



МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВИМІРНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>14 «Електрична інженерія»</i>
Спеціальність	<i>141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»</i>
Освітня програма	<i>Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси</i>
Статус дисципліни	<i>За вибором</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>IV курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>4 кредити ECTS / 120 годин: Аудиторних – 72 год: лекції – 36 годин; лабораторні роботи – 36 годин; самостійна робота – 48 години</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік / МКР</i>
Розклад занять	<i>1 лекція (2 години) 1 раз на тиждень; 1 лабораторна робота (2 години) 1 раз на тиждень</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лекції: д.т.н. Щерба Максим Анатолійович, e-mail: m.shcherba@gmail.com, telegram: @m_shcherba Лабораторні: д.т.н. Щерба Максим Анатолійович, e-mail: m.shcherba@gmail.com, telegram: @m_shcherba</i>
Розміщення курсу	<i>Матеріали до курсу розміщені на сайті https://do.ipu.kpi.ua/course/view.php?id=6404</i>

Програма навчальної дисципліни

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

Програму навчальної дисципліни «Моделювання тривимірних електромагнітних полів» складено відповідно до освітньо-професійної програми підготовки бакалавра з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Метою навчальної дисципліни є поглиблення у студентів наступних компетентностей: **K01.** Здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу; **K06.** Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми; **K12.** Здатність вирішувати практичні задачі із залученням методів математики, фізики та електротехніки; **K16.** Здатність вирішувати комплексні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з проблемами виробництва, передачі та розподілення електричної енергії; **K20.** Усвідомлення необхідності постійно розширювати власні знання про нові технології в електроенергетиці, електротехніці та електромеханіці.

Предметом дисципліни є основні закони електромагнетизму, теорії поля і відповідний математичний апарат для розрахунку статичних, стаціонарних та змінних тривимірних електричних і магнітних полів в різних середовищах.

Програмний результат навчання на покращення якого спрямована дисципліна: **ПРО5**. Знати основи теорії електромагнітного поля, методи розрахунку електричних кіл та уміти використовувати їх для вирішення практичних проблем у професійній діяльності.

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

Для успішного засвоєння дисципліни студент повинен володіти теоретичною базою дисциплін «Вища математика», «Фізика», «Обчислювальна техніка та програмування», «Теоретичні основи електротехніки».

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Моделювання тривимірного електростатичного поля

Тема 1.1. Методи розрахунку тривимірних електромагнітних полів

Тема 1.2. Моделювання тривимірного електростатичного поля

Тема 1.3. Моделювання практичних ситуацій наявності електростатичного поля

Розділ 2. Моделювання тривимірного стаціонарного електромагнітного поля

Тема 2.1. Методи розрахунку тривимірного електричного поля постійного струму

Тема 2.2. Методи розрахунку тривимірного магнітного поля постійного струму

Тема 2.3. Моделювання практичних ситуацій стаціонарного електромагнітного поля

Розділ 3. Моделювання тривимірного змінного електромагнітного поля

Тема 3.1. Моделювання тривимірного змінного електромагнітного поля в діелектрику

Тема 3.2. Моделювання тривимірного змінного електромагнітного поля в провідному середовищі

Тема 3.3. Розрахунок передачі енергії в електромагнітному полі

4. Навчальні матеріали та ресурси

1. Основи теорії електромагнітного поля: Курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського, уклад.: Л.Ю. Спінул. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 102 с.
2. Фундаментальні основи теорії електромагнітного поля та процесів: Практикум. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для аспірантів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. М.Я. Островерхов. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 101 с.
3. Чисельні методи розв'язання прикладних задач : навч. посіб. / О. А. Гончаров, Л. В. Васильєва, А. М. Юнда. Суми : Сумський державний університет, 2020. 142 с. ISBN 978-966-657-828-3
4. Чисельні методи: Навчальний посібник. / Волонтир Л.О, Зелінська О.В., Потапова Н.А., Чіков І.А., Вінницький національний аграрний університет. Вінниця: ВНАУ, 2020 322 с. ISBN 978-617-7789-18-4
5. Диференціальні рівняння. Навчальний посібник для інженерних спеціальностей [Електронний ресурс]: навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: І.М. Копась. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 126 с.
6. Теоретичні основи електротехніки – 1. Електричні кола постійного та змінного струму. Чотириполюсники. Практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: А. А. Щерба, Ю. В. Перетятко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 116 с.

7. Теоретичні основи електротехніки – 2. Нелінійні системи. Перехідні процеси. Практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ю. В. Перетятко, А. А. Щерба – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 142 с.
8. Теоретичні основи електротехніки-3. Нелінійні кола. Основи теорії електромагнітного поля. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л. Ю. Спінул, М. П. Бурик. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 192 с.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на інформаційні джерела)
Розділ 1. МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВИМІРНОГО ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ	
Тема 1.1. Методи розрахунку тривимірних електромагнітних полів	
1.	Методи розрахунку тривимірних електромагнітних полів Рівняння електромагнітного поля в інтегральній та диференціальній формі. Граничні умови та матеріальні рівняння. Чисельні методи вирішення систем диференціальних рівнянь, метод скінчених елементів. Багатомасштабне моделювання.
Тема 1.2. Моделювання тривимірного електростатичного поля	
2.	Основні підходи до розрахунку Основні рівняння. Потенціал, градієнт потенціалу. Рівняння Пуассона і рівняння Лапласа, граничні умови в електростатичному полі, граничні умови на поверхні поділу двох діелектриків, граничні умови на поверхні провідника. Теорема єдиності розв'язків рівнянь Пуассона і Лапласа. Розрахунок електростатичного поля.
3.	Моделювання тривимірного електростатичного поля Сучасні підходи та програмні продукти для моделювання тривимірного електростатичного поля чисельними методами.
Тема 1.3. Моделювання практичних ситуацій наявності електростатичного поля	
4.	Практичні ситуації електростатичного поля Поле рівномірно зарядженої провідної кулі, поле рівномірно зарядженої діелектричної кулі, накопичення зарядів на гострих ділянках провідникових поверхонь, електростатичне поле нескінченної зарядженої осі.
5.	Розрахунок електростатичного поля у декартовій, циліндричній і сферичній системах координат Математичне моделювання електростатичного поля плоского, циліндричного та сферичного конденсаторів
6.	Метод дзеркальних зображень Розрахунок поля заряджених провідників, розташованих біля плоских поверхонь. Поле зарядженої осі, розташованої біля межі поділу двох діелектриків. Електростатичне поле системи заряджених тіл, розташованих поблизу провідної поверхні. Потенціальні коефіцієнти, ємнісні коефіцієнти та коефіцієнти електростатичної індукції. Характеристика плоскопаралельного поля.

Розділ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВИМІРНОГО СТАЦІОНАРНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Тема 2.1. Методи розрахунку тривимірного електричного поля постійного струму

- | | |
|----|---|
| 7. | Розрахунок електричного поля постійного струму
Стаціонарне електричне поле за межами провідника, стаціонарне електричне поле у провіднику, граничні умови на межі двох провідників, аналогія стаціонарного електричного поля у провіднику і електростатичного поля. |
| 8. | Струм витoku у кабелі, опір заземлення, моделювання електричного опору металевого дроту різної конфігурації. |

Тема 2.2. Методи розрахунку тривимірного магнітного поля постійного струму

- | | |
|-----|---|
| 9. | Розрахунок магнітного поля постійних струмів за межами провідника
Стаціонарне магнітне поле за межами провідника, метод дзеркальних зображень, графічний метод побудови картини поля. |
| 10. | Розрахунок магнітного поля постійних струмів в провідниках.
Стаціонарне магнітне поле у провіднику, визначення магнітного потоку та енергії поля через векторний потенціал. |
| 11. | Побудова картини магнітного поля
Скалярний магнітний потенціал, граничні умови для векторів магнітного поля, метод дзеркальних зображень, графічний метод побудови картини магнітного поля. |

Тема 2.3. Моделювання практичних ситуацій стаціонарного електромагнітного поля

- | | |
|-----|---|
| 12. | Моделювання практичних ситуацій
Моделювання практичних ситуацій стаціонарного електромагнітного поля у тривимірному випадку для різної конфігурації об'єктів. |
|-----|---|

Розділ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВИМІРНОГО ЗМІННОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Тема 3.1. Моделювання тривимірного змінного електромагнітного поля в діелектрику

- | | |
|-----|--|
| 13. | Розрахунок змінного електромагнітного поля в ідеальному діелектрику
Рівняння змінного електромагнітного поля. Змінне електромагнітне поле в діелектрику. Рівняння Даламбера, загальне рішення. Плоска електромагнітна хвиля в діелектрику. Відбиття та заломлення хвиль на межі поділу двох середовищ. |
|-----|--|

Тема 3.2. Моделювання тривимірного змінного електромагнітного поля в провіднику

- | | |
|-----|--|
| 14. | Розрахунок змінного електромагнітного поля у провідному середовищі
Змінне електромагнітне поле у провідному середовищі. Поширення плоскої хвилі у провідному напівпросторі. Електричний і магнітний поверхневий ефект у плоскій пластині. Поверхневий ефект у провіднику, розміщеному в пазі електричної машини. |
|-----|--|

Тема 3.3. Розрахунок передачі енергії в електромагнітному полі

- | | |
|-----|--|
| 15. | Розрахунок енергії електромагнітного поля.
Вектор Пойтінга, потік електромагнітної енергії. Теорема Умова-Пойтінга. Приклади використання теореми. Передача енергії від генератора до споживача. Потік енергії у провіднику зі струмом. Передавання енергії уздовж проводів. |
| 16. | Передача енергії в полі.
Передача енергії у змінному полі трансформатора. Потік енергії у коаксіальному кабелі. Потік енергії у конденсаторі й індуктивній котушці |
| 17. | Моделювання практичних ситуацій
Моделювання магнітного поля котушки Гельмгольца. Моделювання самоіндукції та взаємоіндукції одиночних провідників. Моделювання самоіндукції та взаємоіндукції провідника та спіральної котушки |

18.	Моделювання практичних ситуацій Моделювання металевої сфери в магнітному низькочастотному полі, моделювання індукційного нагріву мідного циліндра
-----	---

Лабораторні роботи

№ з/п	<i>Короткий зміст лабораторної роботи</i>
1	Моделювання тривимірного електромагнітного поля металевого дроту
2	Чисельний експеримент, візуалізація результатів, захист роботи 1
3	Моделювання тривимірного електромагнітного поля конденсаторів різної конфігурації
4	Чисельний експеримент, візуалізація результатів, захист роботи 2
5	Моделювання тривимірного магнітного поля котушки Гельмгольца
6	Чисельний експеримент, візуалізація результатів, захист роботи 3
7	Моделювання тривимірного електромагнітного поля групи провідників
8	Чисельний експеримент, візуалізація результатів, захист роботи 4
9	Моделювання тривимірного електромагнітного поля спіральних котушок
10	Чисельний експеримент, візуалізація результатів, захист роботи 5
11	Моделювання тривимірного поля сфери в магнітному низькочастотному полі
12	Чисельний експеримент, візуалізація результатів, захист роботи 6
13	Моделювання тривимірного поля трансформатора з феромагнітним осердям
14	Чисельний експеримент, візуалізація результатів, захист роботи 7
15	Моделювання індукційного нагріву мідного циліндра
16	Чисельний експеримент, візуалізація результатів, захист роботи 8
17	Моделювання тривимірного поля силового кабелю
18	Чисельний експеримент, візуалізація результатів, захист роботи 9

6. Самостійна робота студента

№ з/п	<i>Вид самостійної роботи</i>
1	Підготовка до аудиторних занять
2	Проведення розрахунків за первинними даними, отриманими на лабораторних заняттях
3	Підготовка до МКР.
4	Підготовка до заліку

Політика та контроль

7. 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;
- **правила поведінки на заняттях:** студент має можливість отримувати бали за відповідні види навчальної активності на лабораторних 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 вказівкою викладача;

- **правила захисту лабораторних робіт:** лабораторна робота захищається індивідуально і за умови дотримання календарного плану виконання;
- **правила призначення заохочувальних балів:** заохочувальні не входять до основної шкали РСО, а їх сума не перевищує 10% стартової шкали. Заохочувальні бали нараховують за участь у наукових конференціях;
- **політика дедлайнів та перескладань:** несвоєчасний захист лабораторних робіт, несвоєчасне написання МКР (крім пропусків через хворобу при наданні довідки від лікаря) передбачають множення максимального балу за певний вид активності на коефіцієнт 0,75. Мінімальний бал не змінюється. Допускається одне перескладання МКР за бажанням студента у встановлені строки. Перескладання захисту лабораторних робіт 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 дисципліни. Лабораторні роботи та МКР, які не відповідають вимогам діючого Положення про систему запобігання академічному плагіату в КПІ ім. Ігоря Сікорського, оцінюються в 0 балів. У такому разі лабораторна робота або МКР може бути перероблена із зміною варіанту. Максимальний бал буде знижено на 30%.
- **при використанні цифрових засобів зв'язку з викладачем** (мобільний зв'язок, електронна пошта, переписка на форумах та у соц. мережах тощо) необхідно дотримуватись загальноприйнятих етичних норм, зокрема бути ввічливим та обмежувати спілкування робочим часом викладача.

8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (РСО)

Поточний контроль: МКР, відповіді на заняттях, лабораторні роботи.

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

Умови успішного проходження календарного контролю: повне виконання навчального плану дисципліни на дату контролю, що передбачає виконання і захист лабораторних робіт.

Семестровий контроль: залік.

Умови допуску до семестрового контролю: повне виконання навчального плану дисципліни, що передбачає виконання і захист всіх лабораторних робіт.

Загальна рейтингова оцінка студента після завершення семестру складається з балів, отриманих за:

- виконання МКР;
- відповідей на заняттях;
- виконання та захист 9 лабораторних робіт.
- виконання залікової роботи

№з/п	Контрольний захід	Макс. бал	Кільк.	Всього
1.	МКР	12	1	12
2.	Відповіді на заняттях	6	2	12
3.	Лабораторні роботи	4	9	36
4.	Залік	40	1	40
	РАЗОМ			100

Модульна контрольна робота

Максимальний бал за МКР – 12 балів, мінімальний – 12 балів *60% = 7,2 балів.

Критерії оцінювання:

- вибір оптимального методу побудови математичної моделі, правильне виконання чисельного розрахунку, візуалізація результатів у повному об'ємі – $(0,9..1) * 12$ балів;
- правильні кроки побудови математичної моделі, несуттєві помилки у чисельних розрахунках чи у візуалізації результатів – $(0,89..0,75) * 12$ балів;
- правильні кроки побудови математичної моделі, суттєві помилки у чисельних розрахунках чи у візуалізації результатів – $(0,74..0,6) * 12$ балів;
- виконання роботи з принциповими помилками або відсутність значної частини математичної моделі, відсутність візуалізації результатів – 0 балів.

Виконання та захист лабораторних робіт

Ваговий бал – 4 (2 бали – оформлені результати у вигляді протоколу, 2 бали – захист роботи).

Максимальна кількість балів за всі лабораторні роботи – 4 бали * 9 = 36 балів.

Мінімальна кількість балів за всі лабораторні роботи (за умови їх повного виконання та захисту) –
4 балів * 9 * 60% = 21,6 балів.

Критерії оцінювання:

Результати числового експерименту на побудованій математичній моделі:

- відмінна підготовка до лабораторної роботи (знання мети роботи, знання основних теоретичних положень), активна участь у виконанні досліджень, правильна побудова математичної моделі та візуалізація результатів розрахунку у повному об'ємі – $(0,9..1) * 2$ бали;
- добра підготовка до лабораторної роботи, активна участь у виконанні досліджень, незначні помилки при чисельних розрахунках – $(0,89..0,75) * 2$ бали;
- задовільна підготовка до лабораторної роботи, пасивна участь у виконанні досліджень, суттєві помилки при чисельному розрахунку та візуалізації результатів – $(0,74..0,6) * 2$ бали;
- неготовність до лабораторної роботи, пасивна участь у виконанні досліджень, невірна побудова математичної моделі чи проведення чисельного експерименту – 0 балів.

Захист роботи:

- повні відповіді на теоретичні питання за темою роботи – $(0,9..1) * 2$ бали;
- неповні відповіді на теоретичні питання – $(0,89..0,75) * 2$ бали;
- часткові відповіді на теоретичні питання або відсутність відповідей на окремі питання, за умови розуміння загальної мети роботи та основних етапів проведення дослідження – $(0,74..0,6) * 2$ бали;
- невірні відповіді на більшість теоретичних питань за темою роботи – 0 балів.

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль зазначено у додатку 1 до силабусу

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено професором кафедри теоретичної електротехніки ФЕА, д.т.н., доц. Щербою М.А.

Ухвалено кафедрою теоретичної електротехніки ФЕА (протокол № 10 від 24.05.2023 р.)

Погоджено Методичною комісією ФЕА (протокол № 10 від 22.06.2023 р.)

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль

РОЗДІЛ 1. Моделювання тривимірного електростатичного поля

Тема 1.1. Методи розрахунку тривимірних електромагнітних полів

1. Методи розрахунку тривимірних електромагнітних полів

Тема 1.2. Моделювання тривимірного електростатичного поля

2. Основні підходи до розрахунку тривимірних електромагнітних полів
3. Моделювання тривимірного електростатичного поля

Тема 1.3. Моделювання практичних ситуацій наявності електростатичного поля

4. Практичні ситуації електростатичного поля
5. Розрахунок електростатичного поля у декартовій, циліндричній і сферичній системах координат
6. Метод дзеркальних зображень

РОЗДІЛ 2. Моделювання тривимірного стаціонарного електромагнітного поля

Тема 2.1. Методи розрахунку тривимірного електричного поля постійного струму

7. Розрахунок електричного поля постійного струму
8. Практичні ситуації електричного поля постійного струму

Тема 2.2. Методи розрахунку тривимірного магнітного поля постійного струму

9. Розрахунок магнітного поля постійних струмів за межами провідника
10. Розрахунок магнітного поля постійних струмів в провідниках.
11. Побудова картини магнітного поля

Тема 2.3. Моделювання практичних ситуацій стаціонарного електромагнітного поля

12. Моделювання практичних ситуацій стаціонарного електромагнітного поля

РОЗДІЛ 3. Моделювання тривимірного змінного електромагнітного поля

Тема 3.1. Моделювання тривимірного змінного електромагнітного поля в діелектрику

13. Розрахунок змінного електромагнітного поля в ідеальному діелектрику

Тема 3.2. Моделювання тривимірного змінного електромагнітного поля в провіднику

14. Розрахунок змінного електромагнітного поля у провідному середовищі

Тема 3.3. Розрахунок передачі енергії в електромагнітному полі

15. Розрахунок енергії електромагнітного поля
16. Передача енергії в полі
17. Моделювання практичних ситуацій