



Smart Grid та автоматизація енергоефективних хімічних технологій

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Другий(магістр)</i>
Галузь знань	<i>G Інженерія, виробництво та будівництво</i>
Спеціальність	<i>G1 - Хімічні технології та інженерія</i>
Освітня програма	<i>Енергоефективні хімічні технології та системна інженерія біопаливних і водневих виробництв</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>денна</i>
Рік підготовки, семестр	<i>1 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>5 кредитів, 150 годин (30 год. лекцій, 30 год. практичних, 90 год. СРС)</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Екзамен / модульна контрольна робота (МКР, РГР)</i>
Розклад занять	<i>https://schedule.kpi.ua/</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>к.т.н., доцент Босак Алла Василівна, тел. 050-729-50-67, email: alla_koz@ukr.net</i> Практичні / Семінарські: <i>к.т.н., доцент Босак Алла Василівна, тел. 050-729-50-67, email: alla_koz@ukr.net</i>
Розміщення курсу	<i>https://do.ipk.kpi.ua</i>

Програма навчальної дисципліни

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

Навчальна дисципліна «Smart Grid та автоматизація енергоефективних хімічних технологій» спрямована на формування у студентів системних знань та практичних навичок у сфері інтелектуальних енергетичних мереж, методів підвищення енергоефективності хімічних виробництв, автоматизації та оптимізації технологічних процесів з урахуванням вимог ринку електроенергії.

Мета і завдання навчальної дисципліни - ознайомити студентів з концепцією Smart Grid, архітектурою сучасних систем автоматизації хімічних виробництв, методами пінч-аналізу, ексергетичного аналізу та теплової інтеграцією процесів; сформувати вміння проектувати стратегії Demand Response, оцінювати доцільність інтеграції відновлюваних джерел енергії та систем накопичення, здійснювати техніко-економічний аналіз проектів з енергоефективності.

Компетенції: (ФК04) Здатність використовувати результати наукових досліджень і дослідно-конструкторських розробок для вдосконалення існуючих та/або розробки нових технологій і обладнання хімічних виробництв; (ФК06) Здатність розробляти та впроваджувати технологічні схеми переробки біомаси та виробництва водню (електроліз, газифікація тощо) з мінімальними

енергетичними втратами; (ФК07) Здатність розробляти архітектуру та впроваджувати алгоритми інтелектуальних систем автоматичного керування для оптимізації режимів роботи енергетичних комплексів.

Програмні результати навчання: (ПРН01) Критично осмислювати наукові концепції та сучасні теорії хімічних процесів та хімічної інженерії, застосовувати їх при проведенні наукових досліджень та створенні інновацій; (ПРН09) Самостійно проєктувати енергоефективне обладнання (реактори, електролізери, теплообмінники), використовуючи сучасні CAD/CAE системи та методи комп'ютерного моделювання (CFD).

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

Міждисциплінарні зв'язки: Дисципліна «Smart Grid та автоматизація енергоефективних хімічних технологій» викладається на базі матеріалу дисциплін: «Автоматизація хімічних виробництв», «Процеси та апарати хімічної технології», «Теоретичні основи хімічної технології», «Математичне моделювання хімічних процесів», «Основи теорії автоматичного керування».

Знання та уміння, одержані в процесі вивчення навчальної дисципліни «Smart Grid та автоматизація енергоефективних хімічних технологій», є необхідними для кожного фахівця даної спеціальності, які вирішують інженерні завдання у сфері автоматизації енергоефективних хімічних технологій та при виконанні магістерської дисертації.

3. Зміст навчальної дисципліни

Навчальна дисципліна «Smart Grid та автоматизація енергоефективних хімічних технологій» складається з 5 розділів:

Розділ 1. Основи Smart Grid та систем автоматизації

Тема 1.1. Концепція Smart Grid: визначення, архітектура, стандарти. Тема 1.2. Протоколи передачі даних та кібербезпека промислових систем. Тема 1.3. Системи SCADA та DCS у хімічній промисловості. Тема 1.4. Промисловий IoT та цифровий двійник. Тема 1.5. Системи автоматичного регулювання. Тема 1.6. Предиктивне керування з моделлю (MPC).

Розділ 2. Енергоефективність хімічних виробництв

Тема 2.1. KPI енергоефективності та методи енергетичного аудиту. Тема 2.2. Пінч-аналіз: методологія та застосування. Тема 2.3. Синтез теплообмінних мереж. Тема 2.4. Ексергетичний аналіз. Тема 2.5. Когенерація та тригенерація. Тема 2.6. Теплова інтеграція ректифікаційних колон.

Розділ 3. Оптимізація та автоматизація енергоємних процесів

Тема 3.1. Real-Time Optimization (RTO). Тема 3.2. Оптимізація хімічних реакторів. Тема 3.3. Автоматизація насосних та компресорних станцій. Тема 3.4. Програмне моделювання в Aspen Plus / HYSYS. Тема 3.5. Цифровий двійник хімічного виробництва. Тема 3.6. Застосування машинного навчання.

Розділ 4. Інтеграція з енергетичною мережею

Тема 4.1. Ринок електроенергії в Україні та ЄС. Тема 4.2. Demand Response у хімічній промисловості. Тема 4.3. Системи накопичення енергії (BESS). Тема 4.4. Відновлювані джерела та Power-to-X. Тема 4.5. Мікромережі. Тема 4.6. Зелений водень.

Розділ 5. Управління енергосистемою та регуляторні аспекти

Тема 5.1. Системи енергетичного менеджменту (ISO 50001). Тема 5.2. Автоматизований облік енергоресурсів (АСКОЕ). Тема 5.3. Планування та диспетчеризація. Тема 5.4. Регуляторна база України та ЄС. Тема 5.5. Техніко-економічний аналіз проєктів. Тема 5.6. ESCO-контракти.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література:

1. І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, О.А. Жуков. Інтелектуальні системи електропостачання. Навчальний посібник / І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, О.А. Жуков – 2023. – 151 с. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Kasatkina_2023_151.pdf
2. Савченко О. А. Технології Smart Grid: конспект лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форми навч. зі спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; Держ. біотехнологічний ун-т. Харків: [б. в.], 2024. 76 с. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/62652>
3. Лісовець, С. М. SCADA-системи. Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка) / С. М. Лісовець, В. С. Антонюк, С. В. Барилко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,52 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 179 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/81093>
4. Цифрові та нелінійні системи керування електротехнічними комплексами. Курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» спец. G3 Електрична інженерія / А. В. Босак, А. В. Торопов, В. Г. Дубовик Л.В. Торопова ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл: 5,23 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 198 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/80441>
5. Енерго- та ресурсозбереження у хімічних виробництвах : конспект лекцій для студентів для студентів 1 курсу денної форми навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / Г. К. Воронов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 118 с.
6. Ресурсоефективні хімічні технології та циркулярна економіка. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.В. Галиш, І.М. Трус – Електронні текстові дані (1 файл: 5,33 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 140 с.
7. Нестеренко С. В. Технологія виробництва хімічних речовин і матеріалів : конспект лекцій (для студентів 1 курсу денної та заочної форм навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія) / С. В. Нестеренко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 101 с.
8. Блінов, І. В. Оптовий та роздрібний ринок електричної енергії [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / І. В. Блінов, Є. В. Парус ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,85 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 291 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57363>
9. І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, С.Я. Вишневський. Джерела живлення, накопичення електричної енергії та альтернативні енергоресурси для транспортних засобів. Навчальний посібник / І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, С.Я. Вишневський – Варшава: iScience Sp. z.o.o. – 2023. – 140 с.

Допоміжна література:

10. Керівництво з впровадження системи енергетичного менеджменту відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 50001:2018. http://www.ukriee.org.ua/wp-content/uploads/2021/03/EnMS-Practical-Guide-2021_Ukraine_ukr.pdf
11. В.О. Пінчук, Енергетичний менеджмент. Навчальний посібник із практичними завданнями для студентів спеціальності 141 - Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка, 144 - Теплоенергетика, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, 2024, 91 С. DOI: 10.23877/PinchukDAAD2024-01

12. Гідромеханічні процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв : навчальний посібник / А. П. Врагов , Я. Е. Михайловський, М. П. Юхименко, Р. О. Острога ; за заг. ред. Я. Е. Михайловського. – 2-ге вид., переробл. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 276 с. ISBN 978-966-657-981-5.

13. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» (2118-VIII). Закон України «Про ринок електричної енергії» (2019-VIII). Директива ЄС 2012/27/EU щодо енергетичної ефективності (EED).

14. Проектування систем автоматизації [Текст]: навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 268 с. ISBN 978 – 966 – 350 – 423 – 0

Літературу, бібліографія якої подана із посиланням, можна знайти в інтернеті. Літературу, бібліографія якої не містить посилання, можна знайти в бібліотеці КПІ ім. Ігоря Сікорського. Обов'язковою для прочитання є базова література [1]-[4]. Усі інші літературні джерела є факультативними, з ними рекомендується ознайомитись.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Застосовуються стратегії активного навчання, які визначаються такими методами та технологіями: методи проблемного навчання (дослідницький метод); особистісно-орієнтовані технології, засновані на таких формах і методах навчання як візуалізація та інформаційно-комунікаційні технології, зокрема електронні презентації для лекційних занять. Викладання проводиться у формі лекцій та практичних занять.

№	Зміст навчальної роботи
Розділ 1. Основи Smart Grid та інтелектуальних енергетичних систем	
1	Лекція 1. Концепція Smart Grid: визначення, архітектура, стандарти (IEC 61850, IEEE 2030). Компоненти інтелектуальних мереж: AMI, DMS, EMS, SCADA. Відмінності від традиційних енергосистем. Література: [1, 2].
2	Лекція 2. Системи SCADA та DCS: структура, функції, платформи (Siemens PCS 7, ABB 800xA, Honeywell Experion). Огляд АСУТП хімічного підприємства. Література: [3].
3	Лекція 3. Системи автоматичного регулювання: П, ПІ, ПІД-регулятори. Каскадне та feedforward регулювання. Налаштування регуляторів методом Циглера-Нікольса. Література: [4].
4	Лекція 4. Предиктивне керування з моделлю (MPC): принципи, математичний апарат, застосування для реакторів та ректифікаційних колон. Обмеження та переваги. Література: [4].
Розділ 2. Енергоефективність хімічних виробництв	
5	Лекція 5. Аналіз енергоспоживання хімічного підприємства. KPI енергоефективності: SEC (Specific Energy Consumption), EPI (Energy Performance Indicator). Методи енергетичного аудиту. Література: [5, 6].

6	Лекція 6. Синтез теплообмінних мереж (Heat Exchanger Network Synthesis). Правило розміщення теплових насосів та холодильних циклів. Приклади для виробництва аміаку та НПЗ. Література: [5, 6].
7	Лекція 7. Ексергетичний аналіз: визначення ексергії, ексергетичний ККД, локалізація незворотних втрат. Термoeкономічний аналіз хімічних процесів. Література: [5, 6].
8	Лекція 8. Когенерація та тригенерація (CHP/CCHP): принципи, ефективність, інтеграція з хімічним виробництвом. Вторинна пара та рекуперація тепла відхідних газів. Література: [5, 6].
Розділ 3. Оптимізація та автоматизація енергоємних процесів	
9	Лекція 9. Оптимізація режимів роботи хімічних реакторів: ізотермічні, адіабатичні, багатосекційні реактори. Критерії оптимізації: вихід продукту, енерговитрати, безпека. Література: [7].
10	Лекція 10. Програмне моделювання хімічних процесів: Aspen HYSYS, Aspen Plus, gPROMS. Стаціонарне та динамічне моделювання як основа для синтезу систем керування. Література: [7].
Розділ 4. Інтеграція хімічного підприємства з енергетичною мережею	
11	Лекція 11. Ринок електроенергії в Україні: балансуєчий ринок, ринок «на добу наперед», ринок допоміжних послуг. Учасники ринку, ціноутворення, spot-ціни. Література: [8].
12	Лекція 12. Системи накопичення енергії (BESS): технології (Li-ion, redox flow, VRFB), параметри вибору, інтеграція з виробництвом. Теплові акумулятори у хімічних процесах. Література: [9].
13	Лекція 13. Мікромережі (Microgrid): архітектура, режими острівної та паралельної роботи, контролери мікромережі. Хімічне підприємство як індустріальна мікромережа. Література: [1, 7].
Розділ 5. Управління енергосистемою підприємства та регуляторні аспекти	
14	Лекція 14. Системи енергоменеджменту підприємства (EMS/EnMS): стандарт ISO 50001. Планування, моніторинг, аналіз та постійне покращення енергоефективності. Література: [10].
15	Лекція 15. Техніко-економічний аналіз проектів з енергоефективності: NPV, IRR, термін окупності. Фінансові механізми: ESCO-контракти, energy performance contracting. Література: [10].

Практичні заняття:

№	Зміст навчальної роботи
1	Аналіз архітектури Smart Grid на прикладі хімічного підприємства. Огляд ФСА за ДСТУ/ISA-5.1
2	Налаштування ПД-регулятора (метод Циглера-Нікольса). Порівняння якості перехідних процесів
3	MPC в MATLAB/Simulink для реакторного об'єкта: вплив горизонту прогнозу та вагових коефіцієнтів

4	Розробка структурної та функціональної схем автоматизації обраного технологічного процесу
5	Розрахунок КРІ енергоефективності (SEC, EPI). Порівняльний аналіз з галузевими бенчмарками
6	Пінч-аналіз: складання потокових даних, побудова складених кривих, визначення мінімальних утилітів при заданому ΔT_{min} .
7	Синтез мережі теплообмінників (Grid Diagram). Оцінка потенціалу економії. МКР
8	Ексергетичний аналіз установок: розрахунок ексергетичного компонентів ККД, пошук вузьких місць
9	Моделювання систем когенерації: тепловий та електричний баланс, порівняння варіантів
10	Задача RTO в MATLAB/Python (fmincon / scipy.optimize): нелінійна оптимізація реактора
11	Аналіз даних ринку «на добу вперед»: профілі навантаження та спот-цін. Стратегія DR для підприємства
12	Вибір параметрів BESS для пікового різання на завантаження. Оцінка терміну окупності
13	ML для прогнозування споживання: навчання моделей (LSTM / Random Forest), метрики MAE, RMSE
14	Техніко-економічний аналіз проєкту з енергоефективності: NPV, IRR, аналіз чутливості
15	Консультація та захист РГР

6. Самостійна робота студента

Самостійна робота студента передбачає:

підготовку до аудиторних занять – 56 год;

підготовку до модульної контрольної роботи – 4 год;

підготовку до іспиту – 30 год.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

На момент проведення кожного заняття, як лекційного, так і практичного, у студента на пристрої, з якого він працює, має бути встановлено додаток Zoom (у випадку дистанційного навчання), а також відкрито курс «Smart Grid та автоматизація енергоефективних хімічних технологій» на платформі «Moodle» (код доступу до курсу надається студентам на першому занятті згідно з розкладом). Силабус; лекційний матеріал; завдання до кожного практичного заняття; варіанти модульної контрольної роботи; тести, які потрібно виконати за лекціями; методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт; варіанти залікової контрольної роботи розміщено на платформі «Moodle» та у системі «Електронний Кампус КПІ».

Під час проходження курсу «Smart Grid та автоматизація енергоефективних хімічних технологій» студенти зобов'язані дотримуватись загальних моральних принципів та правил етичної поведінки, зазначених у Кодексі честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Дедлайни виконання кожного завдання зазначено у курсі «Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем» на платформі «Moodle». Присутність здобувачів вищої освіти на практичних заняттях є обов'язковою. Пропущені з поважних причин заняття мають бути відпрацьовані.

Усі без виключення студенти зобов'язані дотримуватись вимог Положення про систему запобігання академічному плагіату в Національному технічному університеті України «Київський

політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

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

Поточний контроль: МКР проводиться на 15 тижні у вигляді тесту, на практичному занятті у присутності викладача (10 балів), 14 практичних занять (2 бали за практичне заняття = 2 x 14 = 28). МКР виконується у вигляді відповіді на теоретичне запитання з лекційного матеріалу. По закінченню заняття робота над МКР закінчується і не підлягає переписуванню. РГР оцінюється в 22 бали.

РГР оцінюється в 22 бали за такими критеріями:

- «відмінно» – повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації), надані відповідні обґрунтування та особистий погляд – 22-17 балів;
- «добре» – достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації), що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь» або містить незначні неточності – 18-14 балів;
- «задовільно» – неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації), виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та містить деякі помилки – 13 балів;
- «незадовільно» – незадовільна відповідь – 0 балів.

Завдання в рамках лабораторного заняття оцінюються в 2 бали за такими критеріями:

- «відмінно» – повністю виконана робота (не менше 90 % потрібної інформації), надані відповідні обґрунтування та особистий погляд – 2 балів;
- «добре» – в роботі містяться певні неточності (не менше 75 % потрібної інформації), надані обґрунтування недостатньо повні – 1,5 бали;
- «задовільно» – в роботі містяться суттєві неточності (не менше 60 % потрібної інформації), робота виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та містить значні помилки – 1,2 бали;
- «незадовільно» – запропонований в роботі алгоритм є непрацездатним або містяться грубі неточності у розробленій електричній схемі – 0 балів.

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу. Умовою позитивного першого та другого календарного контролів є отримання не менше 50 % максимально можливого на момент відповідного календарного контролю рейтингу.

Семестровий контроль: іспит.

Умови допуску до семестрового контролю: виконана МКР, РГР та практичних занять.

$$RC(max) = 10 + 22 + 28 = 60 \text{ балів}$$

$$RC(min) = 5 + 11 + 14 = 30 \text{ балів}$$

На іспиті студенти виконують письмову контрольну роботу. Екзаменаційна робота оцінюється у 40 балів. Контрольне завдання цієї роботи складається з двох теоретичних запитань з переліку, що наданий у додатку до силабусу та задачі. Кожне запитання оцінюється в 13 балів (задача в 14 балів) за такими критеріями:

- «відмінно» – повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації), надані відповідні обґрунтування та особистий погляд – 14-13 балів;
- «добре» – достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації), що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь» або містить незначні неточності – 11 – 12 балів;
- «задовільно» – неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації), виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та містить деякі помилки – 10-8 балів;
- «незадовільно» – незадовільна відповідь – 0 балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно

94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

8. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль, наведено у додатку до силабусу. Здобувач вищої освіти має можливість пройти онлайн курс(и) за однією або декількома темами, передбаченими робочою програмою навчальної дисципліни. Онлайн курс здобувач може обрати самостійно або за рекомендацією викладача, наприклад «Industrial IoT» на Coursera, «Energy Systems» на edX, «Pinch Analysis» на Teachable. 1 год прослуханого курсу оцінюється у 0,83 бали. Максимальна кількість годин, яка може бути зарахована за результатами неформальної освіти, становить 12 год, відповідно максимальна кількість балів за такі результати становить – 10 балів.

Розрахунково-графічна робота (РГР)

РГР є індивідуальним комплексним завданням, що інтегрує знання з усіх розділів дисципліни. Студент обирає (або отримує) реальний або модельний технологічний процес хімічного підприємства та виконує для нього:

- пінч-аналіз (або ексергетичний аналіз) з побудовою складених кривих та синтезом мережі теплообмінників;
- аналіз системи автоматизації: розробка або аналіз ФСА, вибір технічних засобів автоматизації;
- оцінку потенціалу Demand Response або інтеграції ВДЕ/накопичення;
- техніко-економічний аналіз запропонованих заходів з розрахунком NPV, IRR та терміну окупності.

Орієнтовна тематика РГР: синтез аміаку, виробництво сірчаної кислоти, хлор-луговий процес, нафтопереробка (CDU/VDU), поліетиленове виробництво, виробництво азотних добрив, фармацевтичне виробництво.

РГР оцінюється в 22 бали: розрахункова частина – 10 балів, графічна частина та оформлення – 6 балів, захист (усна доповідь + відповіді на запитання) – 6 балів.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено доц., к. т. н., доц. Босак Аллою Василівною

Ухвалено кафедрою автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів. Протокол №27 від 23.06.26 р.

Ухвалено Методичною комісією НН ІЕЕ. Протокол №43 від 29.06.26 р.

**Додаток до syllabusу навчальної дисципліни
«Smart Grid та автоматизація енергоефективних хімічних технологій»**

Перелік питань, що виносяться на семестровий контроль

1. Архітектура Smart Grid: компоненти, функції, стандарти. Відмінності від традиційних енергосистем.
2. Протоколи передачі даних у Smart Grid: IEC 61850, MODBUS, DNP3. Особливості застосування у хімічній промисловості.
3. Системи SCADA та DCS: структура, функції, відмінності. Приклади платформ для хімічних виробництв.
4. Промисловий IoT (IIoT): архітектура, протоколи, Edge Computing. Цифровий двійник у хімічній промисловості.
5. ПІД-регулятори: математичний опис, методи налаштування (Циглер-Нікольс, метод часових констант).
6. MPC (Model Predictive Control): принцип дії, математичний апарат, переваги та обмеження.
7. Real-Time Optimization (RTO): місце в ієрархії керування, зв'язок з MPC, приклади застосування.
8. Методи аналізу енергоспоживання підприємства. KPI енергоефективності: SEC, EPI. Енергетичний аудит.
9. Пінч-аналіз: основні поняття, гарячі та холодні потоки, мінімальне наближення температур ΔT_{min} , складені криві.
10. Синтез теплообмінних мереж (HEN): правила розміщення теплообмінників, утиліт та теплових насосів.
11. Ексергетичний аналіз: поняття ексергії, ексергетичний ККД, застосування для локалізації втрат у хімічних процесах.
12. Когенерація та тригенерація (CHP/CTHP): принципи, ефективність, інтеграція з хімічним виробництвом.
13. Теплова інтеграція дистиляційних колон: vapor recompression, dividing wall column, heat pump assisted distillation.
14. Оптимізація режимів роботи хімічних реакторів: критерії, методи, засоби автоматизації.
15. Автоматизація насосних та компресорних станцій: ЧРП, антипомпажний захист, оптимізація режиму роботи.
16. Моделювання хімічних процесів в Aspen Plus / HYSYS: стаціонарне та динамічне моделювання, застосування для синтезу систем керування.
17. Ринок електроенергії в Україні: структура, учасники, механізми ціноутворення. Інтеграція у контекст ринку ЄС.
18. Demand Response (DR): класифікація програм, ідентифікація гнучких навантажень у хімічній промисловості.
19. Системи накопичення енергії (BESS): технології, параметри вибору, інтеграція з виробництвом.
20. Відновлювані джерела енергії у хімічній промисловості: типові схеми інтеграції SEC та BEC.
21. Power-to-X концепція: зелений водень, синтетичний метан, технології електролізу (PEM, лужний, SOEC).
22. Мікромережі (Microgrid): архітектура, режими роботи, контролери. Хімічне підприємство як індустріальна мікромережа.

23. Зелений водень у хімічній промисловості: виробництво, зберігання, транспортування, LCOH.
24. ISO 50001: структура стандарту, вимоги до системи енергетичного менеджменту підприємства.
25. Автоматизований облік енергоресурсів (АСКОЕ): структура системи, засоби обліку, інтеграція з ERP.
26. Machine Learning для прогнозування енергоспоживання: алгоритми, метрики якості, практичне застосування.
27. Планування та диспетчеризація енергоспоживання: unit commitment, economic dispatch, MPC з горизонтом планування.
28. Техніко-економічний аналіз проектів з енергоефективності: NPV, IRR, термін окупності, аналіз ризиків.
29. ESCO-контракти та energy performance contracting: схеми, розподіл ризиків та прибутків.
30. Регуляторна база України та ЄС у сфері енергоефективності: ключові закони, директиви, зелені сертифікати.
31. Кібербезпека промислових систем: загрози для ОТ-мереж, стандарт IEC 62443, заходи захисту.
32. Функціональна схема автоматизації (ФСА): правила виконання за ДСТУ та ANSI/ISA-5.1, умовні позначення.
33. Цифровий двійник хімічного виробництва: структура, інформаційні потоки, практичні приклади впровадження.
34. Застосування хмарних платформ (AWS IoT, Azure IoT Hub, Siemens MindSphere) у промисловому енергоменеджменті.
35. Тенденції розвитку Smart Grid та автоматизації хімічних виробництв: AI, автономні системи, декарбонізація.

Приклад задач, що виносяться на семестровий контроль

Розділ 1. Системи автоматизації

Задача 9. ПІД-регулятор знімається методом Циглера-Нікольса. Критичний коефіцієнт підсилення $K_{cr} = 4,0$, період незатухаючих коливань $T_{cr} = 120$ с. Визначте параметри ПІД-регулятора (K_p , T_i , T_d). Якою буде зміна параметрів, якщо перейти до ПІ-регулятора?

Розділ 2. Енергоефективність — Пінч-аналіз

Задача 1. Для виробничого процесу задано 4 потоки:

Потік	Тип	Температура, °C	Температура, °C	CP, кВт/°C
G1	гарячий	180	60	3,0
G2	гарячий	130	40	2,5
X1	холодний	30	120	4,0
X2	холодний	50	160	1,5

При $\Delta T_{min} = 10^\circ\text{C}$ застосовуються: мінімальні потреби в нагріванні ($Q_{H,min}$) та охолодження ($Q_{C,min}$); температуру пінч-точки.

Задача 2. Теплообмінна мережа має такі параметри: гарячий потік охолоджується від 200°C до 80°C ($CP = 2$ кВт/°C), холодний нагрівається від 40°C до 150°C ($CP = 3$ кВт/°C). $\Delta T_{min} = 15^\circ\text{C}$. Визначте:

чи можлива повна утилізація тепла без зовнішніх утилітів? Розрахувати теплове навантаження рекуператора та залишкові потреби в нагріванні/охолодженні.

Розділ 2. Ексергетичний аналіз

Задача 3. Теплообмінник нагріває воду від 20°C до 80°C витратою 2 кг/с. Гаряча сторона — димові гази, що охолоджуються від 300°C до 150°C ($c_p = 1,05$ кДж/(кг·К), витрати 1,5 кг/с). $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293$ К. Розрахувати ексергетичний ККД теплообмінника та втрати ексергії.

Розділ 2. Когенерація

Задача 4. Газова турбіна споживає 10 МВт паливної потужності, виробляє 3,5 МВт електроенергії. Відхідні гази утилізуються в котлі-утилізаторі, що виробляє технологічну пару потужністю 4,8 МВт. Розрахувати: ККД когенерації (PES — Primary Energy Saving); порівнювати з роздільним виробництвом електроенергії ($\eta_{\text{ел}} = 0,38$) та тепла ($\eta_{\text{т}} = 0,90$).

Розділ 3. Оптимізація насосної станції

Задача 5. Насосна станція має 3 ідентичних насоса з характеристикою $H = 50 - 0,02 \cdot Q^2$ (H — м, Q — м³/год). Трубопровідна характеристика: $H = 10 + 0,01 \cdot Q^2$. Визначте оптимальну кількість паралельно працюючих насосів при заданій подачі $Q_{\text{total}} = 120$ м³/год. Розрахувати споживану потужність при роботі 2 та 3 насосів ($\eta = 0,75$, $\rho = 1000$ кг/м³).

Розділ 4. Demand Response та BESS

Задача 6. Хімічне підприємство має добовий графік навантаження: пікове споживання 8 МВт (з 08:00 до 20:00), нічне — 3 МВт. Тариф: пік — 4,2 грн/кВт·год, ніч — 1,8 грн/кВт·год. Визначити: оптимальну ємність BESS для повного розрізання піку до рівня 6 МВт; щорічну економію на електроенергії; термін окупності BESS (вартість питома — 8000 грн/кВт·год, ККД циклу 90%).

Розділ 4. Зелений водень

Задача 7. ПЕМ-електролізер потужністю 1 МВт виробляє воду з питомими витратами 55 кВт·год/кг H_2 . Ціна електроенергії від СЕС — 1,2 грн/кВт·год, CAPEX електролізера — 15 млн грн, термін служби — 20 років, OPEX — 3% CAPEX/рік. Розрахувати LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) та порівняти з ціною природного газу (сірий водень: 45 грн/кг).

Розділ 5. Техніко-економічний аналіз

Задача 8. Проєкт модернізації теплообмінної мережі: капітальні витрати 2,4 млн грн, річна економія на енергоносіях 680 тис. грн, щорічні витрати на обслуговування 50 тис. грн, ставка дисконту 12%, термін проєкту 10 років. Розрахувати NPV, IRR та простий термін окупності. Зробити висновок про доцільність проєкту.