

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
«Ужгородський національний університет»

В. В. ЦИГИКА, Ю. Ю. ЖИГУЦ

**МЕТОДИ, ПРИЛАДИ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ  
ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**Конспект лекцій для студентів інженерно-технічного факультету**

Ужгород 2021

**Цигика В.В., Жигуц Ю.Ю. МЕТОДИ, ПРИЛАДИ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА. Конспект лекцій для студентів інженерно-технічного факультету.– Ужгород: 2021. – 60 с.**

В конспекті лекцій розширено розглянуто питання одного з розділів курсу «Вимірювання фізичних величин», а саме, питання вимірювання параметрів навколишнього середовища. Моніторинг стану довкілля надзвичайно актуальний в епоху глобальних кліматичних змін. В цій галузі широко застосовують інформаційні технології та автоматизовані системи, відомості про які наведено в даному конспекті лекцій. Призначено для студентів, які прагнуть поглиблено ознайомитись з основними напрямками сучасного екологічного моніторингу в рамках вивчення курсів «Вимірювання фізичних величин», «Безпека життєдіяльності та основи охорони праці».

***Автори:***

**Цигика Володимир Васильович**, канд. фіз.-мат. наук, доц. кафедри приладобудування ДВНЗ «УжНУ»

**Жигуц Юрій Юрійович**, проф., док. техн. наук, зав. кафедри технології машинобудування ДВНЗ «УжНУ»,

***Рецензенти:***

**Грицай І.Е.** – док. техн. наук, проф., зав. кафедри технології машинобудування Львівського національного технічного університету «Львівська політехніка»,

**Сегеда Ю.М.** – канд. фіз.-мат. наук, доц. кафедри технології машинобудування ДВНЗ «Ужгородський національний університет».

Затверджено на засіданні кафедри приладобудування

« 31 » \_\_\_\_\_ 08 \_\_\_\_\_ 2021 р., протокол №  1

Схвалено методичною комісією інженерно-технічного факультету “  15  ”  
\_\_\_\_\_ 09 \_\_\_\_\_ 2021 р., протокол №  1

© В.В.Цигика ,Ю.Ю.Жигуц, 2021

## ЗМІСТ

Вступ	4
1. Функціональні блоки систем екологічного моніторингу	6
2. Основні критерії стану довкілля. Екологічне нормування антропогенних навантажень.	7
3. МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ	9
3.1. Особливості проектування сучасних приладів контролю параметрів навколишнього середовища	9
3.2. Методи моніторингу хімічного забруднення навколишнього середовища	10
3.2.1. Електрохімічні методи аналізу	11
3.2.1.1. Потенціометрія	12
3.2.1.2. Методи засновані на явищі електролізу	17
3.2.1.3. Кондуктометрія	21
3.2.2. Застосування адсорбційних чутливих елементів (АЧЕ) в аналітичних приладах	25
3.2.3. Спектральні методи аналізу	27
3.2.4. Методи, засновані на розділенні компонентів	31
3.2.4.1. Хроматографічні методи аналізу	31
3.2.4.2. Мас-спектрометрія	33
3.3. Запитання для контролю знань	37
3.4. Методи моніторингу фізичного забруднення навколишнього середовища	38
3.4.1. Шкала електромагнітних хвиль	38
3.4.2. Електромагнітні поля частотою до 300 ГГц	39
3.4.2.1. Вимірювання характеристик електричного поля	44
3.4.2.2. Вимірювання характеристик магнітного поля	47
3.4.3. Випромінювання оптичного діапазону	47
3.4.3.1. Джерела світла	49
3.4.3.2. Датчики оптичного випромінювання	50
3.4.4. Іонізуючі випромінювання	52
3.4.5. Шумове забруднення	56
3.4.6. Оцінка аерозольного забруднення	57
3.5. Запитання для контролю знань	59
Список літератури	60

## ВСТУП

В конспекті лекцій розширено розглянуто питання одного з розділів курсу «Вимірювання фізичних величин», а саме, питання вимірювання параметрів навколишнього середовища. Моніторинг стану довкілля надзвичайно актуальний в епоху глобальних кліматичних змін. В цій галузі широко застосовуються інформаційні технології та автоматизовані системи, відомості про які наведено в даному матеріалі. Призначено для студентів, які прагнуть поглиблено ознайомитись з основними напрямками сучасного екологічного моніторингу.

Середовище життєдіяльності, тобто все оточення, в якому відбувається діяльність людини, містить такі компоненти, як природне середовище, соціальне і техногенне, яке, в свою чергу, поділяється на виробниче і побутове. Виробниче середовище найбільш небезпечне для людини: саме на виробництві діють підвищені рівні електромагнітного поля, шуму і вібрації, зростає вплив таких психофізіологічних факторів як стрес і втома, в повітрі робочої зони часто присутні токсичні речовини. Для забезпечення прийнятних умов життєдіяльності потрібно здійснювати контроль стану навколишнього середовища на різних рівнях. В глобальному масштабі такий контроль можливий в результаті створення систем екологічного моніторингу.

На Стокгольмській конференції з охорони навколишнього середовища, яка відбулася під егідою ООН в 1972 році, було прийнято визначення терміну «екологічний моніторинг». А саме, екологічним моніторингом називають систему спостережень, оцінки і прогнозу змін стану навколишнього середовища під впливом антропогенних факторів. Основними задачами екологічного моніторингу є спостереження за станом біосфери, оцінка цього стану і прогноз змін, визначення ступеня антропогенного впливу на навколишнє середовище, виявлення факторів та джерел впливу.

Як в природі, так і в суспільстві окремі явища є взаємоузгодженими і повинні трактуватися у межах системного підходу. Стосовно техногенних і природно-техногенних небезпек, прикладами яких є забруднення довкілля, деградація ґрунтів, повені та багато інших, найбільш бажаною концепцією безпеки є передбачення ймовірної аварії чи катастрофи і прийняття превентивних заходів з метою уникнення можливих негативних наслідків. Складність питань в галузі екологічної безпеки поглиблюється у зв'язку із існуванням прихованих небезпек, тобто небезпек неявного характеру, на які не реагують органи чуття людини, яких не було у доіндустріальну епоху і які виникають у сучасному світі інформаційних технологій. Тому зростає актуальність

розробки, вдосконалення і широкого застосування ефективних засобів спостереження за навколишнім середовищем, які реалізуються на базі сучасних приладів, автоматизованих комплексів та комп'ютерних технологій.

У процесі спостережень за станом навколишнього середовища вивчаються складні багаторівневі системи, для аналізу яких застосовують досягнення багатьох природничих наук, серед яких провідну роль відіграють біологія, аналітична хімія, геофізика, природничі та інженерно-технічні дисципліни. Напрямки і методи досліджень в цій сфері надзвичайно різнопланові і формуються фахівцями різних галузей.

Розглянемо класифікацію систем екологічного моніторингу з урахуванням чисельності напрямків і особливостей проведення спостережень стану навколишнього середовища.

Можливий варіант класифікації за рівнем (масштабом охоплених територій) та за способом реалізації. За масштабом розрізняють глобальний, регіональний, локальний, точковий моніторинг. За способом реалізації – аналітичний і параметричний моніторинг. Аналітичний реалізують методами аналітичної хімії, найчастіше, інструментальними методами аналізу, тобто із застосуванням аналітичних приладів. Параметричний базується на математичному моделюванні, розрахунку викидів і скидів згідно із параметрами виробничих процесів. Його перевагою є відсутність необхідності застосування високовартісних і складних в експлуатації аналітичних приладів та систем.

У залежності від напрямку і особливостей реалізації розглядають види і підвиди моніторингу: фоновий, господарський, біологічний, контактний, дистанційний, кризовий, а також численні об'єктні види – атмосферний, гідросферний, ґрунтовий, сейсмічний та ін.

Фоновий екологічний моніторинг здійснюють у екосистемах, віддалених від об'єктів господарської діяльності і одним із його завдань є визначення середньостатистичного, тобто фонового рівня забруднення навколишнього середовища. Господарський моніторинг виконують, насамперед, з метою екологічного контролю промислових і сільськогосподарських підприємств. Біологічний моніторинг аналізує стан навколишнього середовища за допомогою живих організмів, виконується не тільки медико-біологічними методами досліджень, але і будь-якими іншими і є одним із найважливіших та інформативних, оскільки стан біологічної складової екосистем визначається інтегральними показниками рівня забруднення.

## 1. Функціональні блоки систем екологічного моніторингу

До системи екологічного моніторингу належать такі функціональні блоки:

- інформаційно-вимірювальна підсистема на базі автоматизованих постів екологічного контролю;
- пересувні пости екологічного контролю (пересувні автомобільні лабораторії, портативні прилади контролю тощо);
- підсистема інформаційних зв'язків між постами екологічного контролю;
- геоінформаційна підсистема, до складу якої належать графічні і тематичні бази даних екологічної спрямованості;
- підсистема моделювання, відновлення і прогнозування екологічних параметрів довкілля;
- підсистема інформаційної підтримки ухвалення управлінських рішень.

Організаційно до системи екологічного моніторингу належать первинні пости екологічного контролю і центральний пост системи.

Пост екологічного контролю передбачає стаціонарне встановлення датчиків контролю параметрів довкілля: температури, вологості, напрямку і швидкості вітру, рівнів радіаційного випромінювання, рівнів забрудненості (зокрема газоаналізаторів для визначення концентрації оксидів вуглецю, діоксиду азоту тощо).

Основним елементом автоматизованого поста екологічного моніторингу є контролер (мікропроцесорний блок), який виконує такі функції:

- опитування датчиків поста екологічного контролю з певним часовим інтервалом між моментами вимірювання;
- занесення інформації з датчиків контролю у пам'ять мікропроцесорного блока;
- зберігання у пам'яті отриманої інформації про параметри довкілля у разі припинення електроживлення;
- передавання інформації на персональний комп'ютер;
- пересилання інформації за допомогою модемного зв'язку зовнішнім користувачам мережею *Internet*.

У разі стаціонарного встановлення автоматизованих постів екологічного контролю отриману інформацію про стан довкілля можна накладати на топографічну карту.

Проблема інформаційного забезпечення особливо актуальна для виконання комплексних екологічних завдань. Під час впровадження

*комплексного екологічного моніторингу* необхідно спиратися на узагальнені характеристики стану довкілля тому, що об'єми навіть номінально достатньої інформації будуть досить великими. Інакше, належно обґрунтувати висновки і заходи не вдасться.

За умов отримання великого масиву взаємопов'язаної різноманітної екологічної інформації для виконання завдань екологічного моніторингу необхідно використовувати системний аналіз, який надає змогу «прив'язати» до географічної карти регіону багатоаспектний функціональний стан довкілля. Такий аналіз можливий на базі **автоматизованих геоінформаційних систем**, призначених для обробки просторово-часових параметрів довкілля.

Перевагою автоматизованих геоінформаційних систем є те, що в них реалізовано можливість зіставлення графічних (просторових) і табличних (атрибутивних) даних для використання їх у практиці картографічних запитів споживачів і створення єдиного інформаційного простору регіону.

## **2. Основні критерії стану довкілля. Екологічне нормування антропогенних навантажень**

Інформацію про стан довкілля можна отримати у вигляді переліку відповідних показників. Ці показники потрібно порівняти з показниками (гранично допустимими величинами) довкілля, які характеризують його задовільний стан. Вихід його за встановлені межі може згубно позначитися на здоров'ї людей чи навіть призвести до незворотного погіршення стану довкілля.

Людина є складовою природи і перетворення частини біосфери у техногенні об'єкти, тобто, формування техносфери, є закономірним явищем у еволюції нашої планети. Проте, цей етап взаємодії людини з природою характеризується невідповідністю масштабів діяльності суспільства з ресурсно-екологічними можливостями біосфери. Однією з основних причин виникнення сучасної екологічної кризи, яка проявляється, зокрема, у глобальних кліматичних змінах, викликаних антропогенною діяльністю, втратою здатності екосистем до саморегуляції, є забруднення навколишнього середовища.

Види антропогенного забруднення класифікують таким чином: хімічне, фізичне, біологічне, засмічення та ін.

Хімічне забруднення викликано надходженням в біосферу різноманітних ксенобіотиків, тобто чужорідних для живих організмів хімічних речовин, велика кількість серед яких відносно недавно синтезована людиною і, таким чином, в минулі часи навіть не надходила у кругообіг речовин у природі. До них відносяться,

наприклад, пестициди, поліциклічні ароматичні вуглеводні, синтетичні поверхнево-активні речовини, які є складовою частиною миючих засобів та багато інших, в тому числі, навіть харчові добавки та лікарські препарати.

До фізичного забруднення відносять, насамперед, електромагнітне випромінювання (ЕМВ), шум, термічне та радіаційне забруднення.

Біологічне забруднення спричинене надходженням в екосистеми невластивих їм мікро- та макроорганізмів.

Засмічення, тобто накопичення в навколишньому середовищі твердих відходів, набуло загрозливих масштабів на планетарному рівні.

Ключову проблему являє, насамперед, хімічне забруднення, спричинене техногенною діяльністю людини. У навколишнє середовище потрапляють небезпечні стічні води, гази, різні за розмірами і хімічним складом аерозолі. Дрібні пилові частинки, що перебувають у повітрі у зваженому стані, адсорбують отруйні гази, при значній концентрації яких утворюється густий токсичний туман (смог).

Питання, розглянуті у подальших розділах, у значній мірі стосуються методів контролю хімічного забруднення біосфери.

Для оцінки рівня хімічного забруднення навколишнього середовища застосовують поняття гранично допустима концентрація (ГДК). За визначенням ГДК – це максимальний рівень забруднення, який не спричиняє шкоди для здоров'я людини. Умовою безпеки стосовно такої концепції є співвідношення  $C/ГДК \leq 1$ , де  $C$  – фактична концентрація шкідливої речовини. При одночасній наявності декількох шкідливих речовин односпрямованої дії повинна виконуватись умова:

$$C_1/ГДК_1 + C_2/ГДК_2 + \dots + C_n/ГДК_n \leq 1,$$

де  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – фактичні, а  $ГДК_1, ГДК_2, \dots, ГДК_n$  – гранично допустимі концентрації шкідливих речовин.

Концентрація визначається як відносна кількість компонента в суміші. Розрізняють масову концентрацію, об'ємну концентрацію, молярну концентрацію, які визначають, відповідно, як відношення маси, об'єму або кількості речовини такого компонента до маси, об'єму або кількості речовини всієї суміші. Зокрема, концентрацію компонентів (шкідливих або будь-яких інших речовин) в повітрі найчастіше визначають в  $мг/м^3$ , у воді – в  $г/л$ ,  $мг/л$ . У зарубіжній літературі застосовують одиниці  $ppm$  (*parts per million*), причому, наприклад,  $1 ppm$  приблизно відповідає  $1 мг/л$ .

Для населених пунктів, селищ та міст визначають ГДК середньодобову та ГДК максимальну разову, для підприємств – ГДК робочої зони. Незважаючи на відпрацьованість, концепція ГДК має багато недоліків і демонструє очевидний факт неможливості запобігти



забрудненню навколишнього середовища в умовах виробничої діяльності. Проте, така концепція надзвичайно важлива для реалізації контролю та обмеження забруднення біосфери.

Нормування електромагнітного забруднення здійснюють в результаті визначення гранично допустимих рівнів (ГДР) дії електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на людину. У залежності від частотного діапазону, визначають граничну напруженість електричного і магнітного полів в одиницях В/м, А/м, або густину потоку енергії в мкВт/см<sup>2</sup>.

Нормування дії іонізуючого випромінювання здійснюють згідно дозиметричних одиниць та одиниць активності радіонуклідів. Параметри ГДК, ГДР, значення доз опромінення та ін. наведено у відповідних нормативних документах міністерств та відомств, які здійснюють екологічний контроль, наприклад у «Санітарних правилах та нормах» (САНПіН).

### **3. МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ**

Для спостереження за параметрами довкілля застосовують різноманітні методи, прилади і системи. Зокрема, контроль хімічного забруднення здійснюють в рамках сучасних досягнень електрохімії, оптичної спектроскопії, хроматографії, мас-спектрометрії. Окрім контактних (лабораторних) методів застосовують дистанційні, які відносяться виключно до спектральних, наприклад, зондування атмосфери за допомогою оптичних локаторів – лідарів.

Метою розділу є ознайомлення студентів природничих спеціальностей із основними приладами та методами контролю стану навколишнього середовища, навести приклади реалізації функціональних вузлів таких приладів на базі пристроїв аналогової і цифрової електроніки, мікропроцесорної техніки.

#### **3.1. Особливості проектування сучасних приладів контролю параметрів навколишнього середовища**

Узагальнена структурна схема будь-якого приладу екологічного моніторингу містить такі складові, як первинний вимірювальний перетворювач (ПВП), вторинний вимірювальний перетворювач (ВВП) та систему відображення інформації. ПВП, які за різними джерелами інформації називають сенсорами, датчиками чи давачами, є основною ланкою, що здійснює перетворення інформативного параметру у сигнал вимірюваної інформації, придатний для подальшої обробки. ВВП що, як

правило, складається з узгоджувальних ланок, підсилювачів, мікроконтролера здійснює підсилення сигналів, корекцію похибок, лінеаризацію характеристик та інші функції, необхідних для формування вихідного сигналу. В аналітичних приладах, які контролюють хімічне забруднення, структурна схема додатково містить пробозабірник, лінію транспортування проби, систему пробопідготовки та систему утилізації проби.

ПВП поділяють на генераторні, які здійснюють перетворення вхідної величини в енергію електричного чи іншого сигналу (термопари, фотодіоди, п'єзоелементи та ін.) і параметричні, які характеризуються зміною деякого параметру двополюсника (ємності, електроопору, індуктивності та ін.) при зміні вхідної величини.

Особливістю проектування сучасних приладів і систем екологічного моніторингу є широке застосування досягнень мікроелектроніки, комп'ютерно-інтегрованих та інформаційних технологій. Незважаючи на складність автоматизованих аналітичних та екологічних приладів і систем, завдяки сучасним технологіям спрощується їх розробка, експлуатація, інтерпретація результатів вимірювання. Останнім часом багато фірм починає серійно випускати датчики Холла, температури, вологості, адсорбційні чутливі елементи, датчики пилу та ін., які можна підключати до комп'ютера через перехідники, що входять в їх комплект. Користувачу залишається завантажити програму зняття даних і вимірювані параметри чи залежності виводяться на екран.

В багатьох випадках застосовують смарт-датчики, які складаються з ПВП, ВВП і мікроконтролера. Активно розвиваються безпроводні сенсорні мережі, в яких смарт-датчики і виконавчі елементи об'єднують між собою завдяки мініатюрним передавачам, що працюють в завданому радіодіапазоні. Безпроводні сенсорні мережі базуються, в основному, на стандарті ZigBee, основними застосуваннями якого є системи автоматизації житла, промислового управління, а також системи екологічного моніторингу. Таким чином, сучасні інформаційні технології спричиняють революційні зміни, в тому числі, і в реалізації контролю стану навколишнього середовища.

### **3.2. Методи моніторингу хімічного забруднення навколишнього середовища**

Екологічний моніторинг хімічного забруднення реалізується методами аналітичної хімії. Об'єктом хімічного аналізу є склад різних речовин, матеріалів і взагалі предметів навколишнього середовища. В ролі складових частин (компонентів) можуть виступати як хімічні

сполуки (речовини), так і елементи. На рівні мікросвіту елементи складаються з атомів, речовини з молекул, які, в свою чергу, можуть містити визначені сукупності атомів, наприклад, функціональні групи в молекулах органічних сполук.

Основними методами аналізу є хімічні, електрохімічні та спектральні (оптичні) методи. Будь-який метод хімічного аналізу використовує визначений сигнал, який в умовах дослідження дають елементарні об'єкти. Параметр, який несе інформацію про досліджувані об'єкти, називається аналітичним сигналом. Прикладами аналітичних сигналів є температура кипіння речовини, осадження речовини з розчину, спектр випромінювання та багато інших, які застосовують в різних методах.

Хімічними називають групу методів аналізу, які використовують сигнали, що виникають у процесі хімічних реакцій. Види хімічного аналізу: елементний, речовинний, якісний, кількісний, динамічний, фазовий, структурний та ін.

Електрохімічні методи базуються на взаємодії атомів, молекул, іонів з електронами на занурених в розчин електродах, а також на явищах, які відбуваються у процесі електролізу.

В спектральних методах аналітичний сигнал виникає при поглинанні, випромінюванні, розсіянні електромагнітного випромінювання в інфрачервоній, видимій, ультрафіолетовій чи рентгенівській області спектра.

Електрохімічні та спектральні методи часто називають, відповідно, фізико-хімічними та фізичними методами аналізу. Для нехімічних методів застосовують також і термін – інструментальні методи аналізу. В подальших пунктах цього розділу розглянуті основи таких інструментальних аналітичних методів, як електрохімічні, адсорбційні, спектральні і хроматографічні. Більш детальне ознайомлення з ними можливе із запропонованого списку літератури.

### **3.2.1. Електрохімічні методи аналізу**

До електрохімічних методів відносять потенціометрію, вольтамперометрію, кулонометрію та кондуктометрію, які, в свою чергу, теж мають багато різновидів. Нижче розглянуто основні принципи на яких засновані ці методи.

### 3.2.1.1. Потенціометрія

Потенціометрія базується на вимірюванні електродних потенціалів  $E$  і електрорушійних сил (ЕРС) гальванічних елементів різних типів. В потенціометрії застосовують широку номенклатуру електродів, які, у найпростішому випадку, представляють собою двофазну систему, одна з складових якої має електронну провідність, а інша – іонну, наприклад, система метал-розчин. Іншим типом є мембранні електроди зі структурою розчин-напівпроникна мембрана-розчин. Завдяки процесам окислення і відновлення, які полягають у віддачі і приєднанні електронів, відбувається перенесення електричного заряду через поверхню дотику двох фаз, виникає окислювально-відновний потенціал, що, згідно терміну *reduction-oxidation reaction*, називають редокс-потенціалом і який вимірюється у мілівольтах. Величина рівноважного потенціалу електрода, що називають індикаторним електродом, є функцією складу і концентрації досліджуваного розчину.

Розрізняють пряму потенціометрію і потенціометричне титрування. Пряма потенціометрія полягає у вимірюванні потенціалу індикаторного електрода відносно електрода обраного для порівняння. Визначення концентрації  $C$  іона в досліджуваному розчині проводять згідно градувального графіку, попередньо побудованого у процесі вимірювання ЕРС комірок з розчинами відомих концентрацій. Вимірювання  $E$  при потенціометричному титруванні відбувається у процесі хімічних реакцій між речовиною, концентрацію якої визначають, і відповідним реагентом (титрантом). Крива потенціометричного титрування надає можливість визначити точку еквівалентності, тобто зафіксувати досягнення стехіометричного співвідношення між реагентами, і за відомим об'ємом титранта розрахувати концентрацію  $C$ .

Електрод порівняння (стандартний електрод) – це електрод, потенціал якого має постійне значення та по відношенню до якого вимірюють потенціал індикаторних електродів. Найчастіше такий електрод – хлоридсрібний, основними конструктивними складовими якого є скляний корпус, розчин хлориду калію, срібний дріт, на поверхні якого осаждено шар малорозчинної солі  $AgCl$ . Промисловість виробляє різні типи хлоридсрібних електродів  $Ag|AgCl|KCl|Cl^-$ , де вертикальною рисою позначена поверхня розділу фаз.

Індикаторні електроди першого роду складаються з металу ( $Ag$ ,  $Cu$ ,  $Pb$  та ін.) і розчину, який містить іони цього металу. Такі електроди застосовують для визначення не тільки концентрації власних іонів, але й аніонів, що утворюють з цими іонами хімічні сполуки.

Інертні індикаторні електроди найчастіше виготовляють з платини, зануреної у розчин, що містить як окислену так і відновлену форму редоксіпару.

Іоноселективні електроди є електродами мембранного типу. Матеріал мембрани може бути як рідким, так і твердим, і відокремлює внутрішню частину електроду, тобто, внутрішній розчин, від досліджуваного розчину та має здатність пропускати, в переважній мірі, тільки певні іони. Найбільш часто застосовують мембрани, виготовлені з спеціального скла. Конструктивно такий електрод являє собою скляну трубку до якої припаяна скляна мембрана у вигляді кульки діаметром 8-10 мм з товщиною стінок не більше 0,1 мм. У трубці знаходиться внутрішній розчин, в який занурено контактний електрод.

Вимірювання ЕРС  $E_x$  гальванічних елементів необхідно виконувати без порушення електродних рівноважних станів, що реалізується тільки в режимі холостого ходу. Одним з варіантів є компенсаційний метод вимірювання за допомогою потенціометра постійного струму (ППС). Сутність цього методу вимірювання пояснює принципова електрична схема, наведена на рис. 9.1.

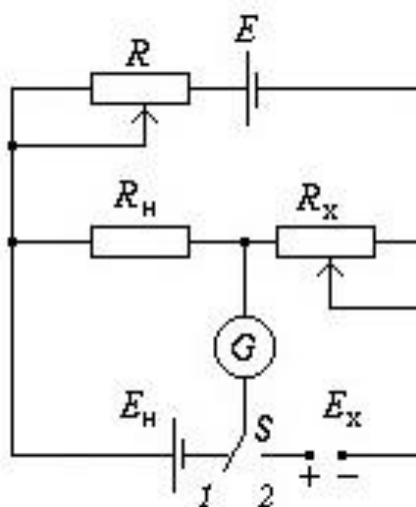


Рис. 3.1. Схема потенціометра постійного струму (компенсатора)

На схемі показані  $E_n$  – нормальний елемент, тобто гальванічний елемент, який є еталоном ЕРС з абсолютним значенням похибки  $\Delta E_n \leq \pm 0,5$  мВ,  $E_x$  – вимірювана ЕРС,  $G$  – гальванометр, тобто чутливий вимірювальний пристрій магнітоелектричної системи, який в такій схемі є нуль-індикатором сили струму,  $R_n$ ,  $R_x$  – зразкові резистори, опори яких відомі з відносною похибкою не вище  $\pm(0,01-0,001)\%$ ,  $E$  – джерело живлення.

Процес вимірювання  $E_x$  полягає у виконанні таких дій. Перемикач  $S$  встановлюють у положення 1 і добиваються нульових показів гальванометра зміною опору  $R$ . Умова відсутності струму в колі нормального елемента:

$$E_H = I \cdot R_H.$$

Після цього перемикач  $S$  встановлюють у положення 2 і добиваються нульових показів гальванометра зміною опору  $R_x$ , що можливе при  $E_x = I \cdot R_x$ . Враховуючи, що значення сили струму  $I$  не змінилося, тобто  $E_x/R_x = E_H/R_H$ , розраховують шукану електрорушійну силу:

$$E_x = E_H \cdot R_x / R_H.$$

Недоліками компенсаційного методу є громіздкість обладнання, складності вимірювання ЕРС гальванічних елементів з високим внутрішнім опором  $R_{вн.}$ , тому на практиці застосовують аналогові або цифрові вимірювальні пристрої, у складі яких є повторювачі напруги та підсилювачі сигналів.

Як приклад розглянемо вимірювання показника рН водних розчинів. Цей показник у певному наближенні являє собою від'ємний десятковий логарифм молярної концентрації іонів водню:

$$pH = -\lg[H^+].$$

Вода є слабким електролітом, ступінь електролітичної дисоціації якого на катіони водню і гідроксильні аніони мала, а саме, з  $10^7$  молекул дисоціює одна молекула води. Чиста вода має нейтральну реакцію, тобто, концентрація іонів  $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$ , отже, в нейтральній воді показник  $pH = 7$ . Для розчинів з кислою реакцією  $pH < 7$  («мертва» вода), для розчинів із лужною реакцією  $pH > 7$  («жива» вода).

Для вимірювання показника рН розчинів в лабораторній практиці і виробничих умовах широко застосовують комбіновані скляні електроди, які об'єднують у одному корпусі скляний індикаторний електрод і електрод порівняння. Схема такого електроду представлена на рис. 9.2. На цій схемі показані: 2 – скляний корпус, порожнина якого заповнена електролітом  $KCl$ ; 3 – електрод порівняння (пластмасова трубка, заповнена розчином  $KCl$ , у якій знаходиться хлоридсрібний напівелемент); 4 та 9 – порожнисті внутрішній і зовнішній керамічні електролітичні ключі; 5 – сферична робоча мембрана; 7 – пластмасовий ковпачок із кабелем 6; 8 – отвір для доливання електроліту із захисною пробкою 1.

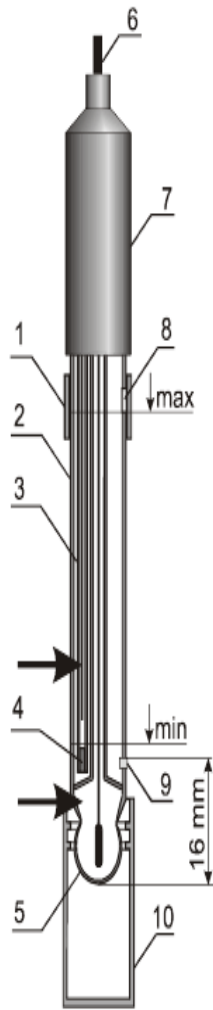


Рис. 3.2. Комбінований скляний електрод

Як відомо, зміна температури води впливає на покази іоноселективних датчиків. Так, наприклад, сигнал датчика рН, відповідно до рівняння Нернста, визначається за формулою:

$$E = E_0 + 2,303 \frac{RT}{F} \lg H^+,$$

де  $E$  – потенціал електрода,  $E_0$  – стандартний потенціал електрода,  $R$  – універсальна газова стала,  $T$  – температура,  $F$  – стала Фарадея,  $H^+$  – концентрація іонів водню.

На рис. 9.3 наведено типову залежність потенціалу комбінованого скляного електрода від показника рН. Всі залежності перетинаються в ізопотенціальній точці, де потенціал електроду не залежить від температури.

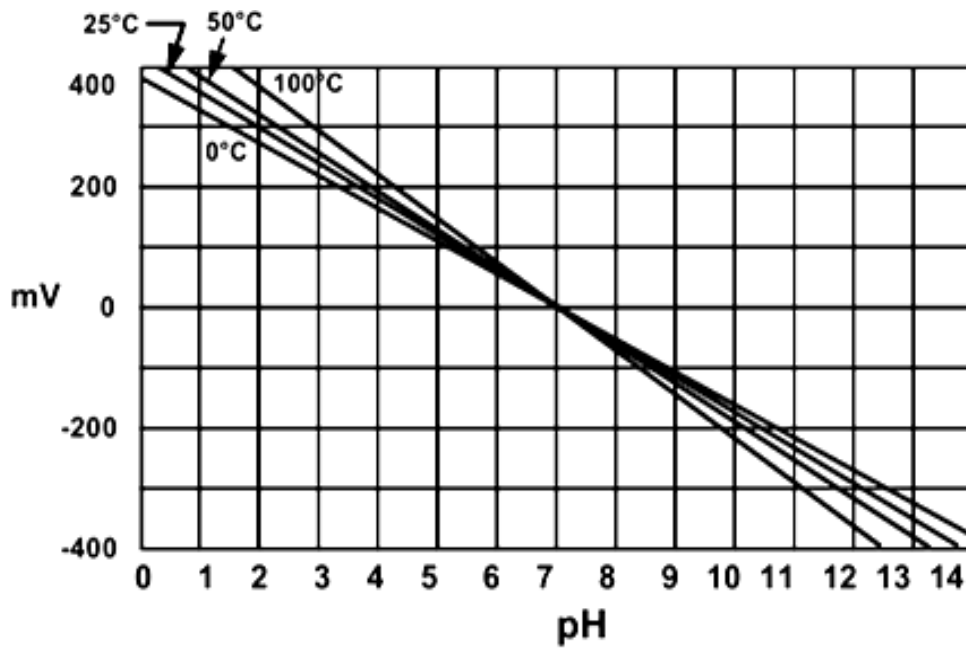


Рис. 3.3. Залежності потенціалу електрода від показника рН при різних температурах

У найпростішому варіанті, вимірювання міжелектродних потенціалів здійснюють високоомним вольтметром. Проте, у більшості випадків, для вимірювання застосовують узгоджувальні електронні кола на базі операційних підсилювачів (ОП). На рис. 9.4 наведено спрощений варіант схеми такого вимірювального кола, який містить: 1 – скляний індикаторний електрод, 2 – електрод порівняння, 3 – досліджуваний розчин. Операційний підсилювач DA1, включений за схемою повторювача напруги, забезпечує високе значення вхідного опору (порядку  $10^{12}$  Ом). ОП DA2 включено як неінвертуючий підсилювач, коефіцієнт підсилення якого  $K=U_{\text{вих}}/U_0=(1+R_2/R_1)$ .

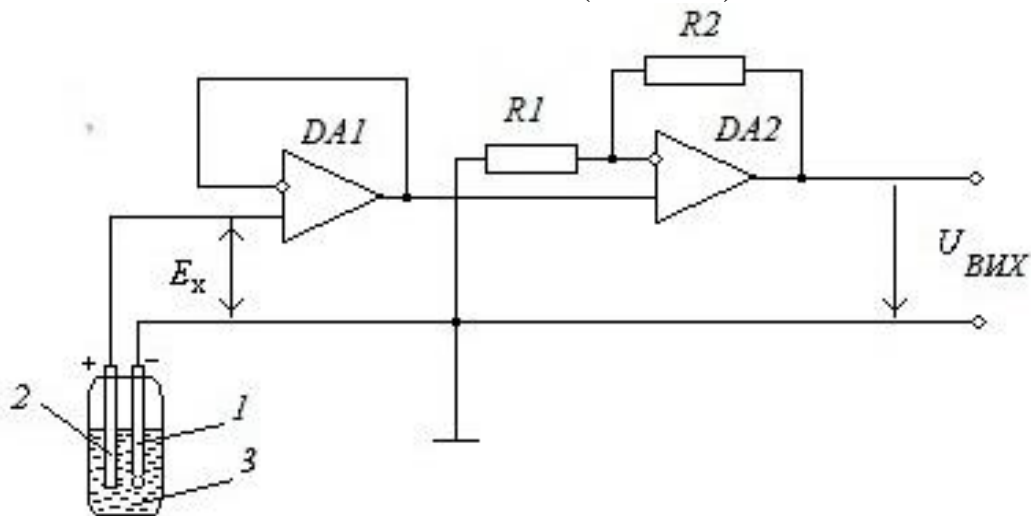


Рис. 3.4. Схема рН-метра



Вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  може бути виміряна аналоговим пристроєм, або перетворена у цифровий сигнал. Структурну схему цифрового рН-метра наведено на рис. 9.5.

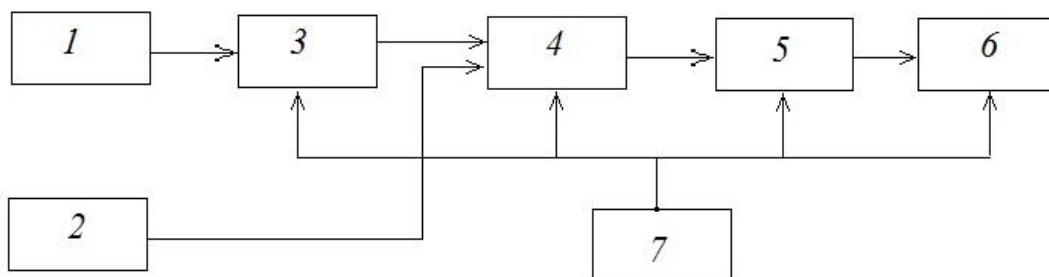


Рис. 3.5. Структурна схема цифрового рН-метра: 1 – комбінований скляний електрод; 2 – датчик температури; 3 – повторювач напруги; 4 – блок підсилувачів; 5 – мікроконтролер; 6 – блок індикації результату вимірювання; 7 – блок живлення.

### 3.2.1.2. Методи засновані на явищі електролізу

В розглянутому вище потенціометричному методі відбувається вимірювання потенціалу гальванічного елемента, який складається з досліджуваного розчину та електродів (індикаторного і порівняння) в режимі холостого ходу, тобто, при відсутності струму. У вольтамперметрії застосовують електролітичні комірки, один із електродів яких в умовах досліду поляризується. Процес вимірювання полягає у побудові вольт-амперних характеристик (ВАХ), тобто, залежності струму  $I$  електролітичної комірки від прикладеної напруги  $U$ . Протікання струму через електроліт супроводжується явищем електролізу. Електроліз полягає у виділенні на електродах складових частин розчинених речовин або інших речовин, які утворюються в результаті вторинних електродних реакцій. До поляризованого електрода у вольтамперметрії ставиться вимога усунення впливу продуктів електролізу. Для цього застосовують мікроелектроди з благородних металів (Pt, Au, Ag), які не приймають участі у електродних реакціях. Для видалення продуктів електролізу застосовують перемішування розчину, вібрацію електродів, висока поляризованість яких досягається внаслідок їх малої площі. Найбільш простим рішенням є застосування ртутного капаючого електроду. Сукупність вольтамперметричних методів, в яких застосовують ртутний капаючий електрод, називається полярографією.

Полярографічна вимірювальна комірка (електролізер) складається з досліджуваного розчину та електродів, один із яких – ртутний капіляр, а роль іншого відіграє шар ртуті. Розчин електролітичної комірки містить

досліджувані іони та іони фонових електролітів, які підбирають таким чином, щоб їх іони при відповідних напругах не приймали участь у електродних реакціях. Присутність фонових електролітів збільшує електропровідність розчину і їх іони екранують іони досліджуваної речовини від впливу електростатичного поля. Прикладена до комірки напруга спадає практично лише на високоомному поляризованому електроді. ВАХ, які отримують у процесі вимірювань, називають полярограмами. Типова полярограма досліджуваної речовини містить три характерні ділянки і має вигляд, наведений на рис. 9.6. В області 1 електродна реакція не проходить, однак протікає невеликий залишковий струм, обумовлений наявністю електроактивних домішок. В області 2 починає відбуватися реакція електролізу, причому, внаслідок наявності іонів фонового електроліту, підвід іонів досліджуваної речовини до електрода відбувається в результаті дифузії. В області 3 досягається максимальний дифузійний струм  $I_d$ .

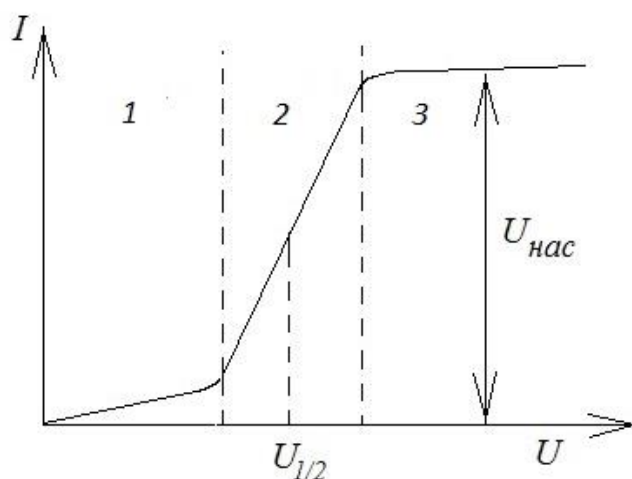


Рис. 3.6. Вигляд типової полярограми

Напругу середини другої ділянки  $U_{1/2}$  називають потенціалом напівхвилі. Потенціал напівхвилі пов'язаний з природою, а напруга насичення  $U_{нас}$  з концентрацією речовини.

Якісний аналіз здійснюють порівнянням потенціалів напівхвиль (їх може бути декілька) із полярографічним спектром (вказаним у відповідних довідниках), а для кількісного аналізу найчастіше застосовують еталонні розчини, метод каліброваних прямих і рівняння

$$I_d = kC,$$

де  $C$  – вимірювана концентрація,  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

У спрощеному варіанті полярографічна вимірювальна установка складається із стабілізованого джерела напруги, вольтметра, мікроамперметра і електролізера. На практиці застосовують багато

різновидів цього методу, наприклад, полярографія на змінному струмі, диференціальна полярографія та ін.

Електричний струм може проходити через електроди гальванічного елемента при підключенні до нього або електроопору, або зовнішнього джерела живлення. В першому випадку поява струму обумовлена електродними реакціями, в другому – зовнішнє джерело живлення, включене назустріч ЕРС гальванічного елемента, викликає протилежно направлені електродні реакції та впорядкований рух іонів. Додатні іони (катіони) – іони металів і водневі іони – рухаються до катода (від’ємного електрода), на якому відбуваються процеси відновлення, тобто, приєднання електронів, а від’ємні іони (аніони) – іони кислотних залишків і гідроксильні групи, рухаються до анода (додатного електрода), де відбувається окислення. Згідно закону електролізу, який називають об’єднаним законом Фарадея, якщо через електроліт на протязі часу  $t$  протікає постійний струм силою  $I$  ампер, то маса  $M$  речовини, що виділяється на електроді може бути встановлена:

$$M = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{z} \cdot Q,$$

де  $A$  – атомна маса елемента в г/моль,  $z$  – валентність,  $Q=I \cdot t$  – електричний заряд,  $F=96484, 56$  Кл/моль – число Фарадея, тобто молярний заряд електронів і одновалентних іонів (заряд одновалентного іона рівний заряду  $e$  електрона або протона, тому для одного моля  $Q=F=e \cdot N_A$ , де  $N_A$  – число Авогадро).

Таким чином, для визначення концентрації речовини в розчині аналітичним сигналом може бути маса  $M$  або кількість електрики  $Q$ . Аналітичний метод, заснований на вимірюванні маси речовини, що виділяється на електроді у процесі електролізу, і називається електрогравіметрія, а заснований на вимірюванні заряду – кулонометрія.

Якщо кулонометрію проводити при постійному потенціалі електрода, на якому протікає потрібна електродна реакція, то внаслідок поступового зменшення концентрації іонів зменшується і сила струму. Це зменшення відбувається за експоненціальною залежністю:

$$i=I_0 \cdot e^{-\kappa t},$$

де  $i$  – миттєве значення сили струму,  $I_0$  – сила струму в момент часу  $t=0$ ,  $\kappa$  – коефіцієнт, який залежить від площі електродів, температури та інших факторів.

Електричний заряд в цьому випадку визначається інтегруванням залежності  $i=f(t)$ , наприклад, графічним методом. Проте, найчастіше інтегрування здійснюється електрохімічними або електронними

кулонметрами. Приклад схеми електронного інтегратора наведено на рис. 9.7.

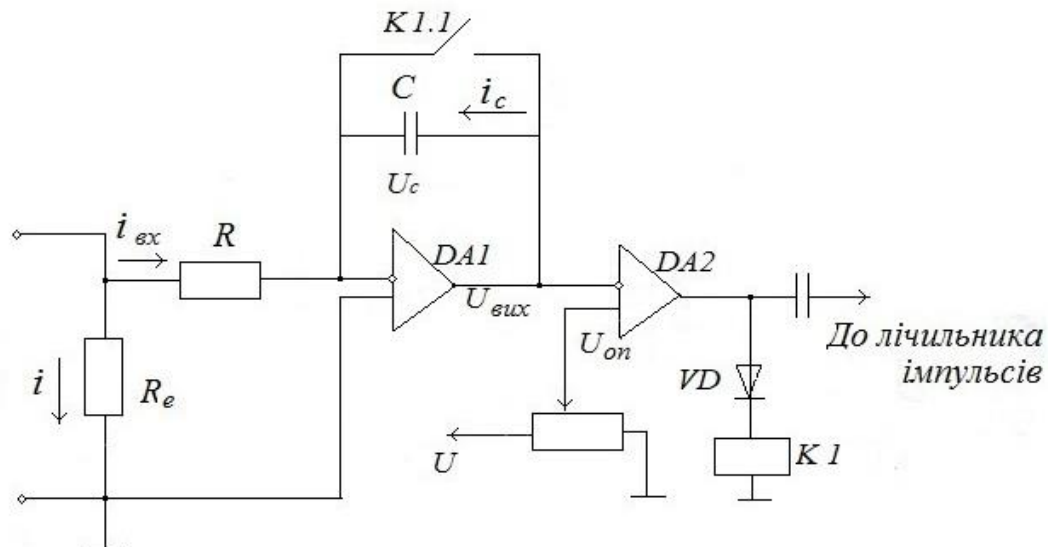


Рис. 3.7. Кулонметр на операційному підсилювачі

Інтегратор функціонує на базі інвертуючого операційного підсилювача DA1, вхідна напруга якого

$$u_{\text{вх}} = i \cdot R_e,$$

де  $i$  – струм електролітичної комірки, в коло якої включений еталонний резистор  $R_e$ .

Внаслідок того, що вхідний опір підсилювача  $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$ , струм в колі зворотного зв'язку  $i_c = -i_{\text{вх}} = -u_{\text{вх}}/R$ . Враховуючи, що струм конденсатора  $i_c = C \cdot du_c/dt$ , отримаємо:  $u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt$ . Згідно властивості операційних схем, напруга між входами підсилювача  $u^* \rightarrow 0$ , тому вихідна напруга  $u_{\text{вих}} = u_c$ . Із вищенаведених співвідношень слідує:

$$u_{\text{вих}} = -\frac{1}{RC} \int u_{\text{вх}} dt = -\frac{R_e}{RC} \int i dt,$$

де шуканий електричний заряд  $Q = \int i dt$ .

При великих кількостях електрики ємності конденсатора  $C$  буває недостатньо. В схемі зображеній на рис. 9.6 забезпечено можливість розрядження конденсатора за допомогою компаратора DA2. Якщо  $u_{\text{вих}}$  досягає значення опорної напруги  $U_{\text{оп}}$ , компаратор спрацює, тобто на його виході встановиться додатна напруга. В результаті, через котушку реле K1 протікає струм, спрацьовують контакти K1.1, конденсатор  $C$  розряджається і починається новий цикл інтегрування. Кількість імпульсів з виходу компаратора реєструється електронним лічильником. Потрібно зауважити, що K1.1 підключають безпосередньо до виходу D2

якщо це передбачує навантажувальна властивість мікросхеми, якщо ж ні, то компаратор є джерелом вхідного сигналу схеми управління виконавчим елементом К1.1.

### 3.2.1.3. Кондуктометрія

Кондуктометричні методи аналізу засновані на вимірюванні питомої електропровідності досліджуваних розчинів. Електропровідність  $G=1/R$ , тобто, це величина, обернена до електроопору і вимірюється у Сіменсах ( $1 \text{ См}=1 \text{ Ом}^{-1}$ ). Електропровідність зростає із збільшенням концентрації електроліту, проте, в концентрованих розчинах, внаслідок міжіонної взаємодії, яка проявляється у гальмуванні руху іонів, при утворенні електронейтральних іонних пар та інших подібних процесах, спостерігається зменшення провідності.

Методи контактної кондуктометрії широко застосовують для контролю технологічних процесів очищення води, аналізу природних і стічних вод, контролю якості дистильованої води, питної води в сучасних системах водопостачання, контролю регенерації іонітів, в харчовій промисловості, для аналізу розчинів електролітів в різноманітних виробничих процесах, для визначення вмісту солей у воді, вмісту вологи в розчинниках, деревині та інших матеріалах. Про широту спектру прикладних напрямків кондуктометрії свідчить її застосування і в медицині, наприклад, для визначення біоімпедансу, а також доцільність застосування цього методу (у порівнянні з потенціометричним) і в нітратометрії тощо.

Цей метод не є селективним, тому, наприклад, вимірювання загальної мінералізації води здійснюють з врахуванням припущення, що досліджуваним середовищем є водний розчин NaCl. Відповідні прилади, калібровані водними розчинами NaCl, називають солемірами, або TDS-метрами. Ці пристрої вимірюють загальну кількість розчинених речовин (англійською мовою *Total Dissolved Solids*). Як відомо, найбільший внесок у провідність природної води дають неорганічні солі – бікарбонати, хлориди і сульфати кальцію, магнію, натрію і калію, а також невелика кількість органічних речовин.

Кондуктометрична вимірювальна комірка у спрощеному варіанті являє собою два електроди, занурені у розчин електроліту. Для вимірювання активного опору між електродами застосовують змінний струм частотою, як правило, в діапазоні 1-10 кГц, оскільки постійний струм супроводжується хімічними перетвореннями (електролізом) і викликає поляризацію електродів. Електроопір залежить від площі поверхні електродів, відстані між ними (ці параметри визначають

константу комірки), температури і загальної концентрації іонів. Основними вимогами до комірок є оптимальні геометричні розміри, мінімальні поляризаційні явища та мінімальні паразитні ємнісні зв'язки.

На рис. 9.8 наведено варіант електричної схеми заміщення комірки, яка являє собою розрахункову модель контактного двохелектродного давача.

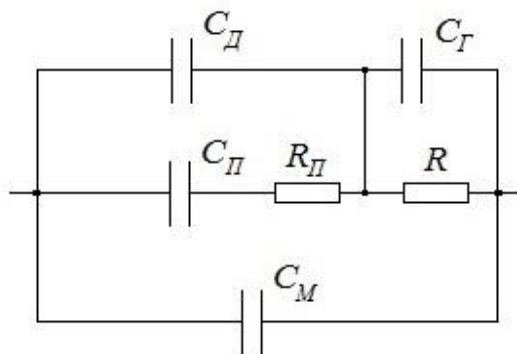


Рис. 3.8. Схема заміщення кондуктометричної комірки

На цій схемі  $R$  – активний опір досліджуваного електроліту,  $C_G$  – власна, тобто, геометрична ємність комірки,  $C_D$  – ємність подвійного шару на границі електрод-розчин,  $C_P$ ,  $R_P$  – ємність і опір поляризації,  $C_M$  – ємність монтажу (провідників). Аналіз електричних схем заміщення контактних кондуктометричних комірок надає змогу зробити висновок, що у більшості випадків з достатньою для практики точністю еквівалентна схема первинного вимірювального перетворювача може бути представлена схемою послідовного чи паралельного типу, яка складається з резистора  $R$ , який моделює активний опір розчину та конденсатора  $C$ , який характеризує його діелектричні властивості. Еквівалентний комплексний опір комірки послідовного типу визначається

$$\underline{Z}_e = R_e + 1/j\omega C_e = Ze^{j\varphi},$$

де  $\varphi = \arctg R_e/C_e$  – кут зсуву по фазі між напругою і струмом.

Для випадку паралельного включення опору  $R$  і конденсатора  $C$  еквівалентний комплексний опір:

$$\underline{Z}_e = \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R} - j \frac{\omega CR}{1 + \omega^2 C^2 R};$$

а модуль цього опору

$$Z_e = \frac{R^2 \sqrt{1 + \omega^2 C^2}}{1 + \omega^2 C^2 R}.$$

Переважає більшість сучасних кондуктометрів, які реалізують амплітудний метод вимірювання, являють собою різновиди схем безпосередньої оцінки, або мостові схеми, серед яких виокремлюють

диференціальну схему і компенсаційні структури із врівноваженням в робочому чи порівняльному каналах.

Розглянемо, для прикладу, розрахунок статичної характеристики, тобто залежності вихідної напруги від вхідного сигналу для мостової схеми включення кондуктометричної комірки, наведеної на рис. 9.9.

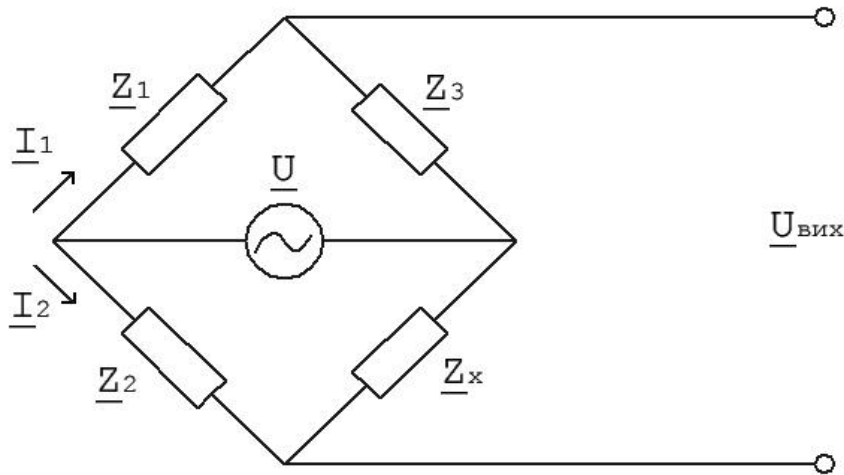


Рис. 3.9. Мостова схема на змінному струмі

На схемі  $\underline{Z}_x$  показаний еквівалентний комплексний опір кондуктометричної комірки. Якщо активний опір  $R_x$  співрозмірний з ємнісним опором  $1/\omega C_x$ , то користуючись послідовною схемою заміщення, для якої

$$\underline{Z}_x = R_x - j \frac{1}{\omega C_x};$$

де  $R_x$  – еквівалентний активний опір досліджуваного об'єкту, тобто, комірки з розчином,  $C_x$  – еквівалентна ємність кондуктометричної комірки.

Значення вихідної комплексної напруги в режимі холостого ходу знайдемо з співвідношення:

$$\underline{U}_{вих} = \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2.$$

Нехай  $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = R$ , тоді:

$$\underline{U}_{вих} = (\underline{I}_1 - \underline{I}_2)R;$$

де згідно закону Ома в комплексній формі:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{2R}; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}}{R + R_x - j \frac{1}{\omega C_x}}.$$

Після відповідних обчислень отримаємо вираз типу  $\underline{U}_{вих} = U' + jU''$  для комплексної вихідної напруги модуль якої, тобто діюче значення:

$$U_{\text{вих}} = \frac{1}{2} U \frac{\sqrt{1 + 2\omega^2 C_x^2 (R_x^2 + R)^2 + \omega^4 C_x^4 (R_x^2 - R^2)^2}}{1 + \omega^2 C_x^2 (R_x + R)^2};$$

Для підвищення точності вимірювань  $Z_x$  застосовують метод врівноваження (балансування) мостової схеми. Умовою балансу моста є рівність нулевій вихідної напруги, що досягається при  $Z_1 \cdot Z_x = Z_2 \cdot Z_3$ , де символами  $Z = Ze^{j\varphi}$  позначено комплексні опори відповідних плечей моста. При умові, що  $Z_1 Z_x = Z_2 Z_3$ ,  $\varphi_1 + \varphi_x = \varphi_2 + \varphi_3$  отримаємо:  $Z_x = Z_2 Z_3 / Z_1$ . За нуль-індикатор (НІ) у вимірній діагоналі моста можна використовувати осцилограф, гальванометр змінного струму та ін. Для підвищення продуктивності і точності вимірів застосовують мости із вбудованою мікропроцесорною системою. Мікропроцесор за командою з панелі управління включає генератор і зчитує програму з постійного запам'ятовуючого пристрою (ПЗП), яка визначає послідовність операцій. Змінна напруга розбалансу моста перетворюється у постійну і за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) в цифровий код. За значенням цього коду мікропроцесор врівноважує міст. Одним з варіантів врівноваження моста є застосування керованої лінійки резисторів з двійково-зваженими значеннями опорів ( $R, 2R, 4R, 8R$  і так далі, аналогічно, як вони застосовуються в цифро-аналогових перетворювачах). Враховуючи активно-ємнісний характер повного опору (імпедансу) комірки  $Z_x$ , як мінімум в одно з плечей мостової схеми вводять паралельне з'єднання резистора і конденсатора.

Для уникнення труднощів балансування мостової схеми вихідний сигнал не компенсують, а вимірюють, наприклад, за допомогою операційного підсилювача (рис. 9.10).

Коефіцієнт підсилення напруги неінвертуючого операційного підсилювача  $K_u = R/R_x + 1$ . При умові, що  $R \gg R_x$ ,  $U_{\text{вих}} \approx U_{\text{вх}} \cdot R/R_x$ , тобто величина вихідної напруги  $U_{\text{вих}}$  залежить від електропровідності розчину.

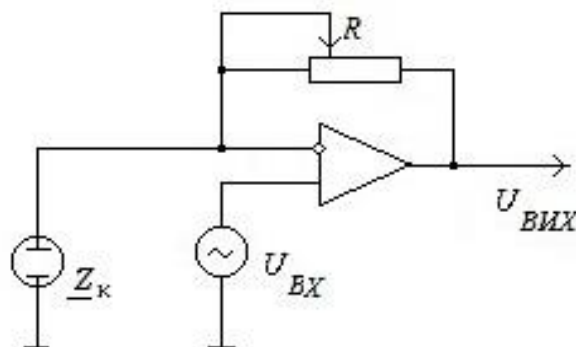


Рис. 3.10. Схема вимірювання електропровідності



Різновидом аналітичних методів, які базуються на вимірюванні провідності, є безконтактна кондуктометрія. Вимірювальна комірка, у випадку безконтактної кондуктометрії, являє собою конденсатор або котушку індуктивності. Вимірювання виконують на високих частотах (порядку МГц) за допомогою Z-метрів, Q-метрів, або F-метрів. Z-метри це прилади, які вимірюють повний опір (імпеданс) зразка, Q-метри визначають добротність  $\sqrt{L/C}/R$  коливальних контурів, а в F-метрах зміна діелектричної проникності чи індуктивності досліджуваних об'єктів перетворюється у зсув робочої частоти  $f_p$ .

Сучасні кондуктометри є автоматизованими мікропроцесорними приладами які, разом з вимірюванням електропровідності, реалізують також низку інших функцій, наприклад, вимірюють температуру, значення питомої електропровідності досліджуваного розчину до певної температури.

### **3.2.2. Застосування адсорбційних чутливих елементів (АЧЕ) в аналітичних приладах**

Адсорбція – це вибіркове поглинання речовини з газового чи рідкого середовища поверхнею твердого тіла чи рідини. Речовина, що поглинає, називається адсорбентом, поглинена речовина – адсорбатом. Явище адсорбції пов'язано із силами міжмолекулярної взаємодії на межі розділу фаз. У залежності від характеру взаємодії молекул адсорбата і адсорбента розрізняють фізичну адсорбцію і хемосорбцію. При хемосорбції між атомами (молекулами) утворюється хімічний зв'язок, тому хемосорбцію можна розглядати як хімічну реакцію в приповерхневому шарі адсорбента.

Адсорбція газів впливає на електропровідність напівпровідникових матеріалів на основі оксидів металів  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{InO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  та ін. Отже, аналітичним сигналом в АЧЕ служить зміна електроопору (провідності).

У залежності від технології виготовлення напівпровідникові АЧЕ діляться на 2 групи: керамічні і плівкові. В керамічних порошок оксиду металу змішують із зв'язуючим матеріалом (целюлоза, алкід) до створення пасти, а потім наносять між двома дротяними електродами і випалюють на повітрі при температурі 800-1000°C. При цьому створюється порожниста структура, необхідна для збільшення поверхні, яка контактує з досліджуваним газовим середовищем. При виготовленні плівкових АЧЕ застосовують технології, які характерні для мікроелектроніки: вакуумного напилення, фотолітографії, осадження плівок оксидів металів, що зменшує габарити та споживану потужність

цих датчиків, основними матеріалами для виготовлення яких є двооксид олова і оксид цинку. Електропровідність цих матеріалів суттєво залежить від легування каталітичними добавками, зміни температури. Зміна хімічного складу і підбір робочих температур призводять до досягнення необхідної чутливості та селективності датчиків на основі АЧЕ. Селективність підвищують також нанесенням на поверхню адсорбента плівок різних матеріалів, які пропускають в робочий шар тільки молекули певного компонента суміші і відіграють роль молекулярних сит.

Конструктивно типовий напівпровідниковий АЧЕ складається з корпусу, підігрівача, чутливого шару, контактних електродів. Промисловість випускає широку номенклатуру АЧЕ, що спрощує розробку недорогих і достатньо ефективних газоаналізаторів для виробничих і побутових приміщень. Як приклад розглянемо газоаналізатор  $\text{CO}_2$  на основі датчика MQ-135, відомості про який наведено в мережі *Internet*. Актуальність розробки такого приладу обумовлена сучасними тенденціями енергозберігаючого будівництва, необхідністю перевірки ефективності систем вентиляції і недопущення перевищення норм вмісту  $\text{CO}_2$  в контрольованому повітрі.

На рис. 9.11 наведено структуру і маркування виводів АЧЕ, який складається з таких елементів: 1 – чутливий до газів шар ( $\text{SnO}_2$ ); 2 – електрод ( $\text{Au}$ ); 3 – струмопровідні лінії для з'єднання з електродом ( $\text{Pt}$ ); 4 – нагрівач ( $\text{Ni-Cr}$ ); 5 – керамічна трубка ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); 6 – сітка зі сталевих провідників для захисту в разі вибуху всередині датчика; 7 – стискаюче кільце (мідь); 8 – основа; 9 – ніжки для підключення датчика (мідь).

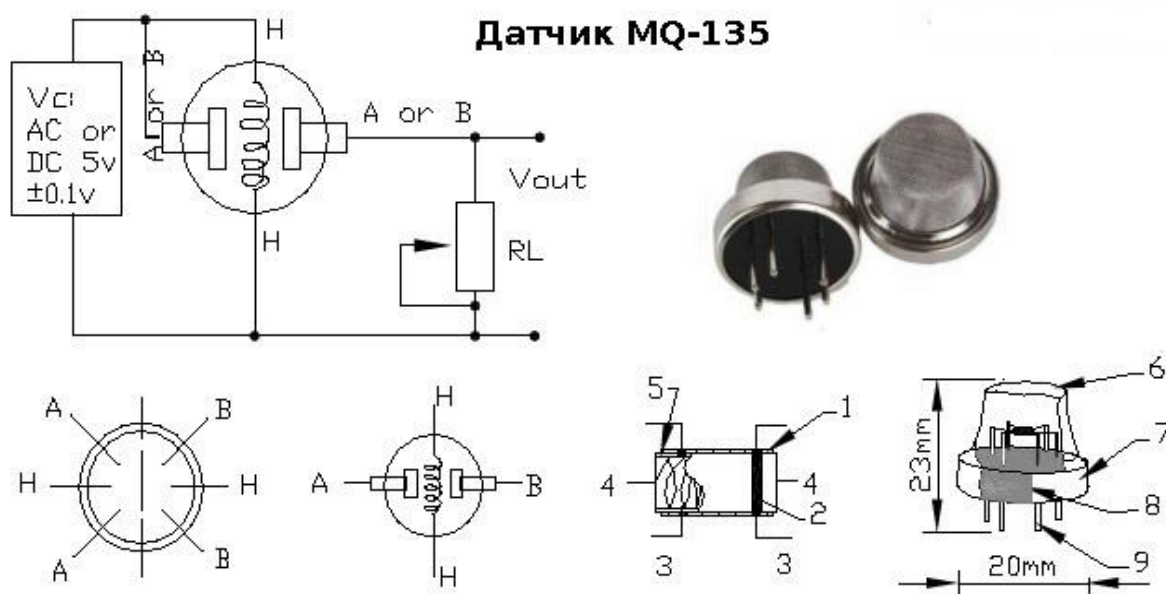


Рис. 3.11. Структура, схема включення і зовнішній вигляд датчика газів MQ-135

На спрощеній структурній схемі газоаналізатора рис. 9.12 наведено: 1 – АЧЕ (перетворювач «концентрація (C)-опір  $R$ »); 2 – перетворювач «опір-напруга»; 3 – мікроконтролер; 4 – LED індикатор; 5 – стабілізований блок живлення.

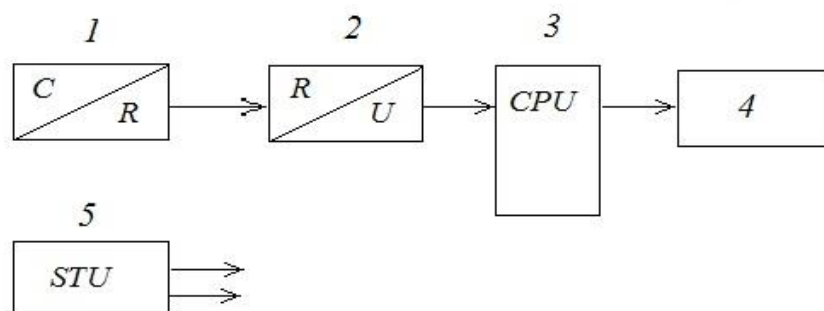


Рис. 3.12. Схема електрична структурна адсорбційного газоаналізатора

Напругу на виході резистивного розподільника 2, який складається з АЧЕ та потенціометра, вимірює АЦП мікроконтролера. Потрібне значення опору потенціометра встановлюють у процесі калібрування газоаналізатора, для чого застосовують зразкові газові суміші, або зразковий вимірювальний прилад. На процесі адсорбції, отже, і на величину вимірюваного опору, впливає також температура і вологість газового середовища в якому вимірюється концентрація контрольованого компонента. У загальному випадку цю залежність можна компенсувати програмним методом при застосуванні додаткових датчиків температури і вологості, або, в спрощеному варіанті, застосувати набір поправочних коефіцієнтів, на які потрібно помножити покази приладу.

### 3.2.3. Спектральні методи аналізу

Спектральні (оптичні) методи аналізу базуються, насамперед, на явищах, які відбуваються при взаємодії світлових хвиль з речовиною. Оптичним випромінюванням, або світлом, називають електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$  в таких діапазонах:  $\lambda=1000-0,77$  мкм – інфрачервоні (ІЧ) хвилі,  $\lambda=0,77-0,38$  мкм – видиме світло,  $\lambda=0,38-0,01$  мкм – ультрафіолет. Основними явищами, які застосовуються в спектральних приладах і методах аналізу є дисперсія, розсіяння, поляризація, поглинання та випромінювання світла.

Швидкість розповсюдження світлових хвиль у вакуумі:

$$c=\lambda \cdot \nu,$$

де  $\nu$  – частота хвилі є універсальною константою ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с).

Швидкість світла в середовищі:

$$v = c/n,$$

де  $n$  – показник заломлення, значення якого залежить від частоти.

Функція  $n(\nu)$  обумовлює явище дисперсії світла, яке полягає у залежності фазової швидкості світла в середовищі  $v$  від частоти. При нормальній дисперсії  $dn/d\nu > 0$ , тобто, при збільшенні частоти  $n$  збільшується. Внаслідок дисперсії, проходження білого світла через прозору призму супроводжується його розкладом в спектр.

В оптично неоднорідному середовищі виникає розсіяння світла, яке полягає у зміні напрямку його розповсюдження і проявляється як невласне свічення речовини. При флуктуації густини середовища, або наявності частинок, малих порівняно з довжиною хвилі (дим, туман та ін.), виконується закон Релея, згідно якого інтенсивність розсіяного світла пропорційна  $\lambda^{-4}$ . При проходженні білого світла через таке середовище, в розсіяному світлі, максимум якого спостерігається під кутом  $90^\circ$  по відношенню до джерела випромінювання, переважають короткохвильові блакитно-сині кольори, а в пройденому – довгохвильові жовто-червоні. В земній атмосфері це проявляється блакитним кольором неба і жовто-червоним кольором Сонця над рівнем горизонту (схід, захід). Якщо розміри розсіювальних частинок набагато перевищують довжину хвилі, спектральний склад падаючого і розсіяного світла практично співпадає (приклад білі хмари).

При розповсюдженні світла в речовині, відбувається його часткове поглинання. Згідно закону Бугера-Ламберта інтенсивність  $J$  хвилі монохроматичного світла зменшується:

$$J = J_0 \cdot e^{-\alpha d},$$

де  $J_0$  та  $J$  значення інтенсивності світла на вході і виході з шару середовища товщиною  $d$ ,  $\alpha$  – лінійний коефіцієнт поглинання, який залежить від хімічної природи та стану поглинаючого середовища, а також і від довжини хвилі  $\lambda$ .

Для розбавлених розчинів поглинаючої речовини:

$$\alpha = b \cdot C,$$

де  $C$  – концентрація розчину,  $b$  – коефіцієнт пропорційності.

Згідно представлень квантової фізики, повна енергія атома чи молекули, яка складається з енергії електронів  $E_{ел}$  на відповідних енергетичних рівнях, коливної енергії  $E_{кол}$ , та обертальної енергії атома (молекули)  $E_{об}$  як цілого, характеризується набором дискретних

енергетичних рівнів. Тому поглинання чи випромінювання світла атомами і молекулами селективне і характеризується набором дискретних частот:

$$\nu = \Delta E / h,$$

де  $h$  – стала Планка.

Селективність поглинання світла найбільш чітко проявляється в розріджених одноатомних газах (наприклад пари металів), для яких спостерігається лінійчатий спектр поглинання. Дискретні частоти інтенсивного поглинання світла співпадають з частотами власного випромінювання збуджених атомів цих газів. У загальному випадку спектри поглинання і випромінювання бувають лінійчатыми (для атомів), смуговими (характерні для молекул) і суцільними (мають складну природу).

До спектральних методів хімічного аналізу відносять, насамперед, атомно-абсорбційний та молекулярно-абсорбційний спектральний аналізи, засновані на визначенні спектра поглинання, або вимірюванні світлопоглинання монохроматичного випромінювання, яке абовідповідає максимуму кривої поглинання. Емісійний спектральний аналіз вимагає нагріву досліджуваної речовини до  $800^{\circ}\text{C}$  і вище. Джерелом збудження спектрів випромінювання може бути полум'я, дуговий електричний розряд. Оскільки  $\Delta E_{\text{об}} \ll \Delta E_{\text{кол}} \ll \Delta E_{\text{ел}}$ , коливні та коливально-оберткові спектри спостерігаються в ІЧ області, електронним переходам між енергетичними рівнями, характерними для конкретної речовини, відповідає видима та ультрафіолетова область спектра (рис. 9.13).

За способом реєстрації випромінювання спектральні прилади поділяються на спектроскопи (візуальне спостереження), спектрографи (реєстрація самописцем) і спектрометри (фотоелектрична реєстрація). За принципом диспергування, тобто, розкладом світла у спектр, розрізняють призмові прилади, з дифракційними ґратками та з інтерференційними фільтрами. Спектральні прилади виконуються як в звичайному варіанті, так і вакуумні, зі скляною чи кварцовою (для ультрафіолетової області) оптикою. Для ІЧ області призми виготовляють з галогенідних солей лужних металів, наприклад, NaCl (з довжиною хвилі до 15 мкм), KCl (сильвін до 21 мкм), CsJ (до 50 мкм). Окрім дисперсійних аналізаторів широко застосовуються і бездисперсійні.

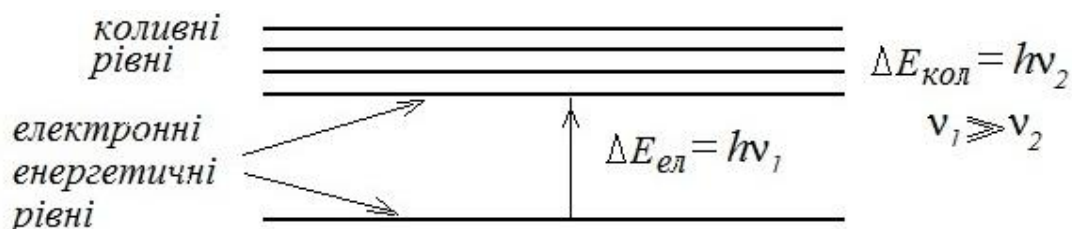


Рис. 3.13. Схема розташування електронно-коливних енергетичних рівнів атома

Нефелометричний метод аналізу базується на вимірюванні інтенсивності розсіяного світла частинками нерозчинної речовини, що зависли у середовищі. Інтенсивність розсіяного світла залежить від багатьох факторів, в тому числі, від розміру та концентрації аналізованих частинок.

Особливим аналітичним методом є реєстрація спектрів комбінаційного розсіяння. На відміну від звичайного релеївського розсіяння, де не відбувається зміни довжини світлової хвилі  $\lambda_0$ , в процесі комбінаційного розсіяння реєструють довжини хвиль  $\lambda = \lambda_0 \pm \Delta\lambda$ , поява яких обумовлена енергією коливного руху молекул. В багатьох випадках ІЧ випромінювання характеризують хвильовим числом  $\tilde{\nu} = 1/\lambda$ , де довжина хвилі вимрюється в сантиметрах. Комбінаційне розсіяння (КР) характеризують різницею хвильових чисел збуджуючої лінії та лінії КР  $\Delta\tilde{\nu}$ . Ця величина характеризує частоти власних коливань молекул, структурних груп досліджуваних речовин. Тому величину  $\Delta\tilde{\nu}$ , яку називають частотою і вимірюють в  $\text{см}^{-1}$ , застосовують не тільки для хімічного аналізу, але і для вивчення будови речовини. Інтервал досліджуваних частот ІЧ спектрометрів знаходиться у межах  $100\text{-}3700 \text{ см}^{-1}$ .

Бездисперсійні аналізатори конструктивно простіші і значно дешевші ніж дисперсійні, тому вони знайшли застосування для розв'язання багатьох аналітичних задач. На рис. 9.14 наведено варіант структурної схеми такого приладу. На схемі показані 1 – випромінювач, 2 – оптична система, 3, 4 – вимірювальна і порівняльна кювети, 5, 6 – приймачі випромінювання, 7 – система обробки інформації.

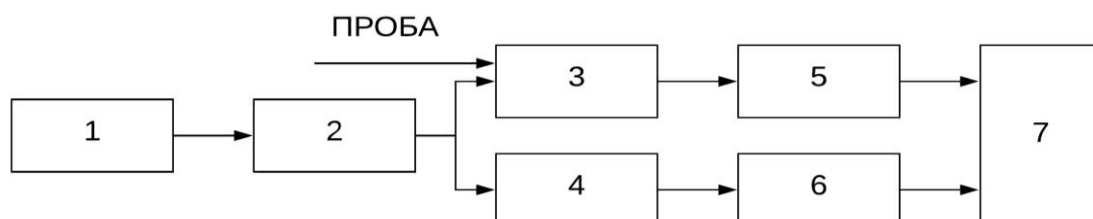


Рис. 3.14. Структурна схема бездисперсійного абсорбційного аналітичного приладу

Немонохроматичний потік випромінювання направляєтся оптичною системою на вимірювальну і порівняльну кювети. Аналізована речовина має характерні смуги поглинання, тому селективні приймачі реєструють сигнали різної інтенсивності. Аналітичний сигнал у вигляді зміни різниці інтенсивностей світлових променів визначає концентрацію досліджуваної речовини.

### **3.2.4. Методи, засновані на розділенні компонентів**

Найскладнішим питанням хімічного аналізу є визначення складу і концентрації суміші невідомих речовин. В багатьох випадках задачу розв'язують в результаті розділення компонентів. Для розділення застосовують кінетичні і рівноважні методи. До перших відноситься діаліз, електрофорез та ін. Діаліз заснований на відмінностях швидкості дифузії іонів, молекул і колоїдних частинок через порожнисті мембрани. Електрофорез використовує відмінності швидкості і напрямку руху заряджених частинок в електростатичному полі. Напрямок руху залежить від знаку заряду, швидкість – від величини заряду і розмірів частинок. В рівноважних методах використовують рівновагу, яка виникає між речовинами двох фаз. Для перетворення однофазної системи в двофазну застосовують відгонку, екстракцію, сорбенти, іоніти та осадження з розчину. Відгонку здійснюють підвищенням температури речовини і переводом досліджуваних компонентів у газоподібну фазу з їх подальшою конденсацією. Екстракція відбувається завдяки речовинам, які додають у суміш і які розчиняють в собі певну речовину. Тверді сорбенти та іоніти поглинають досліджувану речовину. Осадження відбувається в результаті хімічної взаємодії під час хімічних реакцій з певними компонентами, які додаються в розчин.

Для розділення речовин застосовують також методи, в яких рівноважні принципи поєднуються з кінетичними. Найбільш універсальним і широко розповсюдженим серед них є хроматографія.

#### **3.2.4.1. Хроматографічні методи аналізу**

Хроматографія являє собою динамічний процес розділення багатокомпонентних сумішей, який відбувається в двофазній системі. Одна з двох фаз, завдяки яким відбувається розділення, є нерухома, інша рухається відносно неї. У систему цих двох фаз вносять аналізовану суміш. Розділення відбувається внаслідок різниці у міжфазній взаємодії, коли компоненти суміші переміщуються разом з рухомою фазою з різними швидкостями.

Класифікацію хроматографічних методів здійснюють за принципом розподілу речовин за фазами, способом виконання (площинні та колонкові методи) та за агрегатним станом фаз. Наприклад, в адсорбційній хроматографії як нерухому фазу використовують активоване вугілля, силікагель, оксид алюмінію. Рухома фаза може бути як рідкою, так і газоподібною. Для виконання хроматографічного розділення застосовують різні пристрої: колонки з твердою або рідкою нерухомою фазою, стрічки паперу чи тонкого шару адсорбенту. Схематично ці пристрої наведено на рис. 9.15.

В двофазну систему вводять суміш речовин  $X_1$ ,  $X_2$ , які мають різні коефіцієнти розподілу за фазами і тому переміщуються разом з рухомою фазою по різному. В проявній паперовій і тонкоплівковій хроматографії отриману хроматограму обробляють розчином реагентів, яка дає змогу визначити відстані ОА та ОВ. В колонковій хроматографії хроматографування продовжують до тих пір, поки рухома фаза вимиває з колонки елюат – рухому фазу з речовинами, що розділяються. Наявність в елюаті сторонніх речовин визначають за допомогою детекторів.

На рис 9.16. наведено варіант схеми газового хроматографа, основними складовими якого є пристрій введення проби, хроматографічний стовпчик, детектор та пристрій реєстрації. Хроматографічні стовпчики представляють собою металеві, скляні чи кварцові трубки з внутрішнім діаметром, як правило, не більше 2 мм і довжиною від декількох сантиметрів до декількох метрів (вони закручуються у спіраль), які заповнені нерухомою фазою-адсорбентом.

Універсальні хроматографи містять декілька хроматографічних колонок з необхідними насадками, дозаторами та детекторами. В газових хроматографах застосовують детектори для встановлення теплопровідності, зокрема, термісторні, а також електрохімічні, полум'яно-іонізаційні та ін.



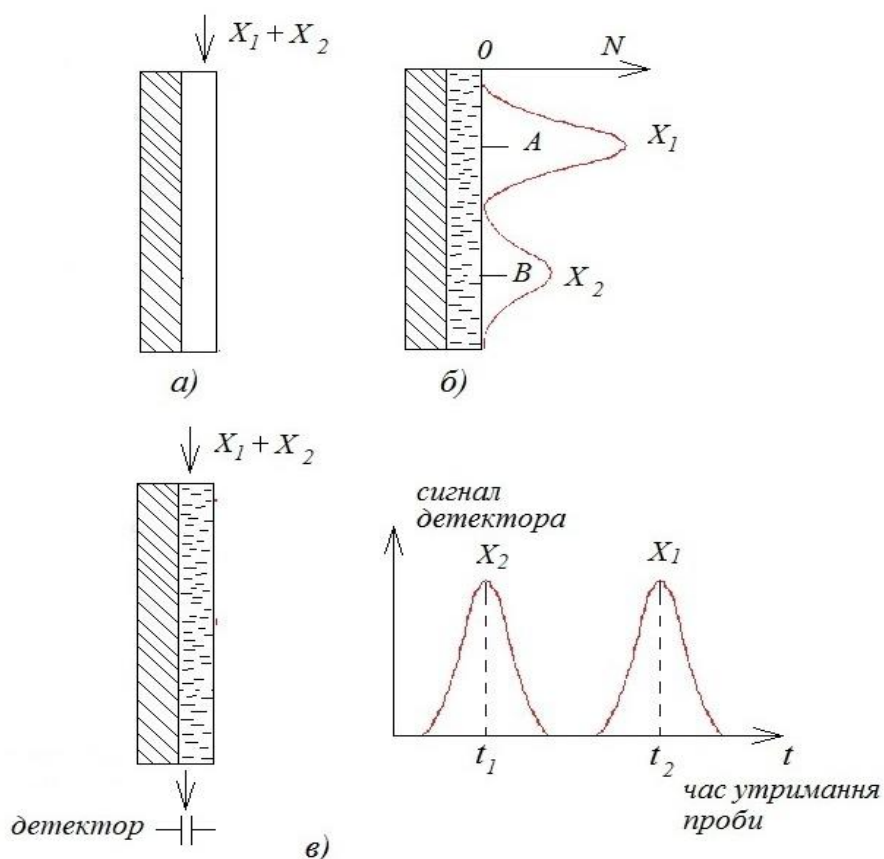


Рис. 3.15. Схема хроматогування: а) введення суміші речовин  $X_1$ ,  $X_2$ ; б) проявна хроматографія; в) колонкова хроматографія



Рис. 3.16. Блок-схема газового хроматографа

Принцип дії полум'яно-іонізаційних детекторів полягає в тому, що рухома фаза змішується з воднем і надходить у форсунку водневого пальника, полум'я якого розташоване між двома електродами. При згорянні речовин рухомої фази утворюються іони, які заповнюють міжелектродний простір, в результаті електроопір середовища зменшується і збільшується сила струму електричного кола.

Сучасні хроматографи характеризуються блочною конструкцією, широким набором детекторів. Процеси аналізу, ідентифікація складових, кількісна обробка результатів реалізується за допомогою мікропроцесорної техніки і систем автоматичної обробки результатів вимірювань. Розробкою і серійним випуском хроматографів зараз займається багато фірм в різних країнах світу.

### 3.2.4.2. Мас-спектрометрія

Мас-спектрометричні методи аналізу засновані на дії електричного і магнітного полів на заряджені частинки, які утворюються внаслідок іонізації молекул досліджуваної речовини.

Якщо  $q$  – заряд іона,  $E$  – напруженість електричного поля, то сила, що діє на іон визначається як  $F=qE$ . В магнітному полі з індукцією  $B$  на іон, який рухається зі швидкістю  $V$  під кутом  $\alpha$  по відношенню до напрямку силових ліній магнітного поля, діє сила Лоренца  $F_L=qVB\sin\alpha$ . Якщо  $V$  перпендикулярна до  $B$ , тобто кут  $\alpha=90^\circ$ ,  $F_L=qVB$ , а магнітна сила надає зарядженій частинці масою  $m$  прискорення  $F_L/m$ . Для таких умов заряджена частинка рівномірно рухається по колу з доцентровим прискоренням  $V^2/R=qVB/m$ . Отже, радіус кола  $R$ , по якому рухається іон:

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

У випадку, якщо кут  $\alpha < 90^\circ$ , модуль вектору швидкості має перпендикулярну складову  $V\sin\alpha$ , та паралельну складову  $V\cos\alpha$ . В результаті іон рухається вздовж напрямку  $B$  по спіралі.

Заряджені частинки прискорюються в електричному полі з різницею потенціалів  $U$  і набувають швидкість  $V$ , яку визначають із співвідношення  $qU=mV^2/2$ . Параметр  $q/m$  називають питомим зарядом. Таким чином заряджені частинки у залежності від  $m$ ,  $q$ ,  $B$  і  $U$  рухаються за різними траєкторіями, тобто просторово розподіляються. В перших пристроях такого типу, розроблених на початку 20 ст. Томсоном (1907 р.), Астоном (1920 р.), реєстрація іонів здійснювалася на фотоплівку. Схожість отриманих на плівці штрихів, положення яких визначається питомим зарядом, із зображенням оптичних лінійчатих спектрів послужило причиною назви таких приладів – мас-спектрографи, а прилади з реєстрацією іонних струмів за допомогою електронних пристроїв називаються мас-спектрометрами.

В наш час є багато типів мас-спектрометрів, проте всі вони мають такі обов'язкові складові, як джерело іонів, мас-аналізатор, детектор, система відкачування повітря (див. рис. 9.17).

Досліджувану речовину крізь спеціальну систему напуску мікропорціями вводять в іонізаційну камеру, де утворюється і підтримується глибокий вакуум ( $P \sim 10^{-4}$  Па). Найбільш універсальним способом отримання іонів з електронейтральних атомів є іонізація електронним ударом. Електрони, джерелом яких є розжарена вольфрамова нитка, прискорюються електричним полем між катодом і анодом, і при досягненні певного порогового значення енергії, який

називається потенціалом іонізації, вибивають електрони з атомів та молекул. Також застосовують фотоіонізацію, хімічну іонізацію, яка відбувається в результаті іонно-молекулярних реакцій, матричну лазерну десорбційну іонізацію та ін. методи.

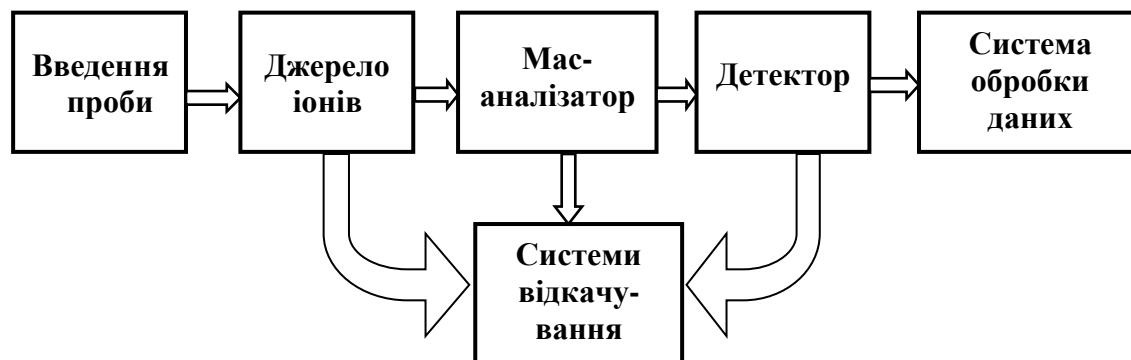


Рис. 3.17. Блок-схема мас-спектрометра

За типом аналізаторів розрізняють статичні і динамічні мас-спектрометри. В статичних для розділення іонів за масами застосовують постійні або квазістатичні (майже постійні) електричні і магнітні поля. Мас-спектри представляють собою залежність іонного струму  $I$  від маси  $m$  або, точніше, співвідношення  $m/q$ . При поступовій зміні електричного або магнітного поля іони з різним співвідношенням  $m/q$  послідовно, один за одним попадають у вхідну щілину детектора. При неперервному записі іонного струму отримують графіки з максимумами сигналу, які слугують для якісного і кількісного аналізу хімічного складу речовини: положення піку визначається масою іона, а величина струму його концентрацією у суміші.

В динамічних мас-спектрометрах для розділення іонів за масами застосовують змінні електричні сигнали, період яких не перевищує час прольоту іонів через аналізатор. Існує багато типів динамічних мас-аналізаторів, серед яких найбільш часто застосовують квадрупольний, часо-пролітний, радіочастотний, магніто-резонансний та інші.

В квадрупольному аналізаторі застосовують спеціальний конденсатор, який складається з двох пар металевих електродів у вигляді стрижнів гіперболічного перерізу. Розділення іонів відбувається в поперечному електричному полі з гіперболічним розподілом потенціалу. Іони переміщуються у просторі між електродами, до яких прикладена постійна напруга  $U$  і високочастотна напруга  $U_m \cos \omega t$ . Умова попадання іонів на детектор для такої амплітуди  $U_m$  і частоти змінної напруги  $\omega$  має вигляд залежності:

$$m = kU_m / \omega^2,$$

де  $k$  – стала приладу.

Амплітуда коливань іонів інших мас зростає по мірі їх руху в аналізаторі так, що вони нейтралізуються на пластинах конденсатора.

Найпростішим електричним детектором іонів може бути електрод-колектор, встановлений на виході з аналізатора. Мірою іонного струму є спад напруги на високоомному резисторі, включеному послідовно з електродом. Для підвищення порогової чутливості, а також зниження постійної часу, замість колектору застосовують вторинно-електронні помножувачі (ВЕП). Одиначні іони, вдаряючись об поверхню першого електрода цього пристрою, викликають випускання вторинних електронів, які прискорюються електричним полем і послідовно потрапляють на декілька діодів, до яких прикладено високу напругу. Це викликає електронну лавину. Коефіцієнт множення ВЕП може сягати  $10^5$ - $10^6$ .

У сучасних мас-спектрометрах процес вимірювання і обробки даних мас-спектра будь-якої складності проводиться за допомогою комп'ютера в автоматизованому режимі, тому практично одночасно можна визначати, наприклад, при елементному аналізі неорганічних речовин до 70 елементів. Мас-спектрометр застосовують і як детектор газової хроматографії. При поєднанні газової хроматографії і мас-спектрометрії проявляється ефект синергізму тобто можливості об'єднаного аналізатора набагато перевищують просту суму можливостей окремих аналітичних систем. Вдосконалення методів хроматографії та мас-спектрометрії у поєднанні із використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій сприяє широкому застосуванню хромато-мас-спектрометрії в різних галузях хімії, медицини, технологічного контролю в промисловості, екологічного моніторингу та багатьох інших галузях.

### 3.3. Запитання для контролю знань

1. Види і методи хімічного аналізу.
2. Електроди потенціометрії.
3. Що означає показник рН водних розчинів ?
4. Чому вимірювання ЕРС комбінованого скляного електрода потребує застосування повторювача напруги?
5. Що таке полярограма?
6. В чому суть явища електролізу? Закони електролізу.
7. Схема інтегруючого електричного кола на операційному підсилювачі.
8. Який параметр визначають TDS-метри?
9. Еквівалентний опір і провідність кондуктометричної комірки.

10. Закон Ома в комплексній формі для активно-ємнісної ділянки електричного кола.

11. Структура, принцип дії і схеми включення адсорбційних чутливих елементів.

12. Основні явища, на яких базуються спектральні методи аналізу.

13. Види спектрів поглинання і випромінювання.

14. Поясніть принципи роботи бездисперсійних аналітичних приладів.

15. Методи розділення компонентів.

16. Сутність та класифікація хроматографічних методів аналізу.

17. Як визначити напрямок і силу Лоренца?

18. Пояснити призначення складових структурної схеми мас-спектрометра.

19. Принципи сепарації іонів в квадрупольному мас-спектрометрі.

20. Що таке хромато-мас-спектрометрія?

### **3.4. Методи моніторингу фізичного забруднення навколишнього середовища**

Моніторинг фізичного забруднення навколишнього середовища передбачає, насамперед, контроль таких факторів, як електричні і магнітні поля антропогенного походження, електромагнітне випромінювання радіочастотного діапазону, оптичне випромінювання, радіаційна безпека, шум і вібрація, запилення.

#### **3.4.1. Шкала електромагнітних хвиль**

Електромагнітною хвилею називається змінне електромагнітне поле, яке розповсюджується у середовищі з фазовою швидкістю

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

де  $c = \frac{1}{\epsilon_0\mu_0}$  – швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі,  $\epsilon$  і  $\mu$  – діелектрична і магнітна проникність середовища,  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  – електрична і магнітна сталі, відповідно.

Модулі векторів напруженості змінного електромагнітного поля пов'язані між собою співвідношенням:

$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H.$$

Згідно представлень класичної електродинаміки електромагнітні хвилі збуджуються електричними зарядами, які рухаються з прискоренням. У залежності від довжини хвилі у вакуумі  $\lambda = c/\nu$  (де  $\nu$  – частота), а також способу випромінювання і реєстрації розрізняють такі види електромагнітних хвиль: радіохвилі, оптичне випромінювання, рентгенівське і  $\gamma$  – випромінювання.

Радіохвилі збуджуються, наприклад, в будь-якому електричному колі змінного струму, проте ефективним випромінювачем є система, яка містить генератор хвиль і випромінювальну антену. Діапазон радіохвиль, в свою чергу, поділяють на дев'ять піддіапазонів, які відрізняються особливостями розповсюдження і генерації, а саме: наддовгі ( $>10^4$  м), довгі ( $10^4$ - $10^3$  м), середні ( $10^3$ - $10^2$  м), короткі ( $10^2$ - $10$  м), метрові ( $10$ - $1$  м), дециметрові ( $1$ - $0,1$  м), сантиметрові ( $0,1$ - $0,01$  м), міліметрові ( $10^{-2}$ - $10^{-3}$  м) та субміліметрові хвилі. Потрібно зауважити, що чітких границь між діапазонами немає, тобто границі між будь-якими діапазонами є умовними.

Оптичним випромінюванням, або світлом називають електромагнітні хвилі діапазону від 1 мм до 10 нм. До оптичного випромінювання відноситься інфрачервоне випромінювання, видиме світло, тобто те, яке спричиняє зорові відчуття людського ока, та ультрафіолетове випромінювання. Джерелом інфрачервоного випромінювання з довжиною хвиль від 1 мм до 0,77 мкм є нагріті тіла. Діапазон видимого світла складає 0,77-0,38 мкм, ультрафіолетового – від 0,38 мкм до 10 нм.

Рентгенівське випромінювання виникає при взаємодії заряджених частинок і фотонів з атомами речовини. Джерелом гамма-випромінювання з довжиною хвиль менше  $10^{-10}$  м є збуджені атомні ядра при радіоактивних перетвореннях, а також процеси розпаду елементарних частинок та ін.

### **3.4.2. Електромагнітні поля частотою до 300 ГГц**

В розглянутому діапазоні частот виокремлюють:

- електромагнітні явища, які не залежать від часу (нульова частота), тобто електростатичні і магнітостатичні поля, які є частковим проявом електромагнітного поля;

- електромагнітні поля промислової частоти 50-60 Гц;

- ділянки радіочастотного спектру 30 кГц-300 ГГц.

Характер дії електромагнітного поля на біологічні об'єкти залежить від співвідношення розмірів тіла  $h$  і довжини хвилі  $\lambda$ . Якщо  $h \ll \lambda$ , то розглядають окрему дію на об'єкт квазістатичного електричного і

магнітного поля. Якщо  $h \gg \lambda$ , то об'єкт знаходиться в полі дії електромагнітної хвилі як єдиного цілого. Тому до частоти 300 МГц нормують окремо напруженість електричного поля  $E$  (В/м) і напруженість магнітного поля  $H$  (А/м), або магнітну індукцію  $B$  (мкТл, для діамагнетиків, якими є біологічні об'єкти  $B = \mu_0 H$ ). В діапазоні 300 МГц - 300 ГГц нормують густину потоку енергії електромагнітного поля  $p$  (мкВт/см<sup>2</sup>).

Джерелами постійного електричного поля є нерухомі електричні заряди, які виникають при експлуатації електроприладів, електронної апаратури, утворюються на синтетичних тканинах та інших матеріалах з аналогічними діелектричними властивостями.

Магнітні поля утворюються електричними струмами, тому джерелами постійного магнітного поля є не тільки постійні магніти, але і електромагніти, тобто провідники в яких протікає постійний струм  $I$ . Здатність котушки з кількістю витків  $w$  породжувати магнітне поле характеризують магніторушійною силою  $F = Iw$ . Напрямок сили струму і силових ліній магнітного поля пов'язані між собою правилом правоходового гвинта.

Джерелом електромагнітного поля промислової частоти є лінії електропередачі, трансформаторні підстанції, електротранспорт, побутове обладнання.

Джерелами електромагнітного випромінювання радіочастотного спектру є антени радіолокаційних станцій, телерадіостанцій та систем мобільного зв'язку.

Як постійні, так і змінні електромагнітні поля суттєво впливають на організм людини в результаті наведення індукційних струмів та внутрішніх полів. Цей вплив залежить від багатьох параметрів: геометрії, електричних і магнітних властивостей біологічних тканин, частоти, інтенсивності, модуляції та інших характеристик електромагнітного поля. Зокрема, електроопір тіла людини має активно-ємнісний характер, тому при збільшенні частоти збільшується іонна провідність у зв'язку із зменшенням ємнісного опору  $X_c = 1/\omega C$  клітинних мембран. Високочастотне електричне поле практичне не проникає в тіло людини внаслідок поверхневого ефекту, а для магнітного поля біологічні тканини не чинять перешкод ( $\mu \approx 1$ ). Вихрові струми, індуковані змінним магнітним полем, діелектричні втрати, обумовлені коливанням дипольних молекул води і білків, при високих частотах викликають нагрів біологічних тканин. Окрім теплових ефектів проявляється вплив зовнішнього електромагнітного поля на внутрішні поля організму, на функціонування органів і систем на клітинному рівні. В результаті відбувається порушення гомеостазу – стану внутрішньої динамічної рівноваги біологічної системи.

Гранично допустимі рівні електромагнітного випромінювання встановлюють медико-біологічними дослідженнями. Наведемо деякі нормативи згідно санітарних правил і норм (СанПіН):

- для електромагнітних полів промислової частоти напруженість електричного поля  $E$  в житлових приміщеннях не повинна перевищувати 0,5 кВ/м, а напруженість магнітного поля  $H \leq 8$  А/м;

- для різних діапазонів частот в межах 30 кГц-300 МГц ГДР напруженості  $E$  змінюються у межах від 25 В/м до 3 В/м;

- ГДР густини потоку енергії електромагнітного поля для діапазону 300 МГц-300 ГГц складає 10 мкВт/см<sup>2</sup>.

Проте, Міжнародна комісія із захисту від неіонізуючих випромінювань (ICNIRP) рекомендує застосовувати запобіжний принцип, який полягає у максимально можливому превентивному обмеженні дії електромагнітного випромінювання на організм людини. Електромагнітні випромінювання викликають зниження імунітету, серцево-судинні захворювання, мають канцерогенний ефект, впливають на психіку людини. Найбільш дієвим є «захист часом» (часове обмеження користування джерелами електромагнітного поля), відстанню та екрануванням. У людини немає органів чуття, які сприймають електромагнітні хвилі радіодіапазону, тільки прилади, принципи функціонування яких наведено в надалі.

### 3.4.2.1. Вимірювання характеристик електричного поля

Розглянемо електростатичне поле, створене точковим електричним зарядом  $q$ . Якщо в це поле помістити точковий заряд  $q_1$ , то згідно закону Кулона сила  $F$  взаємодії між зарядами:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{qq_1}{r^2},$$

де  $r$  – відстань між зарядами.

Напруженість електричного поля  $E=F/q_1$  є силовою характеристикою дії поля на заряджені частинки, яка залежить від  $r$ :

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r^2}.$$

Потенціал  $\varphi=Er$  є енергетичною характеристикою електричного поля. Потенціал електростатичного поля, створеного точковим зарядом  $q$  в ізотропному діелектрику:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r}.$$



Графічно електричне поле зображають силовими лініями, які напрямлені від додатних зарядів. На рис. 9.18 а, б та в наведено силові лінії поля додатного точкового заряду від'ємно зарядженої площини і плоского конденсатора, відповідно.

За межами пластин конденсатора поля плюсової і мінусової пластин взаємо компенсуються, тобто поле існує тільки між пластинами в місці закінчення яких мають місце крайові ефекти, що проявляються у викривленні силових ліній.

Діелектрики і провідники поводять себе в електричному полі по-різному. В діелектриках немає вільних носіїв заряду. Оскільки електронейтральні молекули (атоми) складаються із заряджених частинок (зв'язані заряди) в електричному полі відбувається явище поляризації діелектриків.

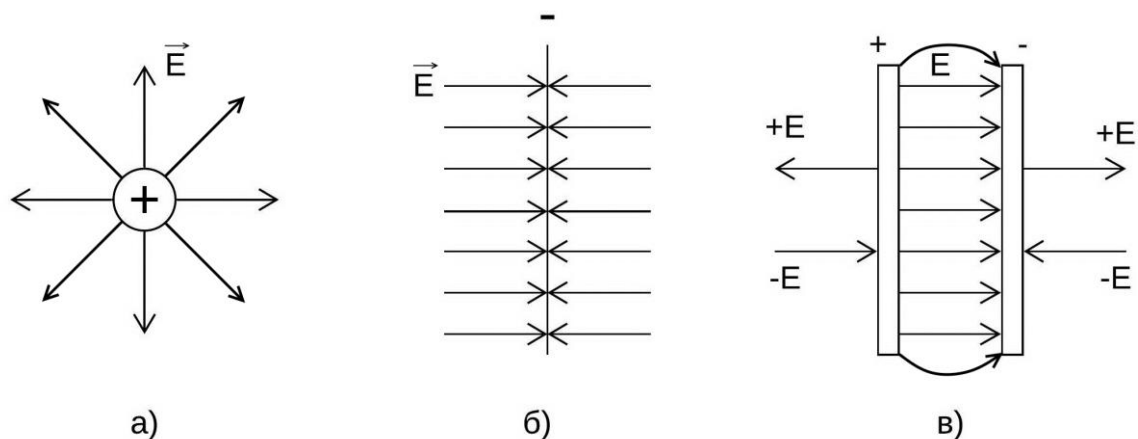


Рис. 3.18. Силові лінії електростатичного поля  $E$ : а) додатного точкового заряду; б) від'ємно зарядженої нескінченної площини; в) плоского конденсатора

В металах є вільні носії від'ємного заряду – електрони, які можуть під дією поля переміщатися у об'ємі провідника. Якщо незаряджений провідник помістити в електричне поле, то в провіднику індукуються електричний заряд, поверхнева густина якого  $\sigma=dq/dS$ . Напруженість електричного поля поблизу поверхні провідника  $E=\sigma/\epsilon_0\epsilon$ . Вільні електрони і додатні іони кристалічної ґратки створюють внутрішнє поле направлене проти зовнішнього. Тому всередині провідника результуюче електричне поле рівне нулю, а весь об'єм провідника є екіпотенціальним, тобто  $\varphi=const$ . Цей потенціал рівний потенціалу зовнішнього поля в точці, яка співпадає з центром електричних зарядів провідникового тіла. Наприклад, потенціал кулі рівний потенціалу зовнішнього поля в центрі кулі.

Якщо в однорідне електричне поле помістити два незаряджені провідникові тіла, то між ними виникає різниця потенціалів  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ , тобто напруга, яку можна виміряти вольтметром:

$$U = rE_3 \cos \alpha,$$

де  $E_3$  – модуль вектору напруженості зовнішнього електричного поля,  $r$  – відстань між центрами електричних зарядів тіл,  $\alpha$  – кут між вектором напруженості і прямою, що з'єднує центри зарядів.

Отже, за допомогою первинного вимірювального перетворювача у вигляді двох електродів і високоомного вольтметра-електрометра з входним опором до  $10^{14}$  Ом можна визначати напрямок вектору напруженості однорідного електричного поля (при  $\alpha = 0$  напруга приймає максимальне значення) і його модуль. Такий статичний метод вимірювання найбільш простий, проте має суттєві недоліки. Зокрема, у зв'язку із скінченим значенням внутрішнього опору вольтметра між електродами протікає електричний струм, тому покази вольтметра у процесі вимірювання змінюються. Для запобігання цьому явищу застосовують модуляційні методи вимірювання. Вимірювальний перетворювач можна обертати з кутовою швидкістю  $\omega$  навколо центру симетрії. При цьому  $\alpha = \omega t$ , миттєве значення напруги  $u = rE_3 \cos \omega t$ , а вольтметр вимірює діюче значення напруги  $U = rE_3 / \sqrt{2}$ . У більшості випадків перетворення постійного електричного сигналу у змінний здійснюють за допомогою обертання заземленої пластини, яка періодично екранує непорушні вимірювальні електроди, підключені до вимірювальних кіл цифрового вольтметра, у складі якого є диференціальний підсилювач, електричний фільтр та аналого-цифровий перетворювач.

Окрім оцінки напруженості електростатичного поля за різницею потенціалів застосовують метод вимірювання величини заряду, що індукується полем на поверхні ізолюваного провідника ( $E = q / \varepsilon_0$ ). Вимірювання можна, як і в попередньому випадку, здійснювати безпосередньо електрометром. В сучасних приладах застосовують вищезгаданий метод модуляції, тобто перетворення постійного сигналу у змінний періодичним екрануванням провідникової пластини-датчика поля. Для обертання екрануючої заземленої пластини застосовують електричні мікродвигуни.

У випадку вимірювання напруженості квазістатичного електричного поля промислової частоти на вимірювальних пластинах датчика поля індукуються електричні заряди з частотою мережі, у вимірному колі протікає змінний струм, тому реалізація приладів вимірювання  $E$  частоти  $f = 50$  Гц набагато простіша ніж для  $E = const$ .

Для вимірювання напруженості змінного електричного поля випромінювання радіочастотного діапазону як первинний вимірювальний перетворювач, як правило, застосовують дипольну антену. Структурна схема такого вимірювача напруженості поля містить антену, вимірювальний радіоприймач, калібратор і вимірювальний прилад. Дипольна антена, розміри якої малі порівняно з довжиною хвилі складається з двох однакових взаємоізольованих симетрично розташованих провідників. Форма провідників може бути різною. В найпростішому випадку це два металічні циліндричні стержні на діелектричній основі. Якщо помістити антену в електричне поле, то між елементами, які утворюють антену, виникає змінна напруга. Амплітуда сигналу залежить від просторової орієнтації антени по відношенню до напрямку розповсюдження і поляризації електромагнітної хвилі. Миттєве значення цієї напруги  $u = U_m \sin \omega t$  пропорційне проекції миттєвого значення напруженості електричного поля на вісь антени. Сигнал з антени поступає у вхідний резонансний LC-контур радіоприймача структурна схема якого наведена на рис. 9.19. На схемі ДА – дипольна антена, ПВЧ – підсилювач високої частоти, З – змішувач, Г – гетеродин, ФПЧ – смуговий електричний фільтр проміжкової частоти, ППЧ – підсилювач проміжкової частоти, Д – детектор, В – вимірювальний пристрій, БЖ – блок живлення. Гетеродин – це перестроюваний генератор синусоїдних коливань. Вхідні коливальні LC – контури гетеродина, змішувача та ПВЧ одночасно перенастроюються так, що на виході змішувача отримують різницевої сигнал постійної проміжкової частоти. Цей сигнал виділяється смуговим фільтром, підсилюється, детектується і поступає на вимірювальний пристрій, наприклад, вольтметр.

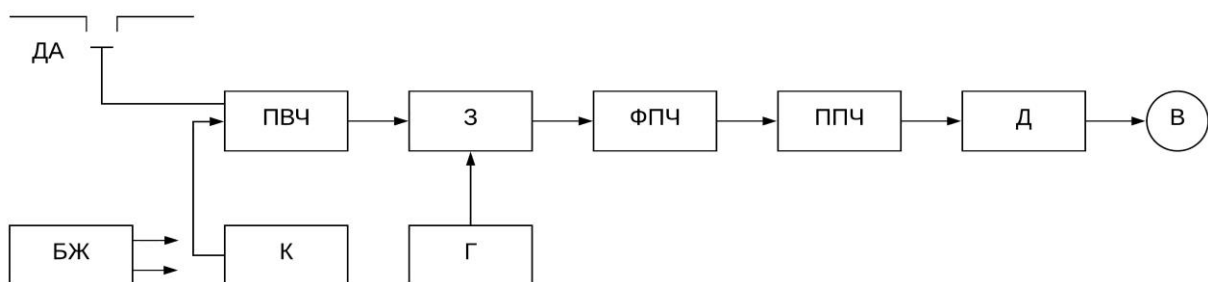


Рис. 3.19. Структурна схема вимірювача напруженості електричного поля в діапазоні радіочастот

Метрологічне забезпечення здійснюють за допомогою генератора стандартних сигналів – калібратора К. Такими приладами вимірюють середньоквадратичне значення за період напруженості електричного поля

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (E_m^2(r, t)) dt}.$$

### 3.4.2.2. Вимірювання характеристик магнітного поля

Магнітне поле, одна з форм електромагнітного поля, створюється рухомими зарядженими частинками чи тілами і діє тільки на рухомі електричні заряди та заряджені тіла. Основною силовою характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції  $B$ . Наприклад, прямолінійний провідник, у якому протікає постійний струм  $I$ , згідно закону Біо-Савара-Лапласа, породжує магнітне поле з індукцією (див. рис. 9.20 а):

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r},$$

де  $r$  – радіальна відстань від провідника,  $\mu_0$  – магнітна стала ( $4\pi 10^{-7}$  Гн/м),  $\mu$  – безрозмірна величина, яка характеризує магнітні властивості середовища і називається відносною магнітною проникністю.

Якщо провідник довжиною  $l$  помістити в зовнішнє однорідне магнітне поле  $B_z = const$ , внаслідок взаємодії двох магнітних полів на нього діє електромагнітна сила (сила Ампера):

$$F_{em} = IB_z l \sin \alpha,$$

де  $\alpha$  – кут між  $B_z$  та  $l$ .

Для однорідного ізотропного середовища магнітна індукція і напруженість магнітного поля  $H$  пов'язані співвідношенням  $B = \mu_0 \mu H$ .

Графічно магнітні поля зображують у вигляді силових ліній, які проведені в магнітному полі так, що вектор магнітної індукції  $B$  у кожній точці силової лінії направлений по дотичній до неї. Напрямок силових ліній і напрямок сили струму пов'язані правилом правоходового гвинта. Ці лінії не мають початку і кінця тому, що вони замкнені, або ідуть із нескінченості в нескінченість (наприклад, осьові лінії котушки із струмом та стержньового постійного магніту), або й мають вигляд концентричних кілець навколо провідника із струмом, розташованих перпендикулярно до його площини. Силіві лінії магнітного поля для прямолінійного провідника і котушки із струмом наведено на рис. 9.20 а, б.

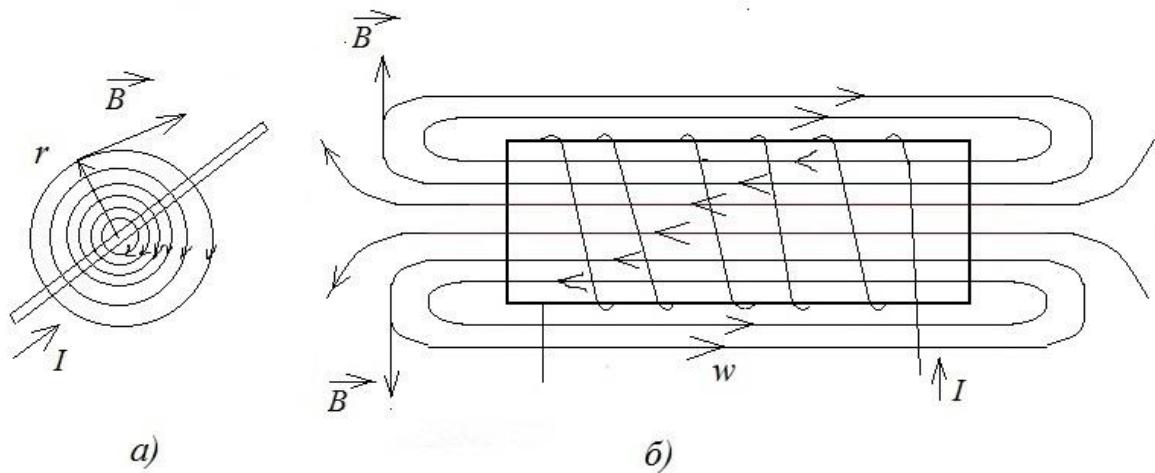


Рис. 3.20. Силлові лінії магнітного поля: а) прямолінійного провідника зі струмом  $I$ ; б) котушки з кількістю витків  $w$ .

Для вимірювання постійних магнітних полів застосовують перетворювачі, дія яких базується на різних фізичних явищах, а саме на взаємодії постійного магнітного поля первинного вимірювального перетворювача (ПВП) із зовнішнім полем на розщепленні ліній спектру випромінювання атома у магнітному полі (ефект Зеемана), або на явищі протікання струму через тонкий шар діелектрика, який розділяє два надпровідники (ефект Джозефсона) та багатьох інших. Найбільш чутливими є надпровідні магнітометри типу «СКВІД» (від англ. *SQUID* – *superconducting quantum interference device*), які фіксують магнітні поля з індукцією до  $\sim 10^{-15}$  Тл. В діапазоні значень індукції магнітного поля, який відповідає санітарним правилам і нормам, як ПВП найчастіше використовують датчики Холла.

Ефект Холла полягає в тому, що в металі або напівпровіднику із струмом у магнітному полі перпендикулярному до напрямку протікання сили струму, виникає поперечне електричне поле і різниця потенціалів. Причиною такого гальваноманітного ефекту є відхилення носіїв заряду, які рухаються в магнітному полі під дією сили Лоренца (див. розділ 9.2). На рис. 9.21 вказано напрямки магнітної індукції  $B$ , сили струму  $I$ , швидкості руху електронів  $V$ , сили Лоренца  $F_L$  і знаки електричних зарядів, які накопичуються на верхній і нижній гранях датчика Холла, якщо він виготовлений із металу або напівпровідника  $n$ -типу. Для напівпровідника  $p$ -типу знаки зарядів будуть протилежними, оскільки напрямки сили струму і руху додатних носіїв заряду співпадають. Відхилення зарядів магнітним полем відбувається до тих пір, поки дія сили в поперечному електричному полі не врівноважить силу Лоренца ( $eE = eVB$ , де  $e$  – заряд електрона).

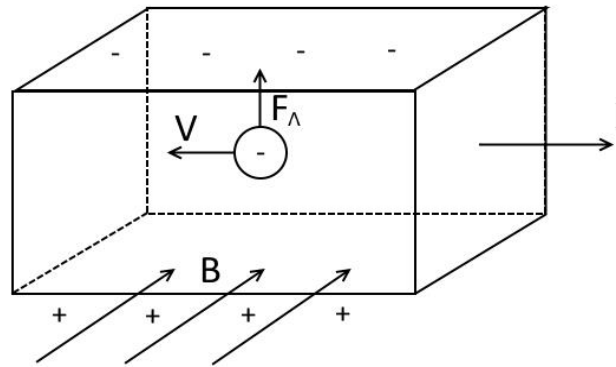


Рис. 3.21. Схема датчика Холла

Рівноважна різниця потенціалів  $U_x$  для ефекту Холла:

$$U_x = R \frac{IB}{d},$$

де  $I$  – сила струму,  $B$  – індукція магнітного поля,  $d$  – лінійний розмір датчика в напрямку  $B$ ,  $R$  – коефіцієнт пропорційності, який називають постійною Холла для цього зразка.

Із наведеного рівняння можна зробити висновок, що електрорушійна сила Холла є лінійною функцією індукції поля, тобто  $U_x = kB$ . На практиці константу  $k$  визначають градуванням приладу в магнітному полі з відомим значенням магнітної індукції.

Для вимірювання індукції чи напруженості змінного магнітного поля застосовують індукційні датчики. Згідно закону електромагнітної індукції, якщо площа  $S$  обмежена провідниковим контуром і пронизується змінним магнітним потоком  $\Phi$ , то в контурі індукується електрорушійна сила (ЕРС)  $e$ , пропорційна швидкості зміни потоку:  $e = -d\Phi/dt$ . Для котушки з кількістю витків  $w$  отримаємо:  $e = -w d\Phi/dt$ . Магнітний потік є інтегральною характеристикою магнітного поля:  $\Phi = \int B dS$ , якщо  $B = const$ , а вектор  $B$  перпендикулярний до  $S$ , то  $\Phi = BS$ .

У ролі первинного вимірювального перетворювача застосовують вимірювальну котушку у вигляді рамочної антени, розміри якої малі порівняно з довжиною хвилі електромагнітного випромінювання. В результаті дії змінного магнітного поля на виході рамочної антени виникає змінна ЕРС, миттєве значення якої пропорційне проекції миттєвого значення вектору індукції магнітного поля на вісь перпендикулярну до площини рамочної антени. Розглянемо синусоїдне магнітне поле з індукцією

$$B = B_m \sin \omega t,$$

де  $B_m$  амплітуда магнітної індукції,  $\omega$  – кутова частота.

У витках антени, розоміщеної в таке поле, виникає ЕРС індукції

$$e = -wS \cos \alpha dB/dt,$$

де  $\alpha$  – кут між нормаллю до площі поперечного перерізу каркасу антени і вектором магнітної індукції.

Після диференціювання отримаємо:

$$e = -\omega w S B_m \cos \alpha \cos \omega t = E_m \cos \omega t,$$

а діюче середньоквадратичне за період значення

$$E = E_m / \sqrt{2} = 4,44 f w S B_m \cos \alpha,$$

де частота  $f = \omega / 2\pi$ .

Діюче значення ЕРС індукції буде максимальним, коли площина вимірювальної рамочної антени буде зорієнтована перпендикулярно до силових ліній магнітного поля. Отже, окрім діючого значення індукції  $B$  антена визначає напрямок силових ліній магнітного поля в будь-якій точці простору.

### 3.4.3. Випромінювання оптичного діапазону

Як зазначено раніше до оптичного випромінювання відносять інфрачервоне випромінювання, видиме світло та ультрафіолетове випромінювання. Світло представляє собою складне явище, яке характеризується корпускулярно-хвильовим дуалізмом: в одних випадках воно поводить себе як електромагнітна хвиля, в інших – як потік елементарних частинок (корпускул), які називають фотонами. Рівняння, що пов'язують такі хвильові властивості світла, як довжина хвилі  $\lambda$ , частота  $\nu$  із корпускулярними властивостями – енергією  $E$  та імпульсом  $p$  фотона мають вигляд  $E = h\nu$ ;  $p = h/\lambda$ . Чим більша довжина хвилі  $\lambda = c/\nu$ , тим в меншій мірі проявляються квантові властивості, і навпаки, прояв хвильових властивостей поступово зникає при зменшенні  $\lambda$ .

Величини, за допомогою яких оцінюють оптичне випромінювання, поділяють на енергетичні, які залежать тільки від енергії світлової хвилі та фотометричні, які характеризують випромінювання щодо дії світла на око людини. Фотометричні одиниці залежать як від енергії, так і довжини хвилі випромінювання. Усереднену чутливість нормального людського ока до випромінювання ілюструє крива відносної спектральної чутливості  $V(\lambda)$ . Безрозмірна величина  $V(\lambda) = 1$  для  $\lambda = 0,5$  мкм, тобто око людини максимально чутливе до такої довжини хвилі, що сприймається у вигляді зеленого кольору і яка, виявляється має максимальну інтенсивність у спектрі випромінювання Сонця.

До енергетичних величин відносять потік енергії випромінювання  $\Phi_e$ , який вимірюють у ватах:

$$\Phi_e = dW/dt,$$

де  $W$  – енергія випромінювання.

Інші енергетичні величини: сила випромінювання

$$I_e = d\Phi_e/d\Omega,$$

де  $\Omega$  – тілесний кут у стерadianах; енергетична освітленість  $E_e$  та енергетична світність  $M_e$ .

Енергетична освітленість  $E_e = d\Phi_e/dS$  характеризує енергетичний потік випромінювання, який припадає на одиницю площі поверхні освітленого об'єкта. Для джерела світла, яке випромінює потік енергії, параметр  $M_e = d\Phi_e/dS$  називають енергетичною світністю.

Розглянемо фотометричні одиниці. Світловий потік  $\Phi$  визначають як добуток енергетичного потоку на відносну спектральну чутливість  $V(\lambda)$ . Для інтервалу довжин хвиль  $d\lambda$  отримаємо:  $d\Phi = V(\lambda)d\Phi_e$ . Розмірність світлового потоку, який створює зорове відчуття співпадає з розмірністю потоку енергії, а його одиниця вимірювання має назву люмен (лм).

Параметр  $I = d\Phi/d\Omega$  називають силою світла, одиниця вимірювання якого кандела (кд).

Фотометрична величина  $E = d\Phi/dS$ , яка характеризує ступінь освітленості деякої поверхні падаючим на неї світлом називається освітленістю і вимірюється в люксах ( $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм}/1 \text{ м}^2$ ). Джерело світла характеризують світністю  $M$  та яскравістю  $L$ . Світність визначає випромінювання деякого елемента поверхні у всіх напрямках і вимірюється в лм/м<sup>2</sup>. Яскравість  $L = dI/dS \cos\alpha$  залежить від сили світла, площі поверхні, що випромінює, напрямку (кут  $\alpha$ ) і вимірюється в канделах на квадратний метр (кд/м<sup>2</sup>).

Інфрачервоне випромінювання здійснює тепловий вплив на людину і може спричиняти локальний перегрів біологічних тканин. Надмірне випромінювання цього спектрального діапазону несприятливо впливає на органи зору та може спричинити деструкцію молекул білків і викликати помутніння кришталика ока (катаракту).

Видиме світло яскравих випромінювачів може викликати ушкодження сітківки ока. Такі фактори, як пульсація штучного освітлення, недостатня освітленість викликають втому, перенавантаження, функціональні і органічні порушення органів зору. Ультрафіолет викликає опіки рогівки ока, чинить фотохімічну дію на шкіру, викликає системні зміни функціонування організму. Згідно до вказаних причин параметри оптичного випромінювання нормуються за допомогою вищенаведених енергетичних та фотометричних одиниць.



### 3.4.3.1. Джерела світла

Штучні джерела світла поділяються на когерентні (лазерні) і некогерентні, які представлені широкою номенклатурою і класифікують за багатьма ознаками, а саме: за спектральним діапазоном, принципом дії, призначенням, конструктивними особливостями та ін. Зокрема, розрізняють теплові та люмінесцентні джерела оптичного випромінювання. В техніці та побуті найбільш масово застосовують лампи розжарення, люмінесцентні та газорозрядні лампи, а також світлодіодні пристрої, в яких відбувається перетворення електричної енергії у світлову в результаті випромінювальної рекомбінації носіїв заряду в напівпровідниках.

Теплове випромінювання залежить тільки від температури і оптичних властивостей випромінюючого тіла. Для підтримання температури випромінювача, його енергія має поповнюватися в результаті підведення тепла. Теплове випромінювання електромагнітних хвиль відбувається при використанні внутрішньої енергії тіл і є єдиним, яке знаходиться в термодинамічній рівновазі з речовиною. Інші види свічення, які збуджуються будь-якими іншими видами енергії, окрім внутрішньої, називають люмінесценцією. Параметр  $dW/d\lambda$  називають випромінювальною здатністю випромінюючого тіла. Якщо на тіло попадає випромінювання, то відношення поглинутої енергії до падаючої є поглинаючою здатністю. Абсолютно чорним тілом називають модельний об'єкт, який повністю поглинає падаюче випромінювання, а сірим тілом – об'єкт, поглинаюча здатність якого хоч і менше одиниці, але не залежить від довжини світлової хвилі, її напрямку розповсюдження і поляризації. Відношення випромінювальної і поглинаючої здатності не залежить від природи тіла і визначається тільки його температурою і довжиною хвилі випромінювання (у відповідності до закону Кірхгофа). Це означає, що тіло, яке сильніше поглинає промені, при нагріві сильніше і випромінює. За законом Стефана-Больцмана енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому ступеню його абсолютної температури:

$$M_e = \sigma T^4,$$

де  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана.

Енергія випромінювання абсолютно чорного тіла нерівномірно розподілена у його спектрі. Нагрітий об'єкт практично не випромінює в області низьких і високих частот, а довжина хвилі, яка відповідає максимуму енергетичної світності  $\lambda_m = 2,9 \cdot 10^{-3}/T$  (закон зміщення Віна). Наприклад, максимум випромінювання тіла людини з температурою

36,5<sup>0</sup>С згідно закону Віна припадає на довжину хвилі 9,37 мкм. Сонце, для якого  $\lambda_m=0,5$  мкм, можна прирівняти до абсолютно чорного тіла, температура якого дорівнює ~6000<sup>0</sup>С.

В штучних джерелах теплового випромінювання тіло, яке випромінює світло, можна нагрівати завдяки хімічній реакції горіння електричним струмом. Найбільш розповсюдженим тепловим джерелом оптичного випромінювання є вакуумні та галогенні лампи з вольфрамовою ниткою розжарення. Галогенні лампи підвищують температуру нагріву вольфраму і мають більш тривалий термін служби.

В люмінесцентних лампах електричний розряд в парах ртуті створює ультрафіолетове випромінювання, яке трансформується у видиме за допомогою явища фотолюмінесценції. Речовини, яка здатні до люмінесценції називають люмінофорами. Застосовують також газорозрядні лампи і без люмінофорів, в яких світло випромінює лише газовий розряд: таке явище називається електролюмінесценція.

Світлодіодні джерела випромінюють у вузькій області спектру. Для створення білого світла можливе застосування трикомпонентних RGB-структур, які випромінюють червоне, зелене і синє світло, що в комбінації дає білий колір. Більш просте рішення представляють світлодіоди синього чи фіолетового кольору із шаром люмінофора, який завдяки фотолюмінесценції перетворює частину випромінювання світлодіоду. Суміш випромінювання люмінофора і світлодіоду створює білий колір різних відтінків. Світлодіодні джерела випромінювання мають багато переваг і масштаби їх застосування швидко зростають.

### **3.4.3.2. Датчики оптичного випромінювання**

Датчики приладів, призначених для вимірювання характеристик оптичного випромінювання (радіометрів, люксометрів та ін.), перетворюють енергію поглинутих світлових хвиль у зміну деякого параметру, або генерують електричний сигнал. Їх класифікують за різними ознаками, зокрема, поділяють на теплові і квантові детектори.

Основними типами теплових датчиків є калориметри (реєструється зміна температури матеріалу детектора), термомпари і термобатарей, болометри, піроелектричні детектори. Принцип дії термомпар, які представляють собою спаяні дроти з різнорідних металів чи сплавів, заснований на використанні термоелектричних явищ (ефект Зеебека). При наявності різниці температур між гарячим і холодним спаєм термомпари виникає термоелектрорушійна сила, яку вимірюють мілівольтметром. В болометрах застосовують провідникові чи напівпровідникові пристрої (терморезистори і термістори) електричний опір яких змінюється у залежності від температури. Піроелектричний

ефект спостерігається в багатьох кристалічних діелектриках і напівпровідниках і полягає у виникненні електричного поля при зміні температури піроелектрика.

Дія різноманітних квантових детекторів заснована на явищах зовнішнього і внутрішнього фотоефекту. Зовнішній фотоефект полягає у емісії (випусканні) електронів речовиною під дією світла. Найпростішим квантовим датчиком є фотоелемент. Він складається з фотокатода і анода, між якими прикладена різниця потенціалів  $U$ . Величина фотоструму залежить від енергетичної освітленості катода і напруги  $U$ . Пристрої з багатьма катодами, в яких використовують явище вторинної електронної емісії, називають фотоелектронними помножувачами (ФЕП).

Внутрішній фотоефект спостерігається в напівпровідниках і діелектриках і полягає у перерозподілі електронів за енергетичними станами під дією світла. В результаті цього виникає явище фотопровідності, або виникає фотоелектрорушійна сила на контакті напівпровідник-метал, або р-п переході (контакти двох різнорідних напівпровідників). Напівпровідникові пристрої, в яких генерується фото-ЕРС, називаються фотодіодами. Ці прилади можуть працювати в фотогальванічному чи в фотодіодному режимах. У першому варіанті пристрій є джерелом фото-ЕРС, величина якої пропорційна освітленості і залежить від фоточутливості діода конкретного типу. Для прикладу на рис. 9.22 наведено залежність чутливості кремнієвого р-і-n фотодіода PDA 36A фірми THORLABS від довжини хвилі, нм.

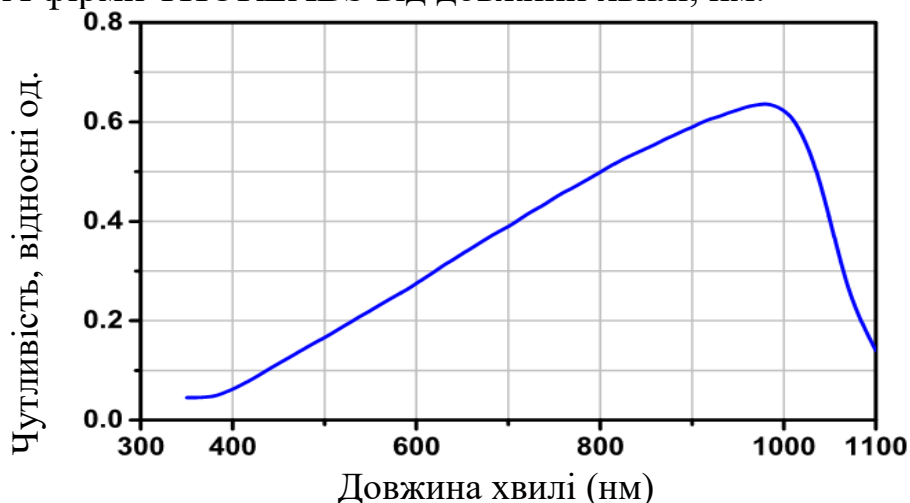


Рис. 3.22. Спектральна чутливість фотодіода PDA 36A

В фотодіодному варіанті застосовують зовнішнє живлення, при цьому чутливість фотодіода збільшується порівняно з фотогальванічним режимом (рис. 9.23).

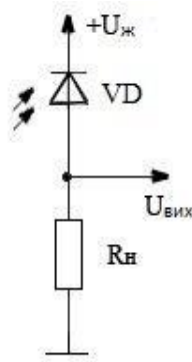


Рис. 3.23. Включення детектора у фотодіодному режимі

Фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори застосовують як первинні вимірювальні перетворювачі люксметрів – цифрових вимірювачів освітленості  $E$  для контролю санітарних норм освітлення виробничих приміщень і робочих місць.

#### 3.4.4. Іонізуючі випромінювання

До іонізуючих випромінювань відносять як електромагнітне випромінювання рентгенівського діапазону та  $\gamma$ -випромінювання, так і корпускулярне випромінювання, тобто потоки елементарних частинок, наприклад: нейтронів, протонів,  $\alpha$ -частинок, які являють собою ядра атомів гелію  ${}^4_2\text{He}$ ,  $\beta$ -частинок – потоків електронів чи позитронів тощо. Іонізуючі випромінювання утворюються у процесі розпаду нестабільних радіоактивних ядер чи ізотопів хімічних елементів, генеруються на прискорювачах, в рентгенівських апаратах, комп'ютерних томографах. Джерелами іонізуючих випромінювань антропогенного походження є атомні електростанції (АЕС), судові та ракетні ядерні установки, заводи з переробки та збагачення уранових руд, виробництва паливних елементів для АЕС.

Біологічна дія іонізуючих випромінювань обумовлена іонізацією і збудженням атомів і молекул в складі живих клітин. Такі атоми хімічно активні. В результаті можливий синтез хімічних сполук не властивих живому організму, інакше кажучи має місце деструкція (руйнування) та інші зміни в складних молекулах і клітинних структурах, в тому числі і в ДНК, які несуть генетичну інформацію. До інших особливостей дії таких випромінювань, на які не реагують органи чуття, відноситься кумулятивний ефект (ефект накопичення), генетичний ефект (ефект дії на спадкоємців), а також те, що різні органи і системи людського організму по різному реагують на опромінення. Найсильніше уражаються органи, клітини яких інтенсивно діляться: кістковий мозок,

щитовидна залоза, легені, статеві органи. Насамперед страждає імунна система, збільшується імовірність онкологічних захворювань.

Стосовно дії на організм людини, найбільш важливими параметрами іонізуючих випромінювань є їх проникаюча здатність і іонізуюча спроможність. Проникаюча здатність відповідає мінімальному шару речовини здатному повністю поглинути такий вид випромінювання. Іонізуючу спроможність характеризують кількістю іонів, які утворюються внаслідок дії одиничного кванта (частинки) випромінювання. Максимальна проникаюча здатність притаманна  $\gamma$ -випромінюванню, а іонізуюча спроможність –  $\alpha$ -частинкам, які особливо небезпечні при внутрішньому опроміненні, тобто коли попадають через органи дихання чи травлення в організм людини.

Тривалість забруднення навколишнього середовища радіонуклідами характеризує період їх напіврозпаду. Розглянемо закон радіоактивного розпаду. Кількість ядер  $dN$ , які розпадаються за час  $dt$ :

$$dN = -\lambda N dt,$$

де  $N$  – загальна кількість радіоактивних ядер,  $\lambda$  – характерна для певної речовини константа, яку називають сталою розпаду, а знак «мінус» вказує, що кількість радіоактивних ядер внаслідок спонтанного розпаду з часом зменшується.

Запишемо це рівняння у вигляді:

$$\frac{1}{\lambda} \frac{dN}{dt} + N = 0.$$

Розв'язок такого однорідного диференціального рівняння знаходимо у вигляді

$$N = N_0 e^{-pt},$$

де  $N_0$  – кількість радіоактивної речовини в початковий момент часу  $t=0$ ,  $p$  – корінь характеристичного рівняння  $p/\lambda + 1 = 0$ .

Отже, закон радіоактивного розпаду:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

тобто, кількість радіоактивних ядер, які не розпалися, зменшується з часом за експоненціальною залежністю. Час  $T$ , протягом якого розпадається половина початкової кількості ядер, називають періодом напіврозпаду. Із закону розпаду знаходимо  $T = \lambda^{-1} \ln 2$ , тому інша форма запису цього закону має вигляд:

$$N = N_0 2^{-t/T}.$$

В результаті дії на речовину іонізуючих випромінювань виникає наведена радіоактивність. В основному, це відбувається при опроміненні нейтронами, які захоплюються ядрами атомів і перетворюють атоми такої речовини у нестабільні ізотопи. Тому,

наприклад, виникає проблема утилізації елементів ядерних реакторів і установок, які десятками років опромінюються нейтронами. Для вирішення цієї проблеми застосовують матеріали, в яких наведена радіоактивність швидко зменшується, оскільки вони не містять довготривалих (тобто з великим періодом напіврозпаду  $T$ ) ізотопів. Наприклад у сплавах з 79% ванадію і 21% титану наведена радіоактивність зменшується до безпечного рівня за 30 років, у сталях певних марок – за 100 років, а в матеріалах з нікелем, ніобієм, молібденом період напіврозпаду складає десятки тисяч років.

Для оцінки вмісту радіонуклідів, тобто ступеню радіоактивного забруднення місцевості і об'єктів, застосовують поняття активності. Активність характеризують кількістю актів радіоактивного розпаду в одиницю часу, тобто  $|dN|/dt = \lambda N$ . Відповідні одиниці вимірювання називають одиницями активності радіонуклідів. Такими одиницями є Бекерель (1 Бк=1 розпад/с), Кюрі (позасистемна одиниця, 1 Кі=3,7·10<sup>10</sup> Бк), а також одиниці питомої активності Кі/кг, Кі/л, Кі/км<sup>2</sup>. Вимірювання активності здійснюють приладами, які називають радіометрами.

Міра дії іонізуючого випромінювання в будь-якому середовищі залежить від енергії випромінювання, оцінюється його дозою і вимірюється приладами, які називають дозиметрами. Таку дозу визначають для повітря, для речовини і для біологічної тканини. Відповідно, розрізняють експозиційну, поглинену та еквівалентну дозу іонізуючого випромінювання.

Експозиційна доза  $D_e$  є мірою іонізуючої дії випромінювання у повітрі. Вона визначається як відношення сумарного електричного заряду іонів одного знаку, створених у повітрі, до маси повітря у цьому об'ємі і вимірюється в міжнародній системі одиниць SI у Кулонах на кілограм (Кл/кг). Позасистемна одиниця – Рентген (1 Р=2,58·10<sup>-4</sup> Кл/кг) – відповідає утворенню 2,08·10<sup>9</sup> пар іонів в 1 см<sup>3</sup> повітря.

Від часу перебування у зоні дії випромінювання та експозиційної дози  $D_e$  залежить поглинена доза  $D$ , яка відповідає енергії іонізуючого випромінювання, поглиненої одиницею маси речовини і в системі SI її вимірюють в Грєях (1 Гр=1 Дж/кг). Позасистемна одиниця 1 рад=10<sup>-2</sup> Гр.

Для оцінки ступеня радіаційної небезпеки потрібно знати не тільки поглинену дозу, але і природу випромінювання, який створює різний біологічний ефект. Наприклад, деякі види біологічних реакцій для нейтронів в десять разів більші, ніж для рентгєнівського випромінювання. Для врахування цього факту застосовують безрозмірний коефіцієнт  $K$  якості випромінювання, який визначається з медико-біологічних досліджень і вказує у скільки разів радіаційна

небезпека даного виду опромінення більша, ніж зразкового при однаковій  $D$ . Таку міру очікуваної радіаційної небезпеки для живих організмів називають еквівалентною дозою і визначають як  $H=KD$  та вимірюють у Зівертах. Позасистемна одиниця 1 бер (біологічний еквівалент рада) рівна  $10^{-2}$  Зв. Необхідно зауважити, що оцінка біологічної дії випромінювання ускладнюється різною реакцією органів і систем організму на однакову еквівалентну дозу.

Реєстрацію іонізуючих випромінювань здійснюють за допомогою багатьох різновидів детекторів, серед яких провідну роль відіграють іонізаційні детектори, зокрема, лічильники Гейгера-Мюллера, які живляться від високовольтного джерела напругою  $U=350-600$  В. Конструктивно ці лічильники представляють собою циліндричний металічний катод, розміщений у заповненому інертним газом скляному чи металічному корпусі, і анод у вигляді дроту на осі циліндра. На рис. 9.24 наведено схему включення лічильника, а також часову форму імпульсу напруги на конденсаторі  $U_C(t)$ .

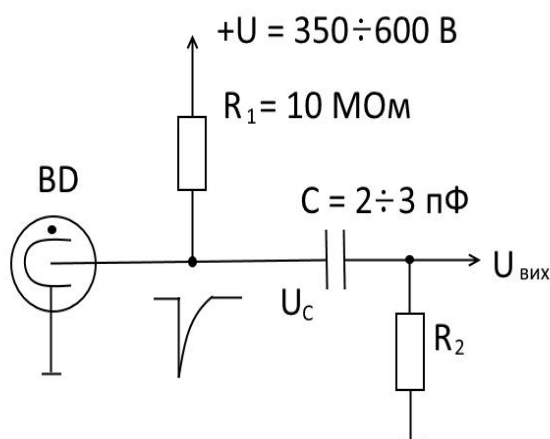


Рис. 3.24. Схема включення лічильника Гейгера

Іонізуюча частинка, яка попадає в детектор викликає первинну іонізацію атомів інертного газу, в результаті якої утворюються вільні електрони і додатні іони (катіони). Електрони прискорюють високовольтним електричним полем, прикладеним між анодом і катодом, і вони набувають енергії  $W=eU$  достатньої для вторинної іонізації молекул газу. У лічильнику відбувається лавинний розряд, тобто виникає явище електричного пробою і він стає провідником струму. Для того щоб понизити напругу між анодом і катодом  $U_A=U-iR_1$  і надійно погасити розряд та повернути лічильник у вихідний стан в якому він здатен зареєструвати наступну частинку, застосовують високоомний резистор  $R_1=10-15$  МОм.

Розрізняють лічильники із самогасінням і без самогасіння. Останні заповнені чистим інертним газом, наприклад Ar і їх чутливість відновлюється тільки протягом  $\sim 10^{-2}$  с, тому застосовують лічильники іншого типу, які окрім аргону містять домішки багатоатомних газів завдяки яким відбувається самовільне гасіння розряду за час  $\sim 10^{-4}$  с.

### 3.4.5. Шумове забруднення

Звук представляє собою механічні деформації, які розповсюджуються в пружному середовищі. Звукові, або акустичні, хвилі викликають слухові відчуття якщо їх частота знаходиться у межах від 16 Гц до 20 кГц. Коливання частотою нижче 16 Гц називають інфразвуком, вище 20 кГц – ультразвуком. Швидкість поширення звукових хвиль в атмосфері залежить від температури, тиску, вологості і для  $t=20^{\circ}\text{C}$  може бути прийнята  $\sim 340$  м/с.

Шум можна визначити як хаотичну суміш звуків різної частоти і інтенсивності. Основними фізичними характеристиками звуку, окрім вищезазначених, є звуковий тиск  $P$  (Па), інтенсивність звуку  $I$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ). Мінімальну усереднену інтенсивність звуку  $I_0$ , яку сприймає вухо людини називають пороговою інтенсивністю. Цей умовний поріг, визначений на частоті стандартного тону 1000 Гц, складає  $I_0=10^{-12}$   $\text{Вт}/\text{м}^2$ , а відповідний йому звуковий тиск  $P_0=2 \cdot 10^{-5}$  Па. Максимальна інтенсивність звуку, яку називають порогом болісного відчуття рівна  $10^2$   $\text{Вт}/\text{м}^2$ , а відповідний їй звуковий тиск  $P=2 \cdot 10^2$  Па. Для оцінки шуму застосовують логарифмічні одиниці, а саме рівень інтенсивності звуку (шуму)  $L=10\lg I/I_0$ , децибел (дБ); рівень звукового тиску  $L_P=20\lg P/P_0$ , (дБ). Отже, порогу болісного відчуття відповідає рівень інтенсивності шуму  $L_{max}=10\lg 10^2/10^{-12}=140$  дБ.

Для вимірювання рівня інтенсивності шуму застосовують шумоміри, які в найпростішому варіанті представляють собою мікрофон і вольтметр, проградуєований в децибелах. Вимірювання шуму регламентують діючими стандартами і виконують сертифікованими приладами. Процес вимірювання здійснюють з урахуванням особливостей сприйняття різних звукових частот вухом людини тому, в складі шумомірів є коригуючі електричні фільтри.

В акустотехніці застосовують мікрофони різних типів. На схемі рис. 9.25 наведено умовні графічні позначення таких мікрофонів: ВМ2 – вугільний мікрофон, ВМ3 – електродинамічний, ВМ4 – конденсаторний, ВМ5 – електромагнітний, ВМ6 – конденсаторний стереофонічний, ВМ7–ларингофон, ВМ8 – п'єзоелектричний.



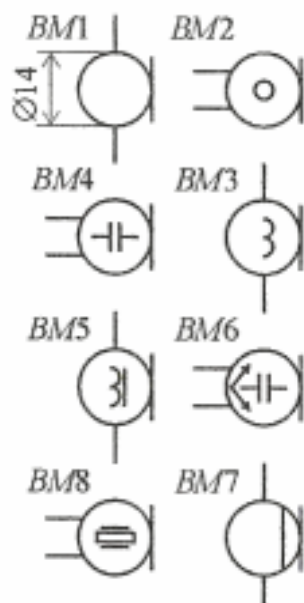


Рис. 3.25. Умовні графічні позначення мікрофонів різних типів

Вугільні мікрофони використовують властивість вугільного порошку змінювати електроопір у залежності від тиску мембрани, яка коливається під дією звукової хвилі. У наш час їх застосовують нечасто.

Електродинамічні і електромагнітні мікрофони функціонують згідно закону електромагнітної індукції і відрізняються тільки конструктивним виконанням магнітної системи. Легка рухома котушка, прикріплена до мембрани, під дією звукового тиску коливається в полі постійного магніту. ЕРС котушки залежить як від амплітуди, так і від частоти коливань мембрани.

В конденсаторних мікрофонах використовують залежність ємності конденсатора від переміщення рухомої обкладинки відносно нерухомої. Різновидністю конденсаторних є електретні мікрофони, в яких використовують властивість деяких діелектриків тривалий час зберігати поляризований стан і створювати квазіпостійне електричне поле.

В п'єзоелектричних мікрофонах електричний сигнал виникає при деформації кристалів напівпровідника-п'єзоелектрика під дією звукового тиску.

### 3.4.6. Оцінка аерозольного забруднення

Аерозолями називають дисперсні системи, які складаються з газоподібного середовища та завислих у ньому різних за розмірами та агрегатним станом частинок, а саме твердих частинок пилу та диму, рідких частинок туману з розмірами від  $10^{-2}$  до  $10^2$  мкм. Серед одиниць вимірювання концентрації цих частинок у повітрі, які в англійській

літературі позначаються літерами *PM* (*particulate matter*), найчастіше застосовують  $\text{мг/м}^3$  або  $\text{мкг/м}^3$ .

Аерозольні частинки самі по собі і, особливо в комбінації з іншими забруднювачами повітря, адсорбованих ними, являють серйозну загрозу для здоров'я людини. Найбільшу небезпеку представляють дрібнодисперсні аерозолі діаметром менше 2,5 мкм ( $\text{PM}_{2,5}$ ) в складі яких є і ультрадисперсні частинки діаметром менше 0,1 мкм. Вони можуть знаходитись в атмосферному повітрі протягом багатьох днів і тижнів та переноситись на значні відстані. Такі аерозолі осідають не тільки в легенях людини, але й попадають у кровотік і наносять системну шкоду організму. Виходячи з рекомендацій Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) усереднена протягом року добова ГДК аерозолів  $\text{PM}_{10}$  складає  $40 \text{ мкг/м}^3$ , а  $\text{PM}_{2,5}$  –  $10 \text{ мкг/м}^3$ . Для зниження ризиків створюються системи екологічного моніторингу, зокрема, глобальна онлайн система оцінки якості повітря *Air Quality Index*, в якій провідним забруднювачем серед багатьох інших за якими ведеться спостереження, фігурує саме  $\text{PM}_{2,5}$ .

Джерела аерозолів поділяють на природні і антропогенні до яких відносять процеси спалювання органічного палива (вугілля, деревини, нафти та ін.), двигуни внутрішнього згорання, будівництво, промислове виробництво, ерозія дорожнього покриття та багато інших.

Для вимірювання концентрації застосовують різноманітні методи, одні з яких використовують попереднє осадження аерозолів (наприклад пил збирають на фільтрі, а потім зважують). В приладах без осадження використовують, в основному, електричні і оптичні методи вимірювання параметрів пилу. До електричних методів відносять індукційний, контактний-електричний, ємнісний та п'єзоелектричний. Зокрема, в ємнісному методі інформаційним сигналом є зміна ємності конденсатора між обкладинки якого надходить аналізоване повітря.

Оптичні методи базують на ефектах поглинання (закон Ламберта-Бугера) і розсіяння оптичного випромінювання. При вимірюванні вмісту частинок фракції  $\text{PM}_{2,5}$  застосовують прилади, в яких проводиться фотометрія розсіяного світла (такі прилади називають нефелометрами). Розподіл частинок за фракціями можна дослідити на оптичному лазерному спектрометрі. Як джерела випромінювання використовують лазерні діоди, а у нефелометрах, найчастіше, інфрачервоні світлодіоди. Випромінювання направляють у вимірювальну камеру, де відбувається розсіяння світла на аерозольних частинках, які знаходяться на шляху променю. Реєстрацію розсіяного світлового випромінювання здійснює фотоприймач, наприклад, фотодіод, розташований під кутом  $90^\circ$  по відношенню до світлодіоду. Інтенсивність і кількість світлових імпульсів, які реєструє фотоприймач пропорційна розміру частинок і їх

кількості відповідно. Як правило, в таких приладах здійснюють прокачування аналізованої проби вбудованими вакуумними насосами.

### **3.5. Запитання для контролю знань**

1. Шкала електромагнітних хвиль
2. Дія неіонізуючих випромінювань на організм людини.
3. Методи вимірювання напруженості електростатичного поля та напруженості змінного електричного поля.
4. Магнітна індукція та магнітний потік. Електромагнітна сила. Закон електромагнітної індукції.
5. Датчики постійного магнітного поля.
6. Вимірювання напруженості змінного магнітного поля.
7. Визначити довжину хвилі електромагнітного випромінювання частотою 1 ГГц.
8. Основні фотометричні одиниці.
9. Джерела та приймачі оптичного випромінювання.
10. Визначити температуру тіла, максимум випромінювання якого припадає на довжину хвилі 2,9 мкм.
11. Різновидності, характеристики та біологічна дія іонізуючих випромінювань.
12. Основні дозиметричні одиниці.
13. Обчислити початкову кількість радіоактивного ізотопу йоду  $^{131}\text{I}$ , який має період напіврозпаду 8 діб, якщо через вісім тижнів його кількість складає 1 кг.
14. Схема включення лічильника Гейгера-Мюллера.
15. Рівень інтенсивності шуму автомобіля і радіоприймача складає, відповідно 80 та 40 дБ. Визначити їх відношення інтенсивностей шуму.
16. Будова і принципи дії мікрофонів різних типів.
17. Класифікація і вплив на організм людини аерозольного забруднення повітря.
18. Методи контролю аерозольного забруднення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жигуц Ю.Ю., Цигика В.В. Інженерна екологія (для студентів технічних спеціальностей). Видання 3-є, випр. і доп. – Ужгород: ПП «Інвазор», 2020. – 204 с.
2. Юинг Г. Инструментальные методы химического анализа. – М.: Мир, 1989. – 608 с.
3. Сухарєв С. М., Чундак С. Ю., Сухарєва О. Ю. Техноекологія та охорона навколишнього середовища. – Львів: «Новий світ», 2004. – 256 с.
4. Посудін Ю.І. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища. – К.: Світ, 2003. – 288с.
5. Мазур Н.И., Молдаванов О.И. Курс инженерной экологии. – М.: «Высшая школа», 1995. - 447 с.
6. Физическая энциклопедия. Справочное издание в 5 томах. – М.: Советская энциклопедия, 1988.
7. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
8. Храмов А.В. Первинні вимірювальні перетворювачі вимірювальних приладів і автоматичних систем. – К.: Вища школа, 1998. – 527 с.
9. Желібо Є.П., Заверуха Н.М., Зацарний В.В. Безпека життєдіяльності. – К.: «Каравелла», 2002. – 327 с.
10. <https://www.com/datasheets/MQ-135.pdf>.