: Статичний і динамічний ексцентриситет.
12	Лекція 12. Обґрунтування методів діагностики ушкоджень електричних машин на основі результатів математичного моделювання. Приклади створення бази знань. Література: [8] с. 41 - 69. Завдання на СРС: Переваги методу інтегральних рівнянь.
13	Лекція 13. Огляд та характеристика сучасних програмно-обчислювальних комплексів математичного моделювання фізичних полів. Література: [1] с. 73 - 85. Завдання на СРС: Класифікація програмно-обчислювальних комплексів
14	Лекція 14. Використання комплексу Matlab – Simulink для вирішення мультифізичних ланцюгових моделей. Література: [9]. Завдання на СРС: інтерфейс програми Matlab – Simulink
15	Лекція 15. Використання комплексу Comsol Multiphysics для вирішення мультифізичних польових моделей. Література: [9]. Завдання на СРС: Інтерфейс програми Comsol Multiphysics.
	Усього годин 30

Практичні заняття: Практичні заняття дозволяють розвинути і закріпити у студентів теоретичні знання, набуті при вивченні лекційного курсу, а також отримати практичні навички щодо розрахунків параметрів, характеристик і режимів роботи електричних машин методами теорії електромагнітного поля. В ході виконання завдань студенти навчаються робити чисельні оцінки параметрів машин, вивчають та засвоюють методологію практичного використання сучасних обчислювальних програм та комп'ютерних комплексів.

Теми практичних занять:

№ з/п	Назва теми і зміст практичного заняття	Кількість аудитор. годин
1	Заняття 1. Взаємний вплив фізичних процесів різної природи. Аналіз взаємного впливу фізичних процесів на характеристики електротехнічних пристроїв Література: [7] с. 15 - 19	2
2	Заняття 2. Системи рівнянь та постановка задач розрахунку фізичних процесів різної природи в електричних машинах та пристроях. Формулювання математичних моделей. Література: [1] с.20-46, [7] с.19 – 25.	2
3	Заняття 3. Обґрунтування достовірних припущень при визначенні характеристик об'єкту досліджень. Аналіз впливу припущень на математичного результати моделювання Література: [1] с.47-55.	2
4	Заняття 4, 5. Приклад мультифізичного моделювання: аналіз електромагнітних і теплових процесів в масивному роторі електричної машини.	4
5	Заняття 6,7. Приклад мультифізичного моделювання: термомеханічні напруження в елементах електричних машин і апаратів при протіканні великих струмів навантаження.	4
6	Заняття 8,9. Приклад мультифізичного моделювання: електромагнітні і теплові процеси у рейковому прискорювачі.	4
7	Заняття 10. Модульна контрольна робота.	2
8	Заняття 11,12. Приклади математичного моделювання фізичних процесів в електричних машинах при наявності ушкоджень конструкції.	4
9	Заняття 13,14. Приклади використання комплексів Matlab – Simulink і Comsol Multiphysics для вирішення мультифізичних ланцюгових і польових моделей. Література: [11]	4
10	Заняття 15. Захист РГР	2
	Усього годин	30

Самостійна робота студента: В таблиці наведено основні завдання, що виносяться на самостійну роботу студентів

№ з/п	Назва теми, що виносяться на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
1	Завдання для СРС 1. Фізичні явища в природі і техніці.	2
2	Завдання для СРС 2. Основні фізичні явища в електричних машинах.	2
3	Завдання для СРС 3. Умови, при яких взаємним впливом фізичних процесів різної природи можна нехтувати.	4
4	Завдання для СРС 4. Визначення просторового розміру фізичного поля: дво- і тривимірні поля.	4
5	Завдання для СРС 5. Визначення основних електрофізичних параметрів середовищ.	4
6	Завдання для СРС 6. Визначення основних теплофізичних	4

	параметрів середовищ.	
7	Завдання для СРС 7. Вплив припущень математичної моделі на точність моделювання.	3
8	Завдання для СРС 8. Алгоритми формування мультифізичної ланцюгової математичної моделі.	2
9	Завдання для СРС 9. Алгоритми формування мультифізичної польової математичної моделі.	2
10	Завдання для СРС 10. Особливості конструкції та робочих процесів в електричних машинах з масивним ротором.	2
11	Завдання для СРС 11. Способи теплообміну в електричних машинах.	2
12	Підготовка до модульної контрольної роботи	2
13	Завдання для СРС 13. Способи ефективної візуалізації розрахункової картини поля на моніторі ПК.	2
14	Завдання для СРС 14. Статичний і динамічний ексцентриситет	2
15	Завдання для СРС 15. Класифікація програмно-обчислювальних комплексів моделювання. Інтерфейс програм.	2
16	Виконання РГР	15
17	Підготовка до екзамену	36
Усього годин		90

Розрахунково-графічна робота. Для закріплення та узагальнення отриманих знань з питань математичного моделювання фізичних процесів в електричних машинах студенти виконують індивідуальне семестрове завдання – розрахунково-графічну роботу (РГР). Тема РГР: «Розрахунок глибини проникнення електромагнітного поля в електропровідне середовище при варіації електрофізичних параметрів середовища». Варіант вхідних даних узгоджується та надається викладачем.

Модульна контрольна робота. Для одержання студентами стійких знань передбачено виконання модульної контрольної роботи, на яку виносяться основні питання дисципліни.

Політика та контроль

5. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- правила відвідування занять: відповідно до Наказу 1-273 від 14.09.2020 р. заборонено оцінювати присутність або відсутність здобувача на аудиторному занятті, в тому числі нараховувати заохочувальні або штрафні бали. Відповідно до РСО даної дисципліни бали нараховують за відповідні види навчальної активності на лекційних та практичних заняттях.

- правила поведінки на заняттях: студент має можливість отримувати бали за відповідні види навчальної активності на лекційних та практичних заняттях, передбачені РСО дисципліни. Використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача, в інтернеті, в дистанційному курсі на платформі Сікорський здійснюється за умови вказівки викладача;

- політика дедлайнів та перескладань: якщо студент не проходив або не з'явився на МКР (без поважної причини), його результат оцінюється у 0 балів. Перескладання результатів МКР не передбачено;

- політика щодо академічної доброчесності: Кодекс честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» <https://kpi.ua/files/honorcode.pdf>

встановлює загальні моральні принципи, правила етичної поведінки осіб та передбачає політику академічної доброчесності для осіб, що працюють і навчаються в університеті, якими вони мають керуватись у своїй діяльності, в тому числі при вивченні та складанні контрольних заходів з даної дисципліни;

• при використанні цифрових засобів зв'язку з викладачем (мобільний зв'язок, електронна пошта, переписка на форумах та у соцмережах тощо) необхідно дотримуватись загальноприйнятих етичних норм, зокрема бути ввічливим та обмежувати спілкування робочим часом викладача.

6. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Поточний контроль: експрес-опитування, МКР, РГР.

Календарний контроль: провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестровий контроль: екзамен.

Рейтингова система оцінювання результатів навчання студентів передбачає визначення кількості балів, отриманих студентом під час вивчення дисципліни.

Умови допуску до семестрового контролю: поточний семестровий рейтинг повинен складати не менше 30 балів.

Поточний семестровий рейтинг студента складається з балів, отриманих за:

- відповіді під час проведення експрес-опитувань на лекціях – 3 опитування;
- виконання модульної контрольної роботи (МКР);
- виконання розрахунково-графічної роботи (РГР);

Система стартових рейтингових балів та критерії оцінювання

1. Відповіді при експрес-опитуваннях на практичних заняттях

Ваговий бал - 4. Максимальна кількість балів за всі відповіді дорівнює $4 \times 3 = 12$ балів.

Повна та докладна відповідь з невеликими помилками	8 ...12
Неточна відповідь, або відповідь з суттєвими помилками	2.. .7
Неправильна відповідь	0

2. Індивідуальне семестрове завдання (РГР)

Згідно з робочою навчальною програмою студент виконує РГР.

Максимальна кількість балів за виконання РГР дорівнює 30 балів.

Критерії оцінювання

- повне і вчасне виконання – 27 ... 30 балів (в залежності від якості оформлення);
- є окремі несуттєві помилки – 20...26 балів;
- є суттєві помилки – 2...19 балів;
- неправильне виконання РГР – 0 балів;
- на виконання РГР відводять 8 тижнів з моменту видачі завдання; задача РГР після встановленого терміну передбачає зниження оцінки - 2 бали за кожен тиждень понад встановлений термін.

3. Модульний контроль

Ваговий бал - 18. Максимальна кількість балів за МКР дорівнює $1 \times 18 = 18$ балів.

Повне виконання (більше 90% матеріалу)	18
Відповіді неповні (від 50 до 90% матеріалу)	10... 17
Відповіді з суттєвими похибками	4...9
Відповіді неправильні	0

Оцінювання проводиться за стобальною рейтинговою шкалою $R_D = 100$.

Сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру (стартовий рейтинг) складає: $R_C = 12 + 30 + 18 = 60$ балів.

Форма семестрового контролю – екзамен

Остаточне оцінювання результатів навчання проводиться за стобальною рейтинговою шкалою. Екзаменаційна складова шкали дорівнює 40% від загальної рейтингової шкали, тобто

$R_e = 40$ балів. Необхідною умовою допуску до екзамену є повний конспект лекцій, виконана МКР. Для здачі екзамену без проведення семестрового контролю («автоматом») потрібно мати стартовий рейтинг не менше 60 балів, а також виконані інші умови допуску до екзамену. Екзаменаційна робота складається з двох теоретичних запитань і однієї задачі

Критерії оцінювання екзамену

- повна відповідь (повне, безпомилкове розв'язування завдання) $R_3 = 39 - 40$ балів;
- відповідь з певними несуттєвими помилками $R_3 = 30 - 38$ бали;
- відповідь без суттєвих помилок, але не з повним обсягом потрібної інформації $R_3 = 20 - 29$ бали;
- неповна відповідь з певними помилками $R_3 = 12 - 19$ балів;
- неповна відповідь зі значною кількістю помилок, але які не є принциповими $R_3 = 8 - 11$ балів;
- повністю неправильна відповідь або відсутність відповіді – 0 балів.

Сумарна кількість рейтингових балів визначається як $R_p = R_c + R_e$

Таблиця відповідності сумарних рейтингових балів оцінкам за наступною шкалою:

Сумарна кількість балів R_p	Оцінка	Результат
95-100	Відмінно	Екзамен здано
85-94	Дуже добре	
75-84	Добре	
65-74	Задовільно	
60-64	Достатньо	
Менше 60	Незадовільно	Екзамен не здано
Менше 30	Не допущений	До екзамену не допущений

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено професором кафедри електромеханіки ФЕА, д.т.н. Васьковським Ю.М.

Ухвалено кафедрою електромеханіки ФЕА (протокол № 16 від 25.06.2025 р.)

Погоджено Методичною комісією факультету (протокол № 6 від 27.06.2025 р.)