Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кафедра технології електрохімічних виробництв

ІННОВАЦІЙНІ СЕНСОРНІ МЕТОДИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни	
Рівень вищої освіти	***Другий (магістерський)***
Галузь знань	*16 Хімічна та біоінженерія*
Спеціальність	*161 Хімічні технології та інженерія*
Освітня програма	*Хімічні технології неорганічних речовин, електродних матеріалів та водоочищення*
Статус дисципліни	*Нормативна*
Форма навчання	*Очна (денна) / змішана*
Рік підготовки, семестр	*2 курс, осінній семестр*
Обсяг дисципліни	*5 кредитів (150 годин)*
Семестровий контроль/ контрольні заходи	*Екзамен усний*
Розклад занять	*Лекції 1 година на тиждень (1/2 пари); лабораторні заняття 2 години на тиждень (1 пара)*
Мова викладання	*Українська*
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: *к.т.н., старший викладач Кушмирук Андрій Іванович, kushmyruk.andrii@lll.kpi.ua, Telegram @kushmyruk* Практичні: *к.т.н., старший викладач Кушмирук Андрій Іванович, kushmyruk.andrii@lll.kpi.ua, Telegram @kushmyruk*
Розміщення курсу	*Google Classroom (Google G Suite for Education, домен LLL.kpi.ua, платформа Sikorsky-distance); доступ за запрошенням викладача*

Програма навчальної дисципліни

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

Дисципліна «Інноваційні сенсорні методи для моніторингу техногенних середовищ» знайомить студентів з фізико-хімічними принципами функціонування і можливостям застосування хімічних сенсорів у різноманітних областях людської життєдіяльності, включаючи автоматизовані системи контролю за технологічними параметрами хімічних процесів, екологічний моніторинг навколишнього середовища та робочої зони різних виробництв, а також якості продуктів і медичний контроль і клінічної діагностики та дозволяє сформувати у студента здатність розв'язувати складні задачі і проблеми хімічних технологій та інженерії або у процесі навчання, що передбачає проведення досліджень, або здійснення інновацій, що характеризується невизначеністю умов і вимог.

***Метою** кредитного модуля є формування у здобувачів компетентносте:*

- *здатність генерувати нові ідеї (креативність) (К1).*
- *здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (К2).*
- *здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел (К3).*
- *здатність оцінювати і адаптувати освоєні наукові методи і способи діяльності до умов сталого розвитку (К4).*

- *здатність досліджувати, класифікувати і аналізувати показники якості хімічної продукції, технологічних процесів і обладнання хімічних виробництв (К5).*
- *здатність використовувати результати наукових досліджень і дослідно-конструкторських розробок для вдосконалення існуючих та/або розробки нових технологій і обладнання хімічних виробництв (К7).*
- *здатність використовувати сучасне спеціальне наукове обладнання та програмне забезпечення при проведенні експериментальних досліджень і здійсненні дослідно-конструкторських розробок у сфері хімічних технологій та інженерії (К8).*
- *здатність планувати і виконувати наукові дослідження у галузі хімічної інженерії (К11).*

Згідно з вимогами програми здобувачі після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі програмні результати навчання:

- *критично осмислювати наукові концепції та сучасні теорії хімічних процесів та хімічної інженерії, застосовувати їх при проведенні наукових досліджень та створенні інновацій (ПР1).*
- *здійснювати пошук необхідної інформації з хімічної технології, процесів і обладнання виробництв хімічних речовин та матеріалів на їх основі, систематизувати, аналізувати та оцінювати відповідну інформацію (ПР2).*
- *оцінювати технічні і економічні характеристики результатів наукових досліджень, дослідно-конструкторських розробок, технологій та обладнання хімічних виробництв (ПР4).*
- *здійснювати у науково-технічній літературі, патентах, базах даних, інших джерелах пошук необхідної інформації з хімічної технології, процесів і обладнання виробництв хімічних речовин та матеріалів на їх основі, систематизувати, і аналізувати та оцінювати відповідну інформацію (ПР7).*
- *планувати та виконувати експериментальні і теоретичні дослідження в сфері хімічних технологій і інженерії, формулювати і перевіряти гіпотези, аргументувати висновки, презентувати результати досліджень (ПР10).*

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

Для успішного засвоєння дисципліни студенту необхідні знання та уміння, що були отримані підчас вивчення дисциплін «Загальна та неорганічна хімія», «Фізика», «Аналітична хімія», «Фізична хімія», «Теоретична електрохімія», «Матеріалознавство», «Технічна електрохімія».

Дисципліни, які базуються на результатах навчання: дисципліни циклу професійної підготовки, в рамках яких необхідний вибір методів та засобів контролю хімічного складу досліджуємих об'єктів та для подальшої професійної діяльності.

3. Зміст навчальної дисципліни

Тема 1. Хімічні сенсори.

Критерії віднесення аналітичного пристрою до хімічних сенсорів. Загальні відомості. Основні поняття і терміни. Основні види хімічних і фізичних взаємодій, що використовуються в хімічних сенсорах. Класифікація сенсорів. Параметри і характеристики сенсорів: діапазон вимірюваних значень, чутливість, точність, лінійність, селективність, швидкодія, відтворюваність та роздільна здатність. Основні вимоги до сенсорів як аналітичних пристроїв. Особливості використання хімічних сенсорів і сенсорних аналізаторів, їх переваги та недоліки. Області застосування.

Тема.2. Метрологічне забезпечення функціювання хімічних сенсорів.

Метрологічні характеристики хімічних сенсорів. Передавальна функція. Гістерезис. Дрейф параметрів, шуми. Параметри вимірювальної системи, що впливають на точність вимірювань. Надійність. Похибки вимірювань. Статистична оцінка вихідного сигналу. Методи повірки, калібрування та діагностики хімічних сенсорів. Метрологічне забезпечення єдності вимірювань в Україні. Структура метрологічної служби. Первинна, періодична та інспекційна повірки засобів вимірювальної техніки. Міжповірочні інтервали. Державні стандартні зразки складу водних розчинів іонів металів і неметалів. Еталонні балонні газові суміші. Мікрогенератори повірочних газових сумішей (ПГС): дифузійні, капілярні, карбюраторні, балонні, кулонометричні, хімічні та механічні.

Тема 3. Електрохімічні сенсори

Електрохімічні системи. Види електрохімічних систем та складові частини електрохімічних систем та їх можливий стан. Класифікація електродів. Тверді електроди. Ультрамікроелектроди. Одноразові електроди та друковані електроди, виготовлені за технологією screen-printing. Газочутливі електроди. Конструктивні особливості електродів. Електроліти включаючи тверді. Механізм провідності в твердому електроліті. Типи провідності (протона, кисень-іонна, хлор іона, змішана і т.п.). Рівноважні та нерівноважні процеси в електрохімічних системах. Процеси перенесення речовини на межі розділу фаз. Нефарадеєвські процеси. Фарадеєвскі процеси.

Електрохімічні сенсори. Основні типи електрохімічних сенсорів: кондуктометричні, потенціометричні, кулонометричні, вольтамерометричні (включаючи амперметричні). Режими роботи сенсорів. Параметри електрохімічних сенсорів. Практичні аспекти і особливості застосування електрохімічних сенсорів.

Тема 4. Потенціометричні сенсори.

Потенціометричні сенсори: схема електрохімічного ланцюга. ЕРС електрохімічної комірки. Іон-селективні мембрани - скляні мембрани; мембрани з малорозчинних неорганічних солей; полімерні мембрани з іммобілізованим іонофором; π-спряжені полімерні мембрани. Рівняння Доннана. Іон селективні електроди їх класифікація та характеристика. Конструкції іон селективних електродів. Потенціал іон селективного електроду. Рівнянням Нікольського. Залежність електродного потенціалу від концентрації досліджуваного іону, температури, іонної сили розчину, конкуруючих реакцій. Характеристики потенціометричного іон-селективного сенсора.

Потенціометричні газові сенсори з твердим електролітом. Види потенціометричних газових сенсорів з твердим електролітом. Потенціометричні сенсори з твердим електролітом для визначення кисню та їх застосування. Потенціометричні газові сенсори зі змішаними потенціалами.

Тема 5. Вольтамперометричні сенсори.

Електролітичний струм і його аналітичне значення. Зв'язок між величиною струму і кількістю речовини, що бере участь в електродному процесі. Вольтамперометрія з лінійною розгорткою потенціалу. Рівняння Рендлса-Шевчика. Циклічна вольтамперометрія. Квадратно-

хвильова вольтамперометрія. Хроноамперометрія. Рівняння Коттрелла. Проточно-інжекційний аналіз.

Тема 6. Амперметричні сенсори.

Амперметрія. Кінетика електродних процесів в амперметричних сенсорах. Гетерогенний окислювально-відновний каталіз. Поверхнева активація електрохімічних реакцій. Гомогенний окислювально-відновний (медіаторний) каталіз. Електродні матеріали. Особливості будови, способи модифікування електродів для одержання чутливих елементів амперметричних сенсорів. Конфігурація та технічні показники амперметричних сенсорів. Деякі практичні аспекти застосування амперметричних хімічних сенсорів. Кисневий сенсор Кларка. Газовий сенсор гальванічного типу. Амперметричні газові сенсори з твердим електролітом.

Тема 7. Сенсори на основі електричного імпедансу та кондуктометричні сенсори.

Електропровідність. Основні поняття. Електричний імпеданс: основні поняття і визначення. Вимірювання електропровідності. Імпедансний відклик сенсора. Конструкція кондуктометричних комірок (з зануреними електродами; з друкованими гребінчастими електродами; на основі пари планарних електродів, покритих ізолюючим шаром; з пошаровим розміщенням електродів та ін.). Кондуктометричні сенсори з твердотільним електролітом. Імпедансометричні сенсори для визначення газів та парів. Вологість терміни та визначення Резистивні сенсори вологості. Зміна діелектричної сталої залежно від кількості адсорбованого компонента. Конструкція ємнісних сенсорів. Ємнісний сенсор вологості. Ємнісний газовий сенсор. Інтегровані імпедометричні газові сенсори і сенсорні матриці.

Тема 8. Кулонометричні сенсори.

Закони Фарадея. Вихід за струмом. Кулонометричні генератори еталонних та повірочних сумішей. Пряма та не пряма кулонометрія.

Тема 9. Напівпровідникові сенсори.

Напівпровідникові матеріали. Зонна теорія напівпровідників. Структура метал - діелектрик – напівпровідник (МНП). Основні типи напівпровідникових сенсорів: метал оксидні напівпровідникові польові транзистори, хімічно чутливі польові транзистори, сенсори на основі систем метал-ізолятор-напівпровідник, діоди Шотки, сенсори провідності на основі напівпровідників (хеморезистори).

Хімічно чутливі польові транзистори (ХЧПТ) зі структурою електроліт-діелектрик-напівпровідник. Будова та механізм роботи сенсора. Електроди для ХЧПТ-сенсорів. Польові pH-сенсори. Газові зонди на основі pH ХЧПТ. ХЧПТ з мембранним покриттям. Ферментативні сенсори на основі польових транзисторів.

Напівпровідникові газові сенсори. Газові сенсори, засновані на метал оксидний напівпровідниковий польовий транзистор (МОНПТ). Водневі сенсори на МОНПТ. Сенсори для інших газів на МОНПТ. Органічні напівпровідники як газочутливі матеріали. Органічні напівпровідникові газові сенсори на МОНПТ. Механізм роботи газових сенсорів на МОНПТ

Газові сенсори які базуються на діодах Шотткі.

Резистивні напівпровідникові газові сенсори. Напівпровідникові метал оксидні газові сенсори. Структура сенсора. Механізм роботи резистивного сенсора. Виготовлення метал оксидних хеморезисторів. Синтез і напилення металевих оксидів. Хеморезистори на основі органічних матеріалів. Застосування наноматеріалів в резистивних газових сенсорах.

Селективність і чутливість хеморезисторів. Вплив вологості на сигнал. Резистивні газові напівпровідникові сенсорні матриці.

Тема 10. Оптичні хімічні сенсори.

Оптичні хімічні сенсори – класифікація та області їх застосування. Переваги і недоліки. Закон Ламберта-Бера. Поглинання ІК, УФ- і видимого світла. Люмінесценція. Технології, що застосовуються в оптичних сенсорах. Іммобілізовані реагенти. Типи оптичних хвилеводів в хімічних сенсорах. Оптичні волокна: структура та поширення світла. Оптоди. Пасивні волоконно-оптичні сенсорні платформи. Активні волоконно-оптичні сенсорні платформи. Планарні оптичні сенсори. Капілярні хвилеводи. Особливості застосування волоконної оптики в хімічних сенсорах.

Спектроскопія поглинання в УФ-та видимому діапазоні. Флуоресцентна спектроскопія. Рівняння Штерна-Фольмера. Флуоресцентні реагенти. Спектроскопія внутрішнього відбиття. Затухаючі хвилі. Методи на основі відбивної здатності. Ослаблена повна відбивна здатність. Флуоресценція повного внутрішнього відбиття. Дифузна (розсіяна) відбивна спектрометрія. Поверхневий плазмонний резонанс. Сенсори на основі плазмонного резонансу. Суть методу, особливості застосування в хімічних сенсорах. Методи світлорозсіяння. типи світлорозсіяння. Спектроскопія квазіпружного світлорозсіяння.. Фотон-кореляційна спектроскопія. Лазерна допплер-флоуметрия. Схеми перетворення в спектрохімічних сенсорах: пряме перетворення. та непрямі методи, які використовують конкурентне зв'язування.

Загальні відомості про люмінесценцію. Теоретичні основи роботи люмінесцентних сенсорів. Хронофлуорометри. Флуоресцентна спектроскопія. Вимірювання за стаціонарної флуоресценції. Метод індукції флуоресценції. Хемілюмінесценція і біолюмінесценція. Електрохімічно генерована хемілюмінесценція. Рамановская спектрометрія. Сенсори з люмінесцентними маркерами. Біолюмінесцентні і сцинтиляційні сенсори.

Оптичні вимірювання: оптичної щільності; коефіцієнта відбиття; люмінесценції. Оптичні трансдьюсери: оптичні мікрорезонатори, фотонні кристали.

Використання оптичних сенсорів: вимірювання pH, вимірювання кислотних і лужних газів (вуглекислого газу, аміаку),. застосування в біосенсорах, іончутливих сенсорах для визначення галогенідів, іонів натрію, калію та газових сенсорах (озон, кисень, сірководень, оксиди сірки, азоту, галогени)

Тема 11. Термометричні (калориметричні) хімічні сенсори

. Термометричні сенсори: термістори, конструкція та принцип дії. Температурні перетворювачі. Резистивні температурні перетворювачі термоелементи. Каталітичні сенсори (пеллістор, п'езокаталітичні сенсори).Принцип дії та застосування каталітичних газових сенсорів. Неізотермічний та ізотермічний режими роботи газових сенсорів. Конструкція пелістера. Схема використання пелістерів у газових сенсорах. Пристрої для вимірювання теплопровідності та їх використання.

Тема 12. Масочутливі (гравіметричні) хімічні сенсори.

Суть п’єзоелектричного ефекту. Типи п’єзоелектричних матеріалів. Зміна маси п’єзокристалу в результаті селективної сорбції визначуваної речовини, її зв’язок з частотою коливань п’єзокристалу. Рівняння Зауербрея. Кварцові кристалічні мікроваги. Використання п’єзоелектричного ефекту в кварцових кристалічних мікровагах і в електрохімічних кварцових кристалічних мікровагах. П’єзоелектричний ефект і генерація акустичних хвиль.

Сенсори на поверхневих акустичних хвилях. Поширення акустичних хвиль. Об'ємні акустичні хвилі, які зумовлюють поздовжній зсув. Згасаючі (затухаючі) хвилі. Хвилі Лемба. Об'ємні акустичні хвилі, які зумовлюють поперечний зсув.

Основні параметри масочутливих хімічних сенсорів, вибір робочої частоти. Особливості застосування масочутливих сенсорів. Використання п'єзоелектричного ефекту для аналізу розчинів та газів. Застосування в біосенсорах.

Тема 13. Біологічні сенсори

Загальна характеристика біосенсорів. Основні особливості біосенсорів як хімічних сенсорів. Типові конструкції біосенсорів. Фактори, які впливають на характеристики біосенсорів: кількість ферменту, метод іммобілізації, pH буфера. Класифікація біосенсорів. Ферментні сенсори. Субстратні та інгібіторні сенсори. Імуносенсори. ДНКсенсори. Біосенсори на основі мікроорганізмів, живих клітин і тканин. Три покоління біосенсорів: перше покоління – кисневий електрод; друге покоління – медіатори,. третє покоління – ферментні електроди.

Загальна характеристика методів іммобілізації активних компонентів біосенсора. Методи нековалентної іммобілізації: Адсорбція. Фізичне захоплення в полімерну матрицю. Електрополімеризація. Пошаровий метод. Включення в полііонні комплекси. Ліпід-мембранні сенсори. Плівки Ленгмюра-Блоджетт. Біосенсори на самозібраних мономолекулярних шарах. Фотополімеризовані шари. Мікрокапсулювання. Афінна іммобілізація. Методи ковалентної іммобілізації. Загальна характеристика. Кроссшивання. Метод молекулярного імпрінту. Іммобілізація ДНК, мікроорганізмів і надмолекулярних структур.

Ензимні електроди. Принцип роботи ензимного електрода. Оксиредуктази. Активні центри в оксидазах і пероксидазах. Медіатори електронного перенесення і схема функціонування медіаторного ферментного сенсора. Рівняння Міхаеліса-Ментен та його електрохімічна видозміна. Швидкість ензимної реакції в кінетичному і дифузійному режимах. Пряме електронне перенесення в системах ензим – електрод. Потенціометричні біосенсори. Амперометричні біосенсори. Кондуктометричні біосенсори. П'єзоелектричні методи у біосенсориці. Оптичні методи у біосенсориці. Біосенсори на основі польових транзисторів. Біосенсори, засновані на хемірезисторах.

Тема 14. Хімічні сенсори в автоматичних системах контролю.

Інтелектуальні хімічні сенсори. Полісенсорні аналізатори. Системи «електронний ніс», «електронний язик». Математичні моделі для обробки інформації системи «електронний ніс», «електронний язик».

Автоматичні системи управління хімічних процесів із застосуванням хімічних сенсорів. Системи моніторингу повітря робочої зони. Системи обліку викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище.

.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Навчальні матеріали, зазначені нижче, доступні у бібліотеці університету та у бібліотеці кафедри технології електрохімічних виробництв. Обов'язковою до вивчення є базова література, інші матеріали – факультативні. Розділи та теми, з якими студент має ознайомитись самостійно, викладач зазначає на лекційних та практичних заняттях.

Базова:

1. *Bănică F.G. Chemical Sensors and Biosensors: Fundamentals and Applications. – John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK., 2012. 580p. DOI: 10.1002/9781118354162*

2. *Progresses in Chemical Sensor. / Wang W. (Ed.). – IntechOpen, 2016. – 190 p. DOI: 10.5772/61376*
3. *Kohl C.-D.; Wagner T. Gas Sensing Fundamentals – Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors, 2014. – 342 p. DOI: 10.1007/978-3-642-54519-1.*
4. *Janata J. Principles of chemical sensors. – Springer Science & Business Media., 2010. – 382 p. – DOI: 10.1007/978-0-387-69931-8*
5. *Чвірук В.П., Поляков С.Г., Герасименко Ю.С. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ – Київ.: Академперіодика, 2007. – 324 с*

Додаткова

1. *Mirzaei A., Ansari H.R., Shahbaz M., Kim J.Y., Kim H.W., Kim S.S. (2022). Metal Oxide Semiconductor Nanostructure Gas Sensors with Different Morphologies. Chemosensors, 10(7), 289. DOI: 10.3390/chemosensors10070289*
2. *Lee D.Y., Yu J.B., Byun H.G., Kim H.J. (2022). Chemoresistive Sensor Readout Circuit Design for Detecting Gases with Slow Response Time Characteristics. Sensors, 22(3), 1102. DOI: 10.3390/s22031102*
3. *Duan Q., Liu Y., Chang S., Chen H., Chen J.H. (2021). Surface plasmonic sensors: sensing mechanism and recent applications. Sensors, 21(16), 5262. DOI: 10.3390/s21165262*
4. *Mahato K., Wang J. (2021). Electrochemical sensors: From the bench to the skin. Sensors and Actuators B: Chemical, 344, 130178. DOI: 10.1016/j.snb.2021.130178*
5. *Wang X.D., Wolfbeis O.S. (2019). Fiber-optic chemical sensors and biosensors (2015–2019). Analytical chemistry, 92(1), 397-430.DOI: 10.1021/acs.analchem.9b04708*
6. *Neema P.M., Tomy A.M., Cyriac J. (2020). Chemical sensor platforms based on fluorescence resonance energy transfer (FRET) and 2D materials. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 124, 115797. DOI: 10.1016/j.trac.2019.115797*
7. *Kuchmenko T A., Lvova L.B. (2019). A perspective on recent advances in piezoelectric chemical sensors for environmental monitoring and foodstuffs analysis. Chemosensors, 7(3), 39. DOI: 10.3390/chemosensors7030039*
8. *Panneerselvam G., Thirumal V., Pandya H. M. (2018). Review of Surface Acoustic Wave Sensors for the Detectionand Identification of Toxic Environmental Gases/Vapours. Archives of Acoustics, 357-367. DOI: 10.24425/12390810.24425/123908*

Інформаційні ресурси

11. *Дистанційний курс Google G Suite for Education. Режим доступу: Google Classroom (Google G Suite for Education, домен LLL.kpi.ua, платформа Sikorsky-distance); код курсу **m4mfwge**.*

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття

Проведення лекцій з дисципліни проводиться паралельно з розглядом питань, що виносяться на самостійну роботу. При проведенні лекцій застосовуються засоби для відеоконференцій (Google

Meet, Zoom тощо) та ілюстративний матеріал у вигляді презентацій, які розміщені на платформі Sikorsky-distance [29]. Після кожної лекції рекомендується ознайомитись з матеріалами, рекомендованими для самостійного вивчення, а перед наступною лекцією – повторити матеріал попередньої.

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань
1	Хімічні сенсори. Метрологічне забезпечення функціювання хімічних сенсорів. Критерії віднесення аналітичного пристрою до хімічних сенсорів. Загальні відомості. Основні поняття і терміни. Основні види хімічних і фізичних взаємодій, що використовуються в хімічних сенсорах. Класифікація сенсорів. Параметри і характеристики сенсорів. Особливості використання хімічних сенсорів і сенсорних аналізаторів, їх переваги та недоліки. Області застосування. Метрологічні характеристики хімічних сенсорів. Передавальна функція.. Похибки вимірювань. Статистична оцінка вихідного сигналу. Методи повірки, калібрування та діагностики хімічних сенсорів. Метрологічне забезпечення єдності вимірювань в Україні. Державні стандартні зразки складу водних розчинів іонів металів і неметалів. Еталонні балонні газові суміші. Мікрогенератори повірочних газових сумішей.
2	Електрохімічні сенсори. Потенціометричні сенсори. Електрохімічні системи. Класифікація електродів. Конструктивні особливості електродів. Електроліти включаючи тверді. Рівноважні та нерівноважні процеси в електрохімічних системах. Процеси перенесення речовини на межі розділу фаз. Нефарадеєвські процеси. Фарадеєвскі процеси. Електрохімічні сенсори. Основні типи електрохімічних сенсорів: кондуктометричні, потенціометричні, кулонометричні, вольтамерометричні (включаючи амперметричні). Параметри електрохімічних сенсорів. Потенціометричні сенсори: схема електрохімічного ланцюга. ЕРС електрохімічної комірки. Іон-селективні мембрани. Рівняння Доннана. Іон селективні електроди їх класифікація та характеристика. Конструкції іон селективних електродів. Потенціал іон-селективного електроду. Рівнянням Нікольського. Характеристики потенціометричного іон селективного сенсора. . Потенціометричні газові сенсори з твердим електролітом. Види потенціометричних газових сенсорів з твердим електролітом.

3	*Вольтамперометричні сенсори. Амперметричні сенсори.* *Електролітичний струм і його аналітичне значення. Зв'язок між величиною струму і кількістю речовини, що бере участь в електродному процесі. Вольтамперометрія з лінійною розгорткою потенціалу. Рівняння Рендлса-Шевчика. Циклічна вольтамперометрія. Квадратно-хвильова вольтамперометрія. Хроноамперометрія. Рівняння Коттрелла. Проточно-інжекційний аналіз.* *Амперметрія. Кінетика електродних процесів в амперметричних сенсорах. Гетерогенний окислювально-відновний каталіз. Поверхнева активація електрохімічних реакцій. Гомогенний окислювально-відновний (медіаторний) каталіз. Електродні матеріали. Особливості будови, способи модифікування електродів для одержання чутливих елементів амперметричних сенсорів. Конфігурація та технічні показники амперметричних сенсорів.*
4	*Кулонометричні сенсори. Сенсори на основі електричного імпедансу та кондуктометричні сенсори.* *Закони Фарадея. Вихід за струмом. Кулонометричні генератори еталонних та повірочних сумішей.* *Електропровідність. Основні поняття. Електричний імпеданс: основні поняття і визначення. Вимірювання електропровідності. Імпедансний відгук сенсора. Конструкція кондуктометричних комірок. Кондуктометричні сенсори з твердотільним електролітом. Імпедансометричні сенсори для визначення газів та парів. Резистивні сенсори вологості. Зміна діелектричної сталої залежно від кількості адсорбованого компонента. Конструкція ємнісних сенсорів. Ємнісний сенсор вологості. Ємнісний газовий сенсор.*
5	*Напівпровідникові сенсори.* *Напівпровідникові матеріали. Зонна теорія напівпровідників. Структура метал - діелектрик – напівпровідник (МНП). Основні типи напівпровідникових сенсорів.* *Резистивні напівпровідникові газові сенсори. Напівпровідникові метал оксидні газові сенсори. Структура сенсора. Механізм роботи резистивного сенсора. Виготовлення метал оксидних хеморезисторів. Синтез і напилення металевих оксидів. Хеморезистори на основі органічних матеріалів. Застосування наноматеріалів в резистивних газових сенсорах. Селективність і чутливість хеморезисторів. Вплив вологості на сигнал. Резистивні газові напівпровідникові сенсорні матриці. Газові сенсори які базуються на діодах Шотткі.* *Хімічно чутливі польові транзистори (ХЧПТ) зі структурою електроліт-діелектрик-напівпровідник. Будова та механізм роботи сенсора. Електроди для ХЧПТ-сенсорів. Польові pH-сенсори. Газові зонди на основі pH ХЧПТ. ХЧПТ з мембранним покриттям. Ферментативні сенсори на основі польових транзисторів.* *Напівпровідникові газові сенсори. Газові сенсори, засновані на метал оксидний напівпровідниковий польовий транзистор (МОНПТ). Водневі сенсори на МОНПТ. Сенсори для інших газів на МОНПТ. Органічні напівпровідники як газочутливі матеріали. Органічні напівпровідникові газові сенсори на МОНПТ. Механізм роботи газових сенсорів на МОНПТ*

6	*<u>Оптичні хімічні сенсори.</u>* *Оптичні хімічні сенсори – класифікація та області їх застосування. Переваги і недоліки. Закон Ламберта-Бера. Поглинання ІК, УФ- і видимого світла. Люмінесценція. Технології, що застосовуються в оптичних сенсорах. Іммобілізовані реагенти. Типи оптичних хвилеводів в хімічних сенсорах. Оптичні волокна: структура та поширення світла. Оптоди. Пасивні волоконно-оптичні сенсорні платформи. Активні волоконно-оптичні сенсорні платформи. Планарні оптичні сенсори. Капілярні хвилеводи. Особливості застосування волоконної оптики в хімічних сенсорах.* *Спектроскопія поглинання в УФ-та видимому діапазоні. Флуоресцентна спектроскопія. Рівняння Штерна-Фольмера. Флуоресцентні реагенти. Спектроскопія внутрішнього відбиття. Затухаючі хвилі. Методи на основі відбивної здатності. Ослаблена повна відбивна здатність. Флуоресценція повного внутрішнього відбиття. Дифузна (розсіяна) відбивна спектрометрія.* *Поверхневий плазмонний резонанс. Сенсори на основі плазмонного резонансу. Суть методу, особливості застосування в хімічних сенсорах. Методи світлорозсіяння. типи світлорозсіяння. Спектроскопія квазіпружного світлорозсіяння.. Фотон-кореляційна спектроскопія. Лазерна допплер-флоуметрия. Схеми перетворення в спектрохімічних сенсорах: пряме перетворення. та непрямі методи, які використовують конкурентне зв'язування.* *Загальні відомості про люмінесценцію. Теоретичні основи роботи люмінесцентних сенсорів. Хронофлуорометри. Флуоресцентна спектроскопія. Вимірювання за стаціонарної флуоресценції. Метод індукції флуоресценції. Хемілюмінесценція і біолюмінесценція. Електрохімічно генерована хемілюмінесценція. Рамановская спектрометрія. Сенсори з люмінесцентними маркерами. Біолюмінесцентні і сцинтиляційні сенсори.* *Оптичні вимірювання: оптичної щільності; коефіцієнта відбиття; люмінесценції. Оптичні трансдьюсери: оптичні мікрорезонатори, фотонні кристали.* *Використання оптичних сенсорів.*

7	*Термометричні (калориметричні) та масочутливі (гравіметричні) хімічні сенсори* *Термометричні сенсори: термістори, конструкція та принцип дії. Температурні перетворювачі. Резистивні температурні перетворювачі термоелементи. Каталітичні сенсори (пеллістор, п'езокаталітичні сенсори).Принцип дії та застосування каталітичних газових сенсорів. Неізотермічний та ізотермічний режими роботи газових сенсорів. Конструкція пеллістора. Схема використання пеллісторів у газових сенсорах. Пристрої для вимірювання теплопровідності та їх використання.* *Суть п'єзоелектричного ефекту. Типи п'єзоелектричних матеріалів. Кварцові кристалічні мікроваги. Рівняння Зауербрея. П'єзоелектричний ефект і генерація акустичних хвиль. Сенсори на поверхневих акустичних хвилях. .Поширення акустичних хвиль. Об'ємні акустичні хвилі, які зумовлюють поздовжній зсув. Згасаючі (затухаючі) хвилі. Хвилі Лемба. Об'ємні акустичні хвилі, які зумовлюють поперечний зсув.* *Основні параметри масочутливих хімічних сенсорів, вибір робочої частоти. Особливості застосування масочутливих сенсорів. Використання п'єзоелектричного ефекту для аналізу розчинів та газів. Застосування в біосенсорах.*
8	*Біологічні сенсори* *Загальна характеристика біосенсорів. Основні особливості біосенсорів як хімічних сенсорів. Типові конструкції біосенсорів. Фактори, які впливають на характеристики біосенсорів. Класифікація біосенсорів. Загальна характеристика методів іммобілізації активних компонентів біосенсора.* *Ензимні електроди. Принцип роботи ензимного електрода. Оксиредуктази. Активні центри в оксидазах і пероксидазах. Медіатори електронного перенесення і схема функціонування медіаторного ферментного сенсора. Рівняння Міхаеліса-Ментен та його електрохімічна видозміна.* *Потенціометричні біосенсори. Амперометричні біосенсори. Кондуктометричні біосенсори. П'єзоелектричні методи у біосенсориці. Оптичні методи у біосенсориці. Біосенсори на основі польових транзисторів. Біосенсори, засновані на хемірезисторах.*
9	*Інтелектуальні хімічні сенсори* *Полісенсорні аналізатори. Системи «електронний ніс», «електронний язик». Математичні моделі для обробки інформації системи «електронний ніс», «електронний язик».* *Автоматичні системи управління хімічних процесів із застосуванням хімічних сенсорів. Системи моніторингу повітря робочої зони. Системи обліку викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище.*

Лабораторні роботи

Основні завдання циклу лабораторних занять – це використання одержаних на лекціях знань, ознайомлення з технічною реалізацією відомих з лекційного курсу процесів та закріплення теоретичного матеріалу.

№ з/п	Назва лабораторної роботи	Кількість ауд. годин
1	Вивчення впливу природи електрокаталізатора на величину вихідного сигналу та селективність електрохімічних сенсорів діоксиду сульфуру для моніторингу повітряного середовища	6
2	Визначення вихідних характеристик електрохімічних сенсорів амперметричного типу для визначення вмісту спирту в повітряному середовищі.	6
3	Визначення концентрації газового компонента непрямим кулонометричним методом з використанням двох амперметричних сенсорів	6
4	Визначення вмісту кисню та перекису водню у воді з використанням вольамперметричних сенсорів.	6
5	Визначення концентрації компонента розчину потенціометричним методом.	6
6	Хронопотенціометричне визначення коефіцієнту дифузії іонів міді в водних розчинах.	6
	Всього	36

6. Самостійна робота студента/аспіранта

Самостійна робота студента (СРС) протягом семестру включає повторення лекційного матеріалу, проведення розрахунків та оформлення звітів з лабораторних робіт; виконання домашньої контрольної роботи, підготовка до екзамену. Рекомендована кількість годин, яка відводиться на підготовку до зазначених видів робіт:

Вид СРС	Кількість годин на підготовку
Підготовка до аудиторних занять: повторення лекційного матеріалу; проведення розрахунків та оформлення звітів з лабораторних робіт; підготовка до проведення практичних завдань та виконання розрахунків	3 – 4 годин на тиждень
Виконання домашньої контрольної роботи	10 годин
Підготовка до екзамену	20 годин
Всього на СРС	96 годин

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

У звичайному режимі роботи університету лекційні та лабораторні заняття проводяться в навчальних аудиторіях. У змішаному режимі лекційні заняття проводяться через платформу дистанційного навчання Сікорський, лабораторні заняття – в навчальних аудиторіях. У дистанційному режимі всі заняття проводяться через платформу дистанційного навчання Сікорський. Відвідування лекційних та лабораторних занять є обов'язковим.

Правила захисту лабораторних робіт:

1. *До захисту допускаються студенти, які виконали лабораторну роботу, правильно виконали розрахунки та вірно оформили протокол з лабораторної роботи (при неправильно виконаних розрахунках чи неякісному оформлені недоліки слід усунути).*
2. *Захист відбувається або на лабораторних заняттях під час технологічно обумовлених перерв, або на консультаціях з дисципліни, які проводяться щотижнево.*

3. *Після захисту лабораторної роботи, який полягає у виконанні індивідуального розрахункового завдання або теоретичному опитуванні по темі лабораторної роботи викладачем виставляється загальна оцінка і робота вважається захищеною.*
4. *Несвоєчасний захист – наявність більше одної незахищеної роботи – в звичайному та змішаному режимах роботи Університету є підставою для не допуску до виконання наступної лабораторної роботи.*

Правила призначення заохочувальних та штрафних балів:

1. *Запізнення на лабораторне заняття (зумови їх проведення в звичайному та змішаному режимах роботи Університету) штрафується 0,25 бала за кожні 15 хвилин запізнення, тому що призводять до затримки виконання усіє бригадою студентів;*

Політика дедлайнів та перескладань: визначається п. 8 Положення про поточний, календарний та семестровий контроль результатів навчання в КПІ ім. Ігоря Сікорського

Політика щодо академічної доброчесності: визначається політикою академічної чесності та іншими положеннями Кодексу честі університету.

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

Поточний контроль: виконання та захист лабораторних робіт, виконання домашньої контрольної роботи.

Рейтингова система оцінювання результатів навчання

Рейтингова система оцінювання результатів навчання

Рейтинг студента з кредитного модуля розраховується виходячи із 100-бальної шкали, з них 60 бали складає стартова шкала. Стартовий рейтинг (протягом семестру) складається з балів, що студент отримує за:

- *виконання та захист 6 лабораторних робіт - в звичайному та змішаному режимах роботи Університету, або 5 лабораторних робіт - в дистанційному режимі роботи Університету;*
- *виконання домашньої контрольної роботи;*

***Критерії нарахування балів**:*

1. ***Виконання лабораторних робіт***

*Ваговий бал – **6 балів.** Бали за лабораторну роботу розраховуються як сума балів за виконання окремих етапів роботи – допуск (1 бал), виконання роботи (2 бала), якість оформленого протоколу (1 бал) та захист роботи (2 бала). Оцінювання роботи проводиться за наступною шкалою:*

Допуск до роботи

- *при перевірці готовності до ЛР надаються вірні і вичерпні відповіді; підготовлено в повному обсязі схему протоколу лабораторної роботи – 1,0 бал;*
- *при перевірці готовності студент має утруднення при формулюванні вірних відповідей; є зауваження щодо підготовки протоколу – 0,5 балів;*

Виконання лабораторної роботи

- *безпомилкове виконання завдання ЛР в повному обсязі з наявністю елементів творчого підходу при безумовному додержанні правил і норм техніки безпеки – 2,0 бала;*
- *виконання завдання ЛР в повному обсязі при додержанні правил і норм техніки безпеки – 1,5 бала;*
- *виконання завдань ЛР в повному обсязі при наявності зауважень з боку викладача щодо необґрунтованого відхилення від методичних вказівок або щодо додержання вимог техніки безпеки – 1,0 бал;*

- *невиконання завдань ЛР в повному обсязі за відведений час при наявності зауважень з боку викладача щодо вірності виконання роботи або додержання вимог техніки безпеки – 0,5 балів;*

Захист лабораторної роботи та якість оформленого протоколу

- *наявність впевнених знань і набутих вмінь з завдань виконаної ЛР; бездоганне оформлення протоколу та інших матеріалів – 3,0 бала (не менше 90 % потрібної інформації);*
- *наявність суттєвих зауважень щодо повноти, грамотності і охайності при оформленні матеріалів з виконаної ЛР – 2,0 бал (не менше 60 % потрібної інформації);*
- *значні зауваження щодо повноти і оформлення протоколу; неспроможність дати відповідь по виконаній роботі – 0,5 бала.*

2. Домашня контрольна робота (ДКР)

Ваговий бал –24 ***балів****. Кожне завдання на ДКР складається з 6 питань теоретичного характеру (ваговий бал 4). Кількість балів за ДКР розраховується як сума балів за кожне питання. Оцінювання проводиться за наступною шкалою:*

- *бездоганна відповідь на завдання при наявності елементів продуктивного (творчого) підходу; демонстрація вміння впевненого застосування фундаментальних знань з хімії при відповіді на контрольне завдання – 4 бала;*
- *наявність 1-2 незначних, непринципових помилок при відповіді на контрольне завдання – 3 бала;*
- *наявність суттєвих помилок при відповіді на контрольне завдання - 1 бал;*
- *наявність принципових помилок при відповіді на контрольне завдання – 0 балів.*

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу. Умовою отримання позитивної оцінки з календарного контролю є рейтинг студента 50 % від максимально можливого на час календарного контролю. На ***першому календарному контролі*** *(8-й тиждень) студент отримує «атестований», якщо його поточний рейтинг не менше 0,5·9[1]=****5 балів****. На* ***другому календарному контролі*** *(14-й тиждень) студент отримує «атестований», якщо його поточний рейтинг не менше 0,5·21[2]=****11 балів****.*

Семестровий контроль: усний екзамен.

На екзамені студенти мають відповісти на питання екзаменаційного білета. Кожен білет містить чотири теоретичних питання, які оцінюються у ***10 балів*** *кожне. Кожне запитання (завдання) оцінюється за такими критеріями:*

- *повна відповідь на запитання з елементами оригінального, творчого підходу до пояснення прийнятих рішень, обґрунтування цих рішень на основі демонстрації вмінь залучати фундаментальні знання з хімії - 9-10 балів (не менше 90 % потрібної інформації);*
- *повна і взагалі вірна відповідь на запитання з 1–5 незначними помилками або зауваженнями - 7-8 балів (не менше 75 % потрібної інформації);*
- *взагалі вірна відповідь на запитання з 5–6 незначними помилками та 1–2 зауваженнями принципового характеру, пов'язаного з неповнотою знань з фундаментальних основ - 6 балів (не менше 60 % потрібної інформації);*
- *незадовільна відповідь - 0 балів.*

Максимальна сума балів, яку студент може набрати протягом семестру, складає 60 балів:

$$RC = r_{лр} + r_{дкр} = 36 + 24 = 60 \text{ балів.}$$

Умовою допуску до екзамену є написання ДКР, виконання лабораторних робіт та кількість рейтингових балів не менше 30.

---

[1] Максимальна кількість балів, яку може набрати студент протягом 8 тижнів.

[2] Максимальна кількість балів, яку може набрати студент протягом 14 тижнів.

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

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

- *Перелік завдань до ДКР та для підготовки до екзамену наведені у Google Classroom «Інноваційні сенсорні методи для моніторингу техногенних середовищ» (платформа Sikorsky-distance).*
- *Перелік матеріалів, якими дозволено користуватись під час екзамену – під час екзамену студенту заборонено використовувати будь-які допоміжні матеріали та літературу. За порушення вимог студенти усуваються від екзамену.*

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено старшим викладачем кафедри технології електрохімічних виробництв, к.т.н. Кушмируком Андрієм Івановичем.

Ухвалено кафедрою технології електрохімічних виробництв (протокол № 14 від 24.06.2022)

Погоджено Методичною комісією факультету (протокол № 10 від 23.06.2022)