



ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	14 «Електрична інженерія»
Спеціальність	141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма	Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність
Статус дисципліни	Вибіркова
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	IV курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	120 годин / 4 кредити ECTS
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Залік/МКР
Розклад занять	http://rozklad.kpi.ua
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к. т. н., доц. Волянський Роман Сергійович, 0674985064 Практичні заняття: к. т. н., доц. Волянський Роман Сергійович, 0674985064
Розміщення курсу	

Програма навчальної дисципліни

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

Силабус навчальної дисципліни «Оптимальне керування в електромеханічних системах» складено відповідно до освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» підготовки бакалаврів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Метою навчальної дисципліни є підсилення у студентів наступних здатностей: (K15) Здатність вирішувати комплексні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з роботою електричних машин, апаратів та автоматизованого електроприводу; (K19) Усвідомлення необхідності підвищення ефективності електроенергетичного, електротехнічного та електромеханічного устаткування; (K22) Здатність використовувати математичні методи та методи теорії автоматичного керування при дослідженні лінійних та нелінійних систем, проводити аналіз показників якості, синтезувати регулятори, складати та аналізувати структурні схеми систем автоматичного керування; (K23) Здатність застосовувати пакети моделюючих програм для аналізу, синтезу та дослідження електромеханічних систем автоматизації та електроприводів; (K26) Здатність вирішувати комплексні проблеми, пов'язані із керуванням автоматизованими електроприводами різноманітних технологічних застосувань з електроприводами постійного та змінного струму.

Предмет навчальної дисципліни – поглиблені методи аналізу та синтезу систем керування, оптимальних в сенсі наперед заданого функціонала якості.

Програмні результати навчання, на покращення яких спрямована дисципліна

(ПР06) Застосовувати прикладне програмне забезпечення, мікроконтролери та мікропроцесорну техніку для вирішення практичних проблем у професійній діяльності; (ПР07) Здійснювати аналіз процесів в електроенергетичному, електротехнічному та електромеханічному обладнанні, відповідних комплексах і системах; (ПР08) Обирати і застосовувати додатні методи для аналізу і синтезу електромеханічних та електроенергетичних систем із заданими показниками; (ПР20) Знати і розуміти принципи керування лінійними, нелінійними та дискретними системами автоматичного керування; (ПР25) Знати методи підвищення ефективності алгоритмів керування електроприводами та електромеханічними системами.

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

Для успішного засвоєння дисципліни студент повинен володіти освітніми компонентами «Автоматизований електропривод», «Теорія автоматичного керування», «Вища математика», «Системи автоматизації», «Електромеханічні системи типових технологічних застосувань».

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Елементи класичного варіаційного числення.

Тема 1.1. Збурений та незбурений рухи динамічної системи

Тема 1.2. Поняття про оптимальне керування

Тема 1.3. Задача на безумовний екстремум. Рівняння Ейлера та Ейлера-Пуассона.

Тема 1.4. Варіаційні задачі на умовний екстремум. Розв'язання задачі мінімізації функціонала класичними методами.

Тема 1.5. Розв'язання задачі аналітичного конструювання оптимального регулятора в постановці О.М.Льотова

Тема 1.6. Синтез лінійного оптимального регулятора класичними методами варіаційного числення

Розділ 2. Некласичне варіаційне числення.

Тема 2.1. Принцип максимуму Понтрягіна

Тема 2.2. Аналітичне конструювання регуляторів за принципом максимуму

Тема 2.3. Динамічне програмування Р.Беллмана

Тема 2.4. Функції Ляпунова.

Тема 2.5. Аналітичне конструювання лінійних оптимальних регуляторів в постановці Р.Беллмана

Тема 2.6. Аналітичне конструювання регуляторів при неповній інформації про вектор стану

Тема 2.7. Рішення задачі АКОР при наявності детермінованих та випадкових збурень.

Тема 2.8. Ковзні режими.

Тема 2.9. Принцип симетрії САК та його модифікація

Тема 2.10. Синтез оптимального регулятора з використанням принципу симетрії

Тема 2.11. Синтез оптимального регулятора з використанням лінеаризації зворотними зв'язками

Тема 2.12. Аналітичне конструювання цифрових оптимальних регуляторів.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Основна література

1. Лозинський О. Ю. та ін. Синтез лінійних оптимальних динамічних систем. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. 392 с.
2. Новицький І.В., Ус С.А. Сучасна теорія керування: навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2017. 263 с.
3. Перестюк М.О. та ін. Варіаційне числення та методи оптимізації. Київ: КНУ ім. Т.Шевченка, 2010. 121с.
4. Соколов С.В. Оптимальні та адаптивні системи. Суми: СумДУ, 2018. 221с.

Додаткова література

5. Теорія систем керування: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна, В.П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.
6. Методи сучасної теорії управління: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, В.Д. Кишенько, Н.М. Луцька, В.В. Іващук. — К., НУХТ, 2010. — 196 с.
7. Bertsekas, D. (2000) *Dynamic Programming and Optimal Control*(2nd ed). Athena Scientific, Belmont, MA
8. Vinter, R. (2000)*Optimal Control*. Birkhauser, Boston.
9. Becerra, V.M. (2004) *Solving optimal control problems with state constraints using nonlinear programming and simulation tools*. IEEE Transactions on Education, 47(3):377-384.
10. Betts J.T. (2001) *Practical Methods for Optimal Control Using Nonlinear Programming*. SIAM. ISBN 0-89871-488-5.
11. Gelfand I.M. and Fomin S.V. (2003) *Calculus of Variations*. Dover Publications. ISBN 0486414485.
12. Naidu D.S. (2003) *Optimal Control Systems*. CRC Press. ISBN 0849308925.
13. Athans M. and Falb P. L. (2006) *Optimal Control: An Introduction to the Theory and Its Applications*. Dover Publications. ISBN 0486453286.
14. Hull D. G. (2003) *Optimal Control Theory for Applications*. ISBN 0387400702

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)
1	Тема 1.1. Збурений та незбурений рухи динамічної системи Основні питання: керований та вільний рух, параметричні та координатні збурення, рівняння еталонного та збуреного руху
2	Тема 1.2. Поняття про оптимальне керування Основні питання: математична постановка задачі оптимального керування керованим об'єктом, функціонал та його властивості. основні критерії оптимальності.
3	Тема 1.3. Задача на безумовний екстремум. Рівняння Ейлера та Ейлера-Пуассона. Основні питання: задача на безумовний екстремум, вивід рівнянь Ейлера та Ейлера-Пуассона.
4	Тема 1.4. Варіаційні задачі на умовний екстремум. Розв'язання задачі мінімізації функціонала класичними методами. Основні питання: визначення екстремалі шляхом розв'язання рівнянь Ейлера та

	<i>Ейлера-Пуассона</i>
5	Тема 1.5. Розв'язання задачі аналітичного конструювання оптимального регулятора в постановці О.М.Льотова Основні питання: функціонал Льотова та його модифікація, множники Лагранжа, спряжена система рівнянь Ейлера-Лагранжа.
6	Тема 1.6. Синтез лінійного оптимального регулятора класичними методами варіаційного числення Основні питання: синтез оптимального регулятора без та з врахуванням обмежень на сигнал керування
7	Тема 2.1. Принцип максимуму Понтрягіна Основні питання: поняття голчастої варіації, гамільтоніан динамічної системи, умови оптимальності керуючого сигналу
8	Тема 2.2. Аналітичне конструювання регуляторів за принципом максимуму Основні питання: синтез оптимальної системи на базі принципу максимуму, використання принципу максимум для синтезу систем, оптимальних за швидкодією, теорема про n-інтервалів.
9	Тема 2.3. Динамічне програмування Р.Беллмана Основні питання: поняття про оптимальні та неоптимальні траєкторії руху за швидкодією, вивод функціонального рівняння Беллмана для систем оптимальних за швидкодією та систем, оптимальних в сенсі мінімізації деякого функціонала якості, пряма та зворотня задачі динамічного програмування
10	Тема 2.4. Функції Ляпунова. Основні питання: поняття про функції Ляпунова, їх фізичний сенс та методи визначення
11	Тема 2.5. Аналітичне конструювання лінійних оптимальних регуляторів в постановці Р.Беллмана Основні питання: Рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана (ГЯБ). Отримання рівняння ГЯБ для різноманітних видів критеріїв оптимальності, синтез лінійного регулятора для квадратичного функціоналу, розв'язання системи рівняння Рікатті та вибір вагових констант
12	Тема 2.6. Аналітичне конструювання регуляторів при неповній інформації про вектор стану Основні питання: поняття про спостерігач стану, спостерігачи повного та пониженого порядків, синтез спостерігача, оптимальна система керування зі спостерігаючим пристроєм.
13	Тема 2.7. Рішення задачі АКОР при наявності детермінованих та випадкових збурень. Основні питання: рішення задачі АКОР при наявності зовнішніх детермінованих збурень, елементи теорії вірогідностей, випадкова величина та випадковий процес. кореляційна функція та спектральна щільність випадкового процесу. стохастичне рівняння Беллмана
14	Тема 2.8. Ковзні режими. Основні питання: поняття ковзного режиму та його властивості, ковзні режими першого та високих порядків, структурна реалізація систем керування, оптимізація систем розривного керування, синтез релейного регулятора.
	Тема 2.9. Принцип симетрії САК та його модифікація Основні питання: проблема розв'язання лінійних та нелінійних зворотних задач динаміки у різних фазових просторах та її зв'язок з динамічним програмуванням
	Тема 2.10. Синтез оптимального регулятора з використанням принципу

	<p>симетрії</p> <p>Основні питання: вибір та обґрунтування фазового простору для реалізації алгоритму оптимального керування, вибір функціоналу, синтез алгоритму керування та визначення його фазових коефіцієнтів</p>
	<p>Тема 2.11. Синтез оптимального регулятора з використанням лінеаризації зворотними зв'язками</p> <p>Основні питання: принцип лінеаризації зворотними зв'язками, пряме перетворення рівнянь руху до форми Бруновського, синтез оптимального регуляризовуючого закону керування, зворотне перетворення сигналу керування до вихідного фазового простору</p>
	<p>Тема 2.12. Аналітичне конструювання цифрових оптимальних регуляторів.</p> <p>Основні питання: Аналог функціонального рівняння Беллмана в часткових похідних для дискретних систем. Синтез цифрового регулятора для сумарної квадратичної похибки на основі рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана та його аналогів</p>

Практичні заняття

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань
1	<p>Практичне заняття №1. Синтез оптимального регулятора для лінійного об'єкта керування з використанням метода Ейлера-Лагранжа</p> <p>Основні питання заняття: визначення допоміжного функціоналу, складання та розв'язання рівнянь Ейлера, визначення бажаного характеру перехідного процесу та фазових коефіцієнтів регулятора, розробка структурної схеми та математичне моделювання синтезованої оптимальної системи</p>
2	<p>Практичне заняття №2. Синтез оптимального регулятора для лінійного об'єкта керування з використанням принципу максимуму Понтрягіна</p> <p>Основні питання заняття: складання гамільтоніана системи, запис та розв'язання системи спряжених рівнянь, визначення оптимального керування, розробка структурної схеми та математичне моделювання синтезованої оптимальної системи</p>
3	<p>Практичне заняття №3. Синтез оптимального регулятора для лінійного об'єкта керування з використанням динамічного програмування</p> <p>Основні питання заняття: запис рівнянь руху та підінтегрального виразу функціонала якості у матричній формі, складання та розв'язання матричного рівняння Рікатті, розробка структурної схеми та математичне моделювання синтезованої оптимальної системи</p>
4	<p>Практичне заняття №4. Синтез спостерігача невимірюваних координат об'єкта керування</p> <p>Основні питання заняття: складання рівнянь руху спостерігача, синтез регулятора для вимірюваної змінної стану, визначення заданої невимірюваної змінної, розробка структурної схеми та математичне моделювання синтезованої оптимальної системи</p>
5	<p>Практичне заняття №5. Синтез оптимальної системи керування лінійним об'єктом керування зі спостерігаючим пристроєм</p> <p>Основні питання заняття: синтез оптимального регулятора у заданому фазовому просторі, використання спостерігача для відновлення невимірюваних координат, структурна реалізація системи керування та її математичне моделювання</p>

6	Практичне заняття №6. Синтез оптимального релейного регулятора для лінійного об'єкта керування Основні питання заняття: вибір мінімізуємого функціоналу якості, синтез регулятора шляхом розв'язанні задачі динамічного програмування, структурна реалізація системи керування та її математичне моделювання
7	Практичне заняття №7. Синтез оптимального регулятора з використанням модифікованого принципу симетрії для нелінійного об'єкта керування Основні питання заняття: запис рівнянь руху об'єкта керування, знаходження зворотних перетворень, які поєднують сигнал керування і контрольовану змінну, визначення сигналу керування у функції інтегралу відхилення дійсного значення регульованої змінної від її бажаного значення, структурна реалізація системи керування та її математичне моделювання
8	Практичне заняття №8. Синтез оптимального релейного регулятора для нелінійного об'єкта керування з використанням лінеаризації зворотними зв'язками Основні питання заняття: запис рівнянь руху об'єкта у матричній формі, застосування до них перетворень зворотними зв'язками та отримання рівнянь у формі Бруновського, синтез оптимального регуляризуємого керуючого впливу, зворотне перетворення знайденого алгоритму керування, розробка структурної схеми та математичне моделювання синтезованої оптимальної системи
9	Практичне заняття №9. Синтез цифрового оптимального регулятора Основні питання заняття: дискретизація рівнянь руху об'єкта керування, використання модифікованого рівняння ГЯБ для знаходження оптимального керування

Самостійна робота студента

№ з/п	Вид самостійної роботи	Кількість годин СРС
1	Підготовка до лекцій	18
2	Підготовка до практичних занять	9
3	Підготовка до МКР	3
4	Підготовка до заліку	4

6. Контрольна робота

Метою контрольної роботи є закріплення та перевірка теоретичних знань із освітнього компонента, набуття студентами практичних навичок самостійного вирішення задач з розрахунку та проектування елементів електромеханічних систем типового технологічного призначення.

Модульна контрольна робота (МКР) виконується на 9 тижні навчання. Контрольна робота проводиться у середовищі Moodle. Кожен студент отримує індивідуальне завдання, відповідно до якого необхідно надати відповіді на вказані запитання.

Політика та контроль

6. 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'явиться 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 дисципліни «Електромеханічні системи та автоматизація технологічних комплексів»;

- **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.**

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

Поточний контроль: вправи на лекційних заняттях, МКР, виконання завдань до практичних занять.

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

Семестровий контроль: залік.

Умови допуску до семестрового контролю: виконані завдання до практичних та лекційних занять, семестровий рейтинг більше 30 балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
95-100	Залік
85-94	Залік
75-84	Залік
65-74	Залік
60-64	Залік
Менше 60	Не залік
Менше 30	Не допущено

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

- вправи по кожному лекційному заняттю;
- виконання завдань до практичних занять;
- виконання модульної контрольної роботи (МКР);
- відповіді на запитання при складанні заліку.

Вправи на лекціях	Практичні заняття	МКР
18	36	46

Тестування по матеріалам лекційних занять

Ваговий бал 1. Максимальна кількість балів за тестування – 1бал*18лекцій= 18балів.

Тестування проводиться у системі дистанційного навчання Moodle та доступне протягом 2 робочих днів після завершення поточної лекції. У деяких випадках термін проходження тестування може бути продовжений лектором. Тривалість проходження одного тестування –10 хвилин. Кількість спроб –одна. У деяких випадках, що пов'язані з технічними проблемами студентів, може надатися повторна спроба на окремі тестування.

Кожне тестування містить 10 запитань різного формату (вибір правильного варіанту з переліку; вірно/невірно; визначити відповідність; чисельна відповідь; вибір пропущених слів; перетаскування на зображення тощо).

Критерії оцінювання

-запитання типу «вибір правильного варіанту з переліку», «вірно/невірно», «чисельна відповідь» оцінюються однозначно: вірна відповідь –0,1 бал, невірна відповідь –0 балів;

-запитання, на які немає однієї конкретної відповіді, типу «визначити відповідність», «вибір пропущених слів», «перетаскування на зображення» оцінюються у відповідності до кількості елементів у тесті (наприклад, якщо треба вставити 4 слова у текст, то студент отримає по 0,025 балів за одне правильне вставлене слово, а за всі 4 правильно вставлені слова отримає відповідно0,1 бал) –невірна відповідь–0 балів, частково вірна відповідь–0,01-0,09 балів, вірна відповідь 0,1 бал.

Практичні заняття

Ваговий бал дорівнює 4. Максимальна кількість балів за всі 9 практичних занять становить 36 балів. Нарахування балів за 1 практичне заняття здійснюється за наступним критерієм:

- «відмінно», повна відповідь, вільне володіння матеріалом – 4 бал;
- «добре», достатньо повна відповідь, або повна відповідь з незначними помилками – 3 бали;
- «задовільно», неповна відповідь та незначні помилки – 1-2 бал;
- «незадовільно», незадовільна відповідь або відсутність під час проведення заняття – 0 балів.

Модульна контрольна робота

Ваговий бал дорівнює 46. Нарахування балів за 1 МКР здійснюється за наступним критерієм:

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) 30-46 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації), або повна відповідь з незначними помилками – 16-30 бал;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації) та незначні помилки –1-15 балів;

- «незадовільно», незадовільна відповідь (не відповідає вимогам на 3 бали) або відсутність під час проведення роботи – 0 балів.

Календарний контроль

Календарний контроль базується на поточній рейтинговій оцінці. Умовою позитивної атестації є значення поточного рейтингу студента не менше 50% від максимально можливого на час атестації. Бал, необхідний для отримання позитивного календарного контролю доноситься до студентів викладачем не пізніше ніж за 2 тижні до початку календарного контролю.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено доцентом кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу ФЕА, к.т.н. Волянським Р.С..

Ухвалено кафедрою автоматизації електромеханічних систем та електроприводу ФЕА (протокол № 6 від 28.12.2022)

Погоджено Методичною комісією факультету (протокол №5 від 26.01.2023 р.)