

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Декан фКІТАЕР

(підпис)

Тарасюк В.П.

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри електронної техніки

(підпис)

Вовна О.В.

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018 р.

Випускна кваліфікаційна робота

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка електронного пристрою контролю концентрації іонів хрому
в стічних водах промислових підприємств»

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕлС-14

(шифр групи)

напрямку підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи»

(шифр і назва напрямку підготовки)

спеціальності Електронні системи

(шифр і назва спеціальності)

Сіденко Сергій Андрійович

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник професор кафедри ЕТ, д.т.н., проф.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

А.А. Зорі

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

*Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.*

Студент _____

(підпис)

Покровськ – 2018 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки

(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____

(дата)

з оцінкою _____

Секретар ДЕК _____

(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота

бакалавра

Тема: «Розробка електронного пристрою контролю концентрації іонів хрому в
стічних водах промислових підприємств»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент

гр. ЕлС – 14

_____ Сіденко С.А.

(підпис, дата, П.І.П)

Керівник

_____ проф. Зорі А.А.

(підпис, дата, П.І.П)

Консультанти:

_____ проф. Вовна О.В.

(підпис, дата, П.І.П)

_____ проф. Зорі А.А.

(підпис, дата, П.І.П)

_____ доц. Лактіонов І.С.

(підпис, дата, П.І.П)

_____ ст. викл. Тюрін Є.А.

(підпис, дата, П.І.П)

Нормоконтроль

_____ проф. Вовна О.В.

(підпис, дата, П.І.П)

Покровськ – 2018

**Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"**

Інститут, факультет Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра Електронна техніка

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Напрямок підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи»

(шифр і назва)

Спеціальність Електронні системи

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електронної техніки

Вовна О.В.

« » 2018 року

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Сіденко Сергій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка електронного пристрою контролю концентрації іонів хрому в стічних водах промислових підприємств

керівник проекту (роботи) Зорі Анатолій Анатолійович, д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від . .201 року №

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

Технічна документація та матеріали з переддипломної практики

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз та характеристика об'єкту; обґрунтування та розробка структурної схеми електронного пристрою; розробка принципової схеми електронного пристрою; оцінка метрологічних характеристик; синтез мікропроцесорної частини електронного пристрою; розробка конструкції та зовнішнього вигляду електронного пристрою.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	проф. каф. ЕТ, д.т.н., проф., Зорі А.А.		
2	проф. каф. ЕТ, д.т.н., проф., Зорі А.А.		
А	проф. каф. ЕТ, д.т.н., проф., Зорі А.А.		
3.1	доц. каф. ЕТ, к.т.н., Лактіонов І.С.		
3.2	зав. каф. ЕТ, д.т.н., доц., Вовна О.В.		
Б	ст. викл. каф. ОП, Тюрін Є.А.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз характеристик і параметрів вимірювальних пристроїв концентрацій домішок у воді		
2	Технічне завдання на розробку електронного пристрою контролю концентрації іонів хрому		
3	Розробка структурної схем вимірювального пристрою концентрації іонів хрому		
4	Розробка принципової схеми вимірювального пристрою концентрації іонів хрому		
5	Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві		

Студент

_____ (підпис)

Сіденко С.А.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Зорі А.А.

_____ (прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада П.І.Б.	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Сіденко, С.А. Розробка електронного пристрою контролю концентрації іонів хрому в стічних водах промислових підприємств / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за напрямом підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи» спеціальності «Електронні системи». – ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2018.

Пояснювальна записка: 68 стор., 13 рис., 3 табл., 27 посилань.

Виконаний аналіз технологічних показників води у стічних водах промислових підприємств. Наведено аналітичний огляд методів вимірювання концентрації домішок у воді, проаналізовані їх переваги та недоліки. Вибрано для контролю концентрації іонів хрому в стічних водах потенціометричний метод з використання іоноселективний електродів, як найбільш перспективний і точний метод.

Виконано розробку структурної схеми вимірювального пристрою концентрації іонів хрому в стічних водах промислових підприємств. На базі розробленої структурної схеми проведено проектування аналогової частини вимірювального пристрою. Розраховано вимірювальний канал концентрації іонів хрому, а також розроблено та обґрунтовано вимоги до каналу вимірювання температури, який потрібен для підвищення показників точності вимірювання концентрації активних іонів.

Ключові слова: електронний пристрій, вимірювання, концентрація, іон, хром, стічні води, іоноселективний електрод, температура.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ КОНЦЕНТРАЦІЙ ДОМІШОК У ВОДІ.....	10
1.1 Аналіз технологічних показників води у стічних водах промислових підприємств.....	10
1.2 Аналіз методів визначення гідрохімічного складу води.....	14
1.2.1 Потенціометричні методи.....	17
1.2.2 Оптичні методи.....	20
1.2.3 Іоноселективні електроди. Методи іонометрії.....	22
1.3 Типи іоноселективних електродів.....	26
1.4 Постановка задачі на проектування вимірювального пристрою.....	30
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНІВ ХРОМУ.....	31
3 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНІВ ХРОМУ.....	34
3.1 Розрахунок метрологічних характеристик вимірювального каналу....	34
3.2 Розробка принципів схем та розрахунок складових частин вимірювального пристрою.....	37
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54
ДОДАТОК А – Технічне завдання на розробку електронного пристрою контролю концентрації іонів хрому.....	57
ДОДАТОК Б – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві.....	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	– аналого-цифровий перетворювач;
ГПК	– гранично-припустима концентрація;
ЕРС	– електрорушійна сила;
ІСЕ	– іоноселективний електрод;
ПВП	– первинний вимірювальний перетворювач;
ЕМП	– електрометричний підсилювач,
ДП	– диференційний підсилювач;
НП	– нормуючий підсилювач;
МАС	– мультиплексор аналогових сигналів;
МПС	– мікропроцесорна система;
ЦІ	– цифрова індикація;
ЦКЗ	– цифровий канал зв'язку;
ПК	– персональний комп'ютер.

ВСТУП

У всьому світі ведуться роботи за визначенням найбільш значущіших забруднюючих факторів і створенням високоякісних засобів для вимірювання їх концентрації у водному середовищі, а також по встановленню гранично-припустимих концентрацій (ГПК) на відповідні речовини. Відомі засоби визначають приблизно 1500 забруднюючих речовин, а ГПК існують практично на половину з них [1]. У різних країнах загальне число і склад показників, які включені до списку найважливіших забруднюючих речовин, істотно розрізняються, оскільки їх вибір обґрунтований не чисто науковими міркуваннями, а традиціями, що склалися, економічними, технічними та іншими показниками. Показниками якості води прийняті [1 – 4]: температура, рН, електропровідність, вміст розчиненого кисню, хлоридів, зважених речовин, органічного вуглецю, загальної щільності.

Для ефективного вивчення та аналізу стану навколишнього середовища, ухвалення відповідних рішень щодо її поліпшення необхідна адекватна інформація, що пов'язане з величезним числом вимірів різних параметрів, які здійснюються за допомогою автоматичних, постійно діючих аналізаторів [1]. Водне середовище – швидкозмінний динамічний об'єкт, контроль за станом якого неавтоматичними методами ускладнений і економічно не вигідний. Під час проведення аналізів більше (3 – 4) разів на добу економічно доцільно використовувати автоматизовані системи для контролю стану навколишнього середовища. У цих системах вартість інформації в (2 – 6) разів менше, ніж при використуванні лабораторних методів [1].

Досягнуті в існуючих вимірювальних комплексах і системах показники точності вимірювання як гідрофізичних, так і гідрохімічних параметрів водних середовищ, у переважачій більшості випадків, відповідають показникам точності робочих засобів вимірювання. Універсальне використання вимірювальних комплексів і систем для вирішення наукових задач у області гідрофізики (гідрохімії, гідробіології) та екології вимагає вищої точності за

рядом параметрів (електропровідність, температура, концентрація та ін.). У свою чергу особливістю екологічних досліджень є вимірювання мікроконцентрацій високотоксичних компонент (ціаніди, феноли і т.п.).

Для визначення хімічних речовин у природних водах, застосовуються:

- спеціальні прилади;
- тест - прилади;
- порівняльно прості напівкількісні методи, засновані на реєстрації зміни кольору розчину під час додавання відповідних реактивів.

На даному етапі розвитку найперспективнішими методами визначення складу води є йоноселективні методи – вони мають достатню для більшості випадків точність і швидкодію та відносно невисоку вартість.

1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ КОНЦЕНТРАЦІЙ ДОМІШОК У ВОДІ

1.1 Аналіз технологічних показників води у стічних водах промислових підприємств

Після вузла механічного очищення стічної води на промисловому підприємстві концентрація домішок знижується до (50 – 70) мг/л, що перевищує величину (25 мг/л) [5, 6], під час вмісту якої ці води можуть подаватися до споруди біологічного очищення, тому в схемах передбачено фізико-хімічне очищення. Для нього, відповідно до галузевих норм, застосовують напірну флотацію із коагуляцією [7, 8]. Напірні установки флотацій працюють із 50%-й рециркуляцією очищеного потоку. Як коагулянт зазвичай використовують сульфат алюмінію: 50 мг/л для стічних вод першої системи і (50 – 100) мг/л для другої [5]. Останнім часом на деяких заводах розпочинають застосовувати поліелектроліти, зокрема поліакриламід, –(1 – 1,5) мг/л.

Після фізико-хімічного очищення стічних вод першої каналізаційної системи залишковий вміст нафтопродуктов складає близько 25 мг/л; БПК₅, цих вод знаходиться в межах (60–150) мгО₂/л, ХПК – (150–400) мг О₂/л [5, 9]. Раніше ці води подавали на доповнення оборотної води, що призводило до біологічного обростання систем зворотного водопостачання, однією з причин якого була біологічна нестійкість очищеної води. Крім того, в початкових водах першої каналізаційної системи деяких заводів вміст сульфідів значно перевищував гранично-припустиму концентрації (20 мг/л), тому схему доповнили біохімічним очищенням. У стічних водах другої каналізаційної системи після флотації зміст нафтопродуктов знижується до (20–30) мг/л, БПК₅ цих вод в середньому складає 160 мгО₂/л ХПК – 400 мгО₂/л [5, 9].

Біохімічне очищення стічних вод першої каналізаційної системи здійснюють в одноступінчатих аеротенках, потім суміш мула розділяють у

вторинних відстійниках. Тривалість аерації в аеротенку рекомендується приймати 6 годин під час дози мула (2–4) гр./л [5, 9]. Циркуляційний мул, витрата якого складає 50 % від витрати стічних вод, направляють до регенератора, що займає 30 % об'єму аеротенка. Вторинний відстійник розраховують на 3-годинне відстоювання суміші мула. Як показують обстеження очисних споруд промислового підприємства, після біохімічного очищення БПК₅ знижується на (70–75) %; концентрація нафтопродуктів зменшується до 10 мг/л, концентрація зважених речовин – до 25 мг/л; рН складає від 7 до 8,5.

Для забезпечення якості очищеного стоку, потрібного для поповнення оборотних систем, біохімічно очищені стоки першої каналізаційної системи, відповідно до галузевих норм ВНТП 25–79, повинні піддаватися фільтрації на зернистих фільтрах. У цьому випадку якість підготовленої води буде такою:

БПК, мг, O ₂ /л	від 2 до 3;
Вміст, мг /л	
– нафтопродуктів	від 2 до 3;
– зважених речовини,	до 6;
– сульфатів	500;
– хлоридів	300;
– розчинного кисню	1,5;
рН	від 7 до 8,5.

Стічні води другої каналізаційної системи проходять біохімічне очищення як окремо, так і в суміші зі побутовими стічними водами заводського селища, що пройшли механічне очищення. Біохімічне очищення здійснюють по одноступінчатій та двоступінчатій схемах. При двоступінчатій схемі допускається подача стічних вод із вищим вмістом сульфідів і вищим БПК. Розрахункова тривалість аерації в аеротенках при одноступінчатій аерації повинна складати 6 годин, і подальше відстоювання суміші мула повинне продовжуватися протягом 3 г [10, 11]. Під час двоступінчатого очищення тривалість аерації в кожному ступені має бути відповідно 3,5 до 8 годин, а

тривалість відстоювання, у вторинному й третинному відстійниках – 1,5 та 3 годин [10, 11].

Зростаючі вимоги до якості стічних вод, що скидаються в рибогосподарські водоймища, диктують необхідність додаткового очищення біохімічно очищених стічних вод. Найбільшого поширення набули біологічні ставки, що розраховуються на тривалість перебування в них води від декількох діб до року. На деяких промислових підприємствах перед подачею води в ставки передбачають двоступінчасту схему доочистки: мікрофільтр – піщаний фільтр. Мікрофільтр використовується для виділення, що виносяться із відстійників біохімічного очищення пластівців активного мула, які потрапляють до піщаного фільтра, що скорочують фільтроцикл. Після біологічних (буферних) ставків очищені води скидають до водоймища. Концентрація контрольованих забруднень у водах, що випускаються, змінюється у значних межах: від 2 до 15 мг/л [5, 6].

Схема споруд очищення стічних вод на промислових підприємствах, хоча і забезпечує необхідний ступінь очищення, проте, як показують результати експлуатації, наладки й досліджень, має істотні недоліки, які ускладнюють експлуатацію, здорожують будівництво та є причиною забруднення навколишнього середовища.

Основний недолік очисних станцій промислових підприємств – це великі обсяги споруд, що обумовлює значну відкриту поверхню води. Інший недолік експлуатованих схем очисних споруд промислових підприємств полягає у відсутності пристроїв для вимірювання витрат стічних вод і опадів, що значно ускладнює підтримку найбільш оптимального режиму устаткування очисних споруд. Враховуючи, що промислові підприємства є крупними об'єктами водоспоживання та одночасно скидають великий обсяг стічних вод до міських або районних систем каналізації, можна сказати, що перспективним напрямом вдосконалення систем очищення стічних вод є розробка так званих безстічних систем водопостачання та каналізації. Визначальними умовами, що забезпечують роботу промислового підприємства без скидання стічних вод у

водоймище, є максимальне скорочення кількості стічних вод, що утворюються, їх розділення залежно від специфіки забруднень і локальне очищення, а також глибока доочистка і повторне їх використання. Усереднений склад стічних вод промислових підприємства, згрупованих в дві системи каналізації, приведений в таблиці 1.1 [5, 11].

Таблиця 1.1 – Характеристика стічних вод промислового підприємства, що пройшли механічне та фізико-хімічне очищення

Характеристика	За нормами ВІТП 25 – 79		Показники за нормами пром. підприємства	
	I система	II система	I система	II система
ХПК, мг/л	170–400	400–600	200–550	130–450
БПК повн, мг/л	100–250	200–300	90–310	90–270
Зміст, мг/л нафтопродуктів	25	25	15–50	15–45
деемульгатора	20–100	20–100	5–20	60–120
механічних домішок	40–60	40–60	30–100	30–150
солей (загальне)	700–2000	5000–6000	500–1200	2000–7000
амонійного азоту	25–30	20–30	15–50	10–15
фенолів	5–9	2–3–	3–10	1–8
pH	7–8,5	7–8,5	7–8,5	7–8,5

Стічні води другої системи каналізації містять значно більше солей ніж стоки першої системи, і не можуть використовуватися для підживлення оборотних систем навіть після біохімічного очищення, не дивлячись на те, що за останніх 10 років забрудненість стоків другої системи солями знизилася в (5–10) разів.

1.2 Аналіз методів визначення гідрохімічного складу води

Протягом довгого часу можливості аналітичного контролю параметрів води обмежувалися недостатньою чутливістю хімічних методів аналізу [1]. Розвиток інструментальних фізико-хімічних методів дозволив значно розширити можливості аналітичної хімії вод. У теперішній час методи і технічні засоби вимірювання, що є єдине ціле, забезпечують контроль пріоритетного переліку показників якості вод. Розвиток інструментальних методів, що разом з тим йде швидкими темпами, відкриває нові можливості, що дозволяють вирішувати нові задачі контролю забруднення водних об'єктів.

Інструментальні фізико-хімічні методи аналізу в більшості своїй реалізуються в лабораторних умовах і деколи вимагають значних витрат часу на їх проведення. Так до теперішнього часу найпоширенішими методами визначення важких металів у водах є фотометричний і спектрографія. Межі виявлення цих методів не дозволяють проводити пряме визначення в стічних водах, тому вживані методики передбачають попередню концентрацію. Низька селективність багатьох з цих методик вимагає включати додаткові операції для усунення впливу компонентів стічних вод, що заважає. Це призводить до їх істотного ускладнення й зниження надійності результатів. Прикладом є широко вживані дитизонні методи визначення Cu, Pb, Cd і Hg, які зазвичай присутні у водах спільно і, як відомо, реагують з дитизоном практично за одних і тих же умов.

Головна перевага емісійного спектрального аналізу полягає у можливості одночасного визначення великого числа елементів. Методика, яка використовується в лабораторіях, передбачає попередню концентрацію металів екстракцією хлороформом у вигляді комплексів з діетілдітіокарбонатом і 8-оксихиноліном. Цим методом можуть визначатися Fe, Al, Mn, Cu, Ni, Co, Sn, Ti, Bi, Mo, V, Pb і Ag. Вплив, що заважає, роблять значні кількості заліза, яке може бути відокремлене екстракцією сірчанам ефіром після випаровування проб [1–3].

Атомно-абсорбційний аналіз отримав розповсюдження в аналітичній гідрохімії. Цей аналіз з легко-ацетиленовим полум'ям дозволяє виконувати експрес аналіз великого числа металів, але високі межі виявлення методу вимушують застосовувати попередню концентрацію. Для цих цілей зазвичай використовують екстракцію хлороформом, але пряме введення хлороформного екстракту в полум'я істотно впливає на стабільність його горіння. Цей недолік усувається, якщо використовується метод концентрації, який заснований на екстракції метілізобутілкетонем комплексів металів з діетіл- і пірролідіндітіокарбонатом.

Визначення нафти і нафтопродуктів у водах є однією з найважчих проблем аналітичної гідрохімії. Схема аналізу включає групу методів, які застосовуються для визначення окремих компонентів нафтопродуктів і широкої різноманітності їх хімічних з'єднань в умовах свіжого і хронічного забруднення. Основою цієї схеми є тонкошарове хроматографічне розділення (тонкий шар оксиду алюмінію як сорбент, гексан – чотирьоххлористий вуглець – оцтова кислота як рухома фаза), при якому різні нафтопродукти утворюють три хроматографічні зони, що ідентифікуються як вуглеводні, смоли і асфальтени. Попереднє розділення нафтопродуктів здійснюється екстракцією чотирьоххлористим вуглецем, летючі вуглеводні відділяються дистиляцією їх з розчинником в замкнутій системі перед хроматографічним розділенням. Їх подальше визначення проводиться ІЧ-спектро-фотометричними методом ($\nu = 2926 \text{ см}^{-1}$). Для визначення смолянистих компонентів нафти використовується їх здібність до люмінесценції під впливом УФ - випромінювання ($\lambda_{\text{люм}}$ від 530 до 550 нм), що встановлене в основу критеріїв ідентифікації нафтових і біогенних нафтопродуктів [13].

Більшість визначень пестицидів проводиться газохроматографічним методом. Використовуються традиційні в світовій аналітичній практиці методи пробовідбору та пробопідготовки. Основним методом відділення пестицидів є рідинна екстракція гексаном. Вона супроводжується очищенням екстрактів колоночної хроматографією та обробкою реагентами. Концентрування

здійснюється випаровуванням розчинника в апараті Кудерна-Деніша або ротаційному випарнику. Газохроматографічне розділення проводиться в набивних колонках.

Оптимальним методом отримання інформації про загальний зміст фенолів є фотометрія екстракції. Екстракція фенолів здійснюється сумішшю п-бутилацетат – трібутилфосфат (3:1). Додавання трібутилфосфата дозволяє набути високі значення чинника витягання при одноразовій екстракції. Після реекстракції феноли визначаються фотометрично 4-антипірином при $\lambda = 490$ нм.

Проведення якісного та кількісного визначення індивідуальних органічних забруднюючих речовин досягається газохроматографічними і хроматомасс-спектрометричними методами. Широке застосування знаходять два засоби підготовки проби до стану, придатного для введення в хроматограф – газова і рідинна екстракція. Інші засоби пробопідготовки – сорбційна концентрація, виморожування, відгонка з парою, зворотний осмос і інші поки мають менше розповсюдження. Вони використовуються переважно в дослідницьких цілях. Кількісне визначення у водах органічних забруднюючих речовин достатньо надійно здійснюється за допомогою газових хроматографів, оснащених 3 – 4 типами детекторів, зокрема селективних. Зберігається проблема якісної ідентифікації визначуваних з'єднань, яка може бути вирішена тільки, якщо хроматографічний детектор застосовується мас-спектрометр.

Оперативні методи і засоби, які розроблені для контролю в польових умовах і пересувних лабораторіях, дозволяють визначати як основні характеристики й узагальнені показники, так і проводити напівкількісне визначення основних забруднюючих речовин в автоматичному режимі функціонування. Під час виявлення аварійного забруднення водних об'єктів кількісні параметри забруднення встановлюються інструментальними фізико-хімічними методами аналізу в лабораторних умовах (пересувними гідрохімічними лабораторіям). Далі розглядаються методи аналізу, що реалізуються цими засобами.

1.2.1 Потенціометричні методи

Потенціометрія є вимірювання напруги холостого ходу гальванічних елементів. Ці елементи складаються з двох різних електродів, які занурено в електроліт: вимірювального, потенціал якого пропорційний концентрації іонів у розчині, та електроду порівняння, що має малий і мало змінний власний потенціал. Основними областями застосування потенціометрії є вимірювання активності або концентрацій іонів зі застосуванням іоночутливих електродів і вимірювання окислювально-відновних потенціалів. Вимірювання водневого показника рН є особливим випадком застосування іоночутливих електродів.

Під час вимірювання активності водневих іонів як вимірювальні електроди застосовуються: водневі, хінгідронні, металооксидні та скляні електроди. Функціональні можливості перших трьох типів обмежені та вони використовуються значно менше ніж скляні, але водневі електроди вважаються найточнішими. Потенціал водневого електроду визначається рівнянням Нернста і складає [14]:

$$\varphi_H = \varphi_{OH} + \alpha \cdot \lg(H^+),$$

де $\alpha = 1,98 \cdot 10^{-4} T$; φ_{OH} – нормальний потенціал електроду, що умовно вважається нульовим; T – температура за шкалою Кельвіна.

Потенціали електродів інших конструкцій мають подібний математичний опис.

Полярографічний метод. Під час проходження через розчин електричного струму має місце явище електролізу, тобто процес хімічних перетворень у розчині з виділенням з нього речовини [15]. Внаслідок електролізу концентрація іонів поблизу електродів виявляється відмінною від їх концентрації в решті частини розчину, що призводить до зміни електродного потенціалу, тобто до поляризації. Відновлення кожної конкретної речовини

відбувається під час дії деякої цілком певної різниці потенціалів між джерелом електронів (катодом) і розчином. Ця різниця одержала назву потенціалу відновлення. Під час відновлення збільшується витрата електронів з катода і змінюється струм у зовнішньому колі. Ця зміна залежить від швидкості надходження відновлюваної речовини до катода. За відсутності руху електроліту швидкість надходження обумовлена дифузією та прямо пропорційна концентрації речовини в розчині. Через деякий час від початку процесу встановлюється динамічна рівновага між витратою електронів і дифузією, під час дії цього струму в колі катода досягає граничного значення (граничного дифузійного струму відновлення). Якщо в розчині знаходяться різні речовини, що характеризуються різними значеннями потенціалів відновлення, то вольт-амперна характеристика перетворення має вигляд кривої (див. рис. 1.1), що одержала назву полярографічної хвилі [1, 15]. Потенціал кожної «сходінки» в хвилі характеризує вид відновлюваної речовини, а ширина сходінки – концентрацію цієї речовини в розчині.

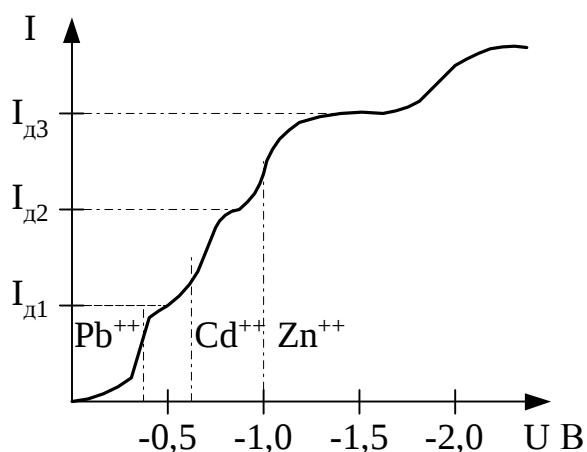


Рисунок 1.1 – Полярографічна «хвиля»

У реальних складних розчинах має місце взаємний вплив процесів відновлення один на інший, що виявляється в зсуві потенціалів відновлення та зміні граничних дифузійних струмів. Це створює певні труднощі під час використання полярографічного методу для гідрохімічного аналізу вод. Цей

метод знайшов застосування для вимірювання концентрації розчиненого у воді кисню у зв'язку з тим, що потенціал відновлення кисню мало мінливий і слабо залежить від складу електроліту, що тестується [1]. До того ж завершальним продуктом відновлення у водних розчинах є іони гідроксилу, що легко видаляються з металевого катода.

Окрім полярографічного методу знайшли застосування гальванічний метод і метод заснований на ефекті ядерно-магнітного резонансу. Під час реалізації гальванічного методу необхідна різниця потенціалів задається не зовнішнім джерелом, а гальванічною парою, утвореною електродами завдяки вибору матеріалів їх виготовлення.

Ідея методу заснованого на ефекті ядерно-магнітного резонансу полягає в обробці зразка водного розчину одночасно постійним і змінним магнітними полями. Розчинений у воді кисень має парамагнітні властивості. У постійному магнітному полі спостерігається слабе намагнічення такого водного розчину. У змінному магнітному полі відбувається розмагнічування розчину, яке супроводжується поглинанням енергії поля. Час релаксації намагніченості залежить від концентрації парамагнітних компонент розчину і може бути використано для визначення концентрації розчиненого у воді кисню.

Процес розвитку потенціометрії привів до створення мембранних електродів нового типу, принципово аналогічних газовим рН-электродам, але відмінних від них за складом і структурою мембрани. У теперішній час за допомогою іоноселективних електродів різної конструктивної форми визначаються іони Ag^+ , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , F^- , Cl^- , Br^- , I^- , NH_4^+ , CN^- , CNS^- і багато інших [1, 14, 16]. Зі залученням допоміжних хімічних реакцій число видів іонів може бути значно розширене. Реакції можуть протікати безпосередньо на поверхні мембрани або в пробі, до якої додані відповідні реактиви.

Вимірювальні електроди називають іоноселективними або виборчими до іонів. Це вірно лише частково, оскільки вони мають «перехресну чутливість» і до інших певних іонів. Ступінь спотворення результату вимірювань оцінюється

по доповненому рівнянню Нернста. Вимірювальний електрод для іона та занурений в розчин, що містить іони i і j має наступний потенціал [1]:

$$\varepsilon_M = \varepsilon_0 \pm \left(\frac{R \cdot T}{n \cdot F} \right) \cdot \log(a_i + k_{ij} \cdot a_j).$$

Іонна селективність у цьому випадку має місце тільки тоді, коли константа селективності k_{ij} дорівнює нулю. З цієї причини електроди правильніше було б називати іоночутливими. Досяжний ступінь селективності слід визначати у кожному конкретному випадку. Дані щодо використання діапазонів вимірювання є в інформаційних листках виробника електродів і в оглядових роботах.

1.2.2 Оптичні методи

Процес поглинання електромагнітного випромінювання аналізованою речовиною описується законом Ламберта – Бєєра. Цей закон встановлений в основу роботи оптичних детекторів газів і рідин, які залежно від довжини поглинального електромагнітного випромінювання підрозділяються на ультрафіолетові (УФ), видимі та інфрачервоні (ІЧ) [3, 4].

Детектори, що засновані на поглинанні ультрафіолетового випромінювання. Для генерації електромагнітного випромінювання в УФ області спектру в детекторах ультрафіолетового поглинання застосовують ртутні, водневі або вольфрамові лампи. Вимірювання інтенсивності електромагнітного випромінювання, що пройшло через кювету з аналізованою речовиною, здійснюється за допомогою фотоприймачів різної конструкції та принципу дії. Оскільки різні речовини мають різну поглинаючу здатність до УФ випромінюванню, в схемах зазвичай використовують монохроматори, що виділяють ту довжину хвилі, на якій найсильніше виявляється поглинаюча здатність аналізованої речовини.

Детектори, що засновані на поглинанні випромінювання у видимій частині електромагнітного спектру. Як джерела світла в цих детекторах використовуються лампи накаливання, а приймачі випромінювання – фоторезистори й фотодіоди. Аналізована речовина прозора у видимій частині електромагнітного спектру розпилюється, утворюючи частинки аерозолі. Потік випромінювання, проходячи через аерозоль, змінюється за рахунок поглинання випромінювання аерозолі. Зміна потоку випромінювання визначається фотоприймачем і є інформативним параметром.

Флуориметричні детектори. Молекули більшості органічних речовин за нормальних умов знаходяться в стійкому стані. В результаті взаємодії фотонів електромагнітного випромінювання з молекулами відбувається збудження електронів молекули, яке супроводжується випромінюванням квантів світла. Це фізичне явище, назване флуоресценцією, належить в основу роботи флуориметричних детекторів. У флуориметричному детекторі збудження молекул здійснюється оптичним сигналом та спостерігається випромінювання збуджених молекул на довжині хвилі λ_2 . За інтенсивністю вторинного випромінювання судять про концентрацію аналізованих компонентів.

Рефрактометричні детектори. В основу роботи рефрактометричних детекторів встановлене вимірювання показника переломлення аналізованої речовини. Рефрактометричні детектори, використовувані в рідинній хроматографії, які засновано на вимірюванні зміни кута переломлення монохроматичного променя світла або на вимірюванні інтенсивності відображеного світла. Кут переломлення вимірюють компенсаційним методом і методом безпосереднього відліку [2, 3].

Інтерферометричні детектори. У основу інтерферометричних детекторів встановлені інтерференційні методи вимірювання показника переломлення речовин. Зсув інтерференційної картини на діафрагмі детектора пропорційний числу молей аналізованої речовини. Зсув встановлюється фотоприймачем і зв'язане з настройкою детектора.

Поляриметричний детектор. Під час взаємодії поляризованого

електромагнітного випромінювання з оптично активними речовинами спостерігається ефект обертання площини поляризації електромагнітного випромінювання. Вимірювання кута обертання площини поляризації електромагнітного випромінювання здійснюється компенсаційним методом.

Детектори, що засновані на використанні ефекту фарбування речовини під час дії хімічних реакцій. Існує велика кількість речовин, які прозорі у видимій частині електромагнітного спектру, а під час контакту деяких хімічних реагентів придбається забарвлення або офарблюють хімічний реагент. За зміною інтенсивності забарвлення судять щодо концентрації аналізованої речовини.

1.2.3 Іоноселективні електроди. Методи іонометрії

Одним з сучасних фізико-хімічних методів аналізу біосередовищ є іонометрія – метод потенціометра дослідження складу розчину з використанням іоноселективних електродів (ICE), за допомогою яких можна визначати концентрацію більше 50 катіонів, аніонів і молекулярних з'єднань. Найбільш широко застосовуються електроди, селективні до іонів F^- , Cl^- , CN^- , S_2^- , MO_3^- , H^+ , NH_4^+ , Na^+ , Cu_2^+ , Ca_2^+ , ΣCa_2^+ і Mg_2^+ , ICE для визначення змісту газів (CO_2 , MN_3 , HCl , H_2S , NO) і органічних сполук (ацетілхоліну, сечовини і т.д.) [1, 17].

Аналіз біологічних рідин, зокрема на клітинному рівні, виділився в окрему область практичної іонометрії, а необхідність дослідження мікрооб'єктів зумовила важливість конструювання і виготовлення мікроелектродів. Іонометрія має деякі принципові перевагами перед іншими методами [1]:

1. Дозволяє визначати активну концентрацію іона або молекули на фоні його загальної концентрації.

2. Вимірювання можна виконувати в непрозорих, каламутних і забарвлених середовищах та в'язких пастах.

3. Час встановлення рівноважного потенціалу ІСЕ зазвичай складає секунди, що дозволяє автоматизувати проведення аналізу.

4. Відноситься до групи неруйнівних методів контролю.

5. Характерний широкий діапазон вимірювань, який знаходиться в межах $1 \cdot 10^{-6}$ М, а в деяких випадках і до 10^{-8} М. Похибка визначення при прямій потенціометрії від 2 до 10%, при проведенні титрування – від 0,5 до 1,0 %.

6. Уніфікована апаратури, можливість створення стаціонарних і переносних пристроїв.

До недоліків слід віднести наступні:

1. Селективність основної частини електродів не так велика, щоб здійснювати безпосереднє вимірювання активної концентрації аналізованого іона в будь-якому середовищі.

2. Можливість створення електродів, селективних до багатозарядних іонів, обмежена точністю вимірювання ЕРС.

3. Для всіх електродів характерний дрейф стандартного потенціалу, що вимагає періодичної перевірки градуювання приладу.

Основою іоноселективних електродів є напівпроникна мембрана (ІСМ), що має селективну іонну провідність. Якщо така мембрана, наприклад, проникна тільки для іона М, розділяє два розчини МХ різної концентрації ($a_1 > a_2$), то в результаті виникає різниця потенціалів між розчинами, розділеними ІСМ, яку називають мембранним потенціалом. Величина потенціалу є функцією активної концентрації іона М, що і використовується в даному методі.

Для вимірювання різниці потенціалів, а отже, і активної концентрації іона М, необхідно забезпечити електричний контакт між внутрішнім розчином (стандартний розчин з відомою концентрацією електроліту) і досліджуваним розчином. Для цієї мети, як правило, використовують хлорсрібні електроди порівняння (1 і 2). Збирають наступний гальванічний елемент з ІСЕ (див. рис. 1.2).

Електрод порівняння 1	Стандартний розчин 1	Мембрана	Досліджуваний розчин 2	Електрод порівняння 2
-----------------------	----------------------	----------	------------------------	-----------------------

Рисунок 1.2 – Гальванічний елемент з ІСЕ

Величина електрорушійної сили (е.р.с., E) даної системи пов'язана з активністю визначуваного іона наступним рівнянням [17, 18]:

$$E = E^0(\text{const}) \pm \frac{2,303 \cdot R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \lg(a_M) = E^0(\text{const}) \pm S \cdot \lg(a_M),$$

де константа E^0 визначається вибором допоміжних електродів порівняння і їх електродних потенціалів, $R = 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – газова постійна, T – температура, К, $F = 96487 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$ – число Фарадея, z – заряд визначуваного іона, $+S$ і $-S$ – кутові коефіцієнти для катіонів і аніонів відповідно.

Якщо мембрана не є ідеально селективною і пропускає іони, що також заважають, X з активністю a_X і зарядом z_X , то в цьому випадку необхідно використовувати розширене рівняння Б. П. Нікольського [17, 18]:

$$E = E^0(\text{const}) \pm S \cdot \lg \left(a_M + K_{M.X} \cdot a_X^{\frac{t_M}{t_X}} \right).$$

де $K_{M.X}$ – коефіцієнт селективності електроду по відношенню до визначуваного іона M на фоні іона X , що заважає.

Методи іонометрії.

1. Метод концентраційного елементу заснований на вимірюванні різниці потенціалів між двома ідентичними ІСЕ, що знаходяться в розчині відомого складу та в аналізованому розчині з невідомим змістом іона, що визначається. Розрахунок активної концентрації виконується з використанням вищенаведених рівнянь. Метод ефективний під час автоматичного аналізу.

2. Метод градуйованого графіка заснований на вимірюванні потенціалу

індикаторного електроду в розчині з невідомою концентрацією визначуваного іона та розрахунку цієї концентрації за рівнянням регресії, яке знайдено по серії градуювальних розчинів з відомою концентрацією цього ж іона. Для зниження похибки аналізу градуювальний графік будують по серії розчинів, склад яких (концентрація інертного електроліту і рН) максимально наближений до складу аналізованого розчину. Зазвичай для цього у всі вимірювані розчини вводять спеціальні буферні суміші, що забезпечують постійність іонної сили, рН і знімаючи вплив іонів, супутніх визначуваному, що заважає. Метод використовують також в автоматизованих системах аналізу. У теперішній час випускають іономери, в яких відлік активності (звично р-функція) будь-якого іона можна здійснювати безпосередньо за шкалою вимірювального приладу після його настройки по стандартних розчинах. Під час роботи з такими приладами немає необхідності в побудові калібрувального графіка.

3. Метод стандартних добавок заснований на введенні в аналізований розчин об'ємом V_X , що містить невідому концентрацію потенціаловизначаючого іона C_X , точного об'єму $V_{ДОБ}$ розчину цього ж іона з відомою концентрацією $C_{ДОБ}$ і обчисленні C_X по зміряному значенню зміни потенціалу індикаторного електроду ΔE по формулі [1]:

$$C_X = \frac{C_{ДОБ} \cdot V_{ДОБ}}{V_X + V_{ДОБ}} \cdot \left(10^{\frac{\Delta E}{S}} - \frac{V_X}{V_X + V_{ДОБ}} \right)^{-1}.$$

Основна перевага цього методу полягає у тому, що всі вимірювання проводяться у присутності всіх компонентів проби. Тому хорошої точності визначення можна досягти, навіть якщо істотна частина визначуваного іона знаходиться в комплексній формі.

4. Методи потенціометричного титрування застосовують зазвичай при визначенні макрокількостей вимірюваного іона, де особливо важлива прецизійність аналізу. У цих методах похибка визначення величин E° та S , від яких залежать похибки прямих вимірювань потенціометрів, вносять менший

внесок у похибку аналізу за допомогою титрометричних методів.

5. Непрямі методи аналізу, застосування яких найбільш ефективно в аналізі полізарядних іонів. Найбільше поширення набули методи непрямого визначення іонів, які створюють з потенціаловизначеним іоном комплексні або важкорозчинні з'єднання, і методи, де потенціаловизначаючий іон використовується для індикації кінцевої точки титрування.

1.3 Типи іоноселективних електродів

Йоноселективні електроди зазвичай класифікують за агрегатним станом електродно-активному матеріалу.

Скляні електроди. Мембрана виготовляється із скла різного складу. Скляний електрод є трубкою спеціального сорту скла з видutoю на її кінці кулькою з тонкою стінкою. Всередину електроду заливають розчин електроліту з відомою величиною активності іонів та поміщають електрод порівняння – хлор-срібний електрод. Для вимірювання кислотності досліджуваного розчину в нього занурюють скляний електрод і сполучають електролітичним ключем (пориста діафрагма) з другим електродом порівняння (хлор-срібним або каломельним).

Скляні електроди є у теперішній час кращими рН - електродами, оскільки вони практично не чутливі до окислювально-відновних систем, високо селективні в широкому діапазоні рН (від 1 до 12,5). Електрод дозволяє проводити вимірювання кислотності середовища з точністю до $\pm 0,03$ ед. рН, причому можлива хімічна стерилізація електроду, що дає можливість використовувати його для вимірювання кислотності біологічних об'єктів. Термін роботи електроду вимірюється протягом років. З інших типів скляних електродів найбільше застосування знайшов рNa-електрод.

Твердофазні електроди. Мембрани цих електродів створені на основі моно- і полікристалів важкорозчинних у воді солей. Електроди цього типу застосовуються для визначення галогени-іонів (F^- , Cl^- , Br^- , I^-), іонів S_2^{2-} Cu_2^{2-} ,

Pb_2^- Істотною перевагою цих електродів є тривалий термін роботи. Проте число твердих іонних кристалічних з'єднань, що мають селективність іонною провідністю, обмежене. На рис. 1.3 представлена схема твердотілого електроду з іоночутливим зрізом кристалу або пресованою пігулкою з порошку [1, 17 – 19], 1 – сенсор; 2 – кільце ущільнювача; 3а і 3б – деталі стрижня; 4 – металевий екран; 5 – кільце ущільнювача; 6 – внутрішня система порівняння.

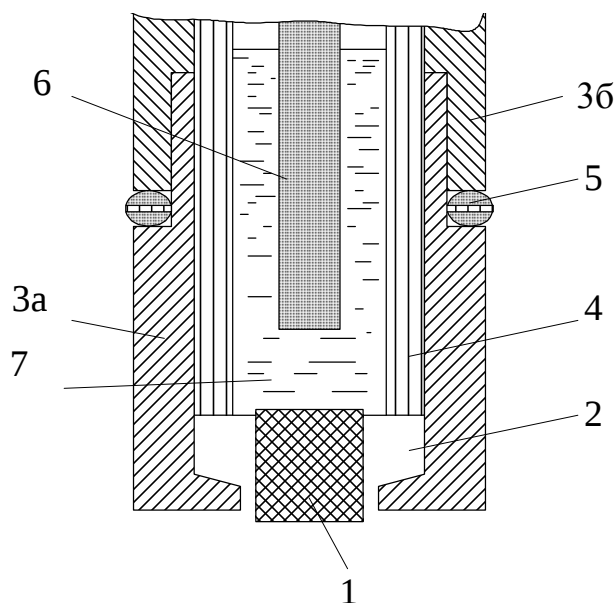


Рисунок 1.3 – Схема пристрою іоноселективного електроду з мембраною (сенсором) у вигляді твердого тіла

Електроди, з рідкою мембраною. У цих електродах використовується діафрагма, пори якої заповнені розчином електродноактивної речовини в органічному розчині. Асортимент рідинних ІСЕ постійно збільшується. У теперішній час виготовляються електроди селективні до іонів K^+ , Ca_2^+ , Cu_2^+ , Mg_2^+ , Pb_2^+ , Mn_2^+ , NH_4^+ , MO_3^- , CO_3^- , SO_4^{2-} , а також до іоногенних органічних сполук (поверхнево-активні речовини, ацетилхолін та ін.) [18]. На рис. 1.4 представлена схема з рідкою мембраною, де позначено: 1 – підведення проби до мембрани; 2 – мембрана; 3 – внутрішня система порівняння; 4 – органічна фаза; 5 – стрижень.

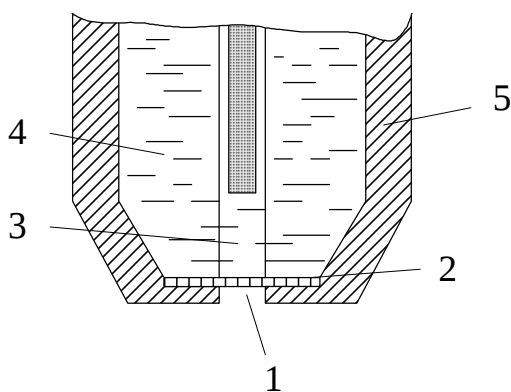


Рисунок 1.4 – Схематичний пристрій іоноселективного електроду з рідкою мембраною

Хімічний склад сенсорів для електродів обох видів може бути вельми різним. Формування потенціалу на сенсорі відбувається в результаті іонної провідності, іонного обміну та захоплення іонів. Електроди з скляною мембраною на вигляд схожі на скляні електроди для вимірювання рН. Відмінність між ними полягає у складі мембранних стеклів, що є алюмосилікати, дія яких обумовлена переважуючою лужною похибкою.

Механічна неміцність пористих мембран, попадання органічної фази в аналізований розчин ускладнюють застосування цих електродів в біомедичних дослідженнях. Ці недоліки частково усунені в плівкових електродах, в яких електродноактивна речовина і розчинник - пластифікатор упродовжені в полімерну матрицю. Термін служби в цьому випадку збільшується до 12 місяців.

Газові, ферментні і бактерійні молекулярноселективні електроди. Істотна відмінність електродів цього типу від звичних ІСЕ – використання проміжної реакції, в результаті якої з молекул визначених речовин утворюються іони, активність яких може бути визначена одним з вище перерахованих ІСЕ. Газові електроди дозволяють визначати активну концентрацію наступних газів: CO_2 , NH_3 , NO_2 , H_2S і т.д. В основі лежить реакція цих газів з водою, в результаті якої утворюються іони H_4^{2+} або OH^- , які, у свою чергу, визначаються рН - скляним електродом.

Схема газового електроду представлена на рисунку 1.5 [1], де позначено: 1 – корпус електроду; 2 – стрижень скляного електроду; 3 – кільце розпору; 4 – скляна мембрана для вимірювання рН; 5 – пластмасова плівка; 6 – відгвинчувана нижня частина (для періодичної заміни плівки); 7 – кільце ущільнювача; 8 – внутрішній розчин; 9 – електрод порівняння. У цих електродах поверхня сенсора стикається з тонким шаром розчину, який підібрано відповідно до поставленої задачі й відокремленого фольгою з органічної речовини від вимірюваної проби. Фольга вибирається проникною для вимірюваного газу. Залежно від парціального тиску газу в пробі молекули газу дифундує крізь фольгу та змінюють властивості контактуючого з сенсором розчину.

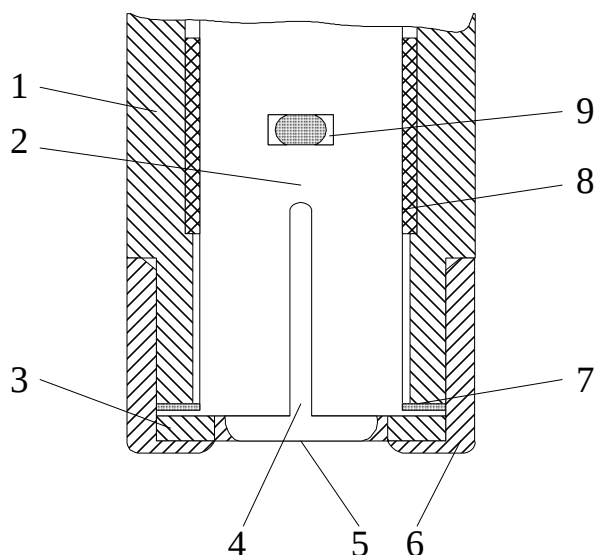


Рисунок 1.5 – Схема пристрою газочутливого однострижневого вимірювального кола

У разі вимірювань аміаку цей розчин містить хлорид амонію та має певне значення рН. Одночасно він забезпечує деякий невеликий парціальний тиск аміаку. Аміак, дифундує крізь фольгу з проби, зміщує значення рН розчину в лужну область. Це виявляється скляною мембраною вимірювального електроду. Процес дифузії є оборотним: $\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{NH}_3$. Правильна підготовка проби забезпечує повний зсув реакції праворуч.

Такі газові електроди у теперішній час є для аміаку, сірчистого ангідриду, двооксиду вуглецю та оксиду азоту. Вони підкоряються рівнянню Нернста. Іоноселективні електроди вимірюють тільки активності іонів a_i , пов'язані з концентраціями іонів c_i залежністю: $a_i = c_i f_i$. У розчинах індивідуальні коефіцієнти активності f_i , як правило, завжди відомі. Величина цього коефіцієнта залежить від іонної сили I . Якщо I шляхом підготовки проби підтримується на постійному рівні, то коефіцієнт f_i залишається постійним. З'являється можливість градуювання вимірювального пристрою за допомогою розчинів відомої концентрації.

1.4 Постановка задачі на проектування вимірювального пристрою

Вимірювальний пристрій, що розробляється, необхідно виконати для лабораторних умов експлуатації промислових підприємств, що дозволить виконувати експрес вимірювання концентрації іонів хрому в стічних водах. Пристрій повинен визначати концентрацію іонів хрому від іоноселективного електроду в аналоговій формі, виконувати перетворення отриманого сигналу до цифрової та передавати відповідний сигнал до системи збору та обробки даних у цифровому вигляді.

Концентрація іонів хрому й температура води знаходяться в наступних межах:

- діапазон вимірювання концентрації хрому pCr , мг/л від 1,52 до 3;
- активність іонів Cr , мг/л від 0,001 до 0,03;
- відносна похибка вимірювання pCr , % $\pm 2,5$;
- діапазон температур вимірювального середовища, °C від + 5 до + 35;
- відносна похибка вимірювання температури, % $\pm 2,5$.

Вимірювальний пристрій повинен нормально функціонувати під час зміни температури навколишнього середовища від + 5 до + 35°C, відносній вологості 90 % та барометричного тиску від 700 до 800 мм.рт.ст.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНІВ ХРОМУ

Для вимірювання концентрації іонів у теперішній час широко використовуються потенціометричний метод для дослідження складу розчинів з використанням іоноселективних електродів, за допомогою яких можна визначити концентрацію більш ніж 50 катіонів, аніонів і молекулярних з'єднань. Для вимірювання концентрації іонів хрому використовуємо іоноселективний електрод ХС–Cr–001 [20]. Для вимірювання температури аналізованої проби води передбачений датчик температури, який підключений до відповідного вимірювального каналу пристрою.

Вимірювальний пристрій конструктивно планується виконати у вигляді одного блоку, що містить в своєму складі канал вимірювання концентрації іонів хрому в стічних водах, канал вимірювання температури води та мікропроцесорний пристрій, що містить обчислювач концентрації іонів хрому в стічних водах, пристрій відображення вимірювальної інформації (pCr, T), джерело живлення. Сигнал по цифровому каналу зв'язку передається до персонального комп'ютеру. Функціональна схема вимірювального пристрою контролю концентрації іонів хрому в стічних водах на основі потенціометричного методу з використанням іоноселективних електродів представлено на рисунку 2.1.

Алгоритм роботи пристрою. Різниця потенціалів на іоноселективних електродах пропорційна концентрації іонів хрому, поступає на електрометричний підсилювач. Сигнал температури проби стічних вод перетворюється терморезистором, який включений до відповідного плеча вимірювального мосту, в електричний та поступає на вимірювальний підсилювач. Сигнали поступають на нормуючі підсилювачі, які приводять сигнали до необхідного рівня. Мультиплексор аналогових сигналів по черзі видає сигнали на пристрій вибірки-зберігання. Час перемикання каналів визначає мікропроцесор.

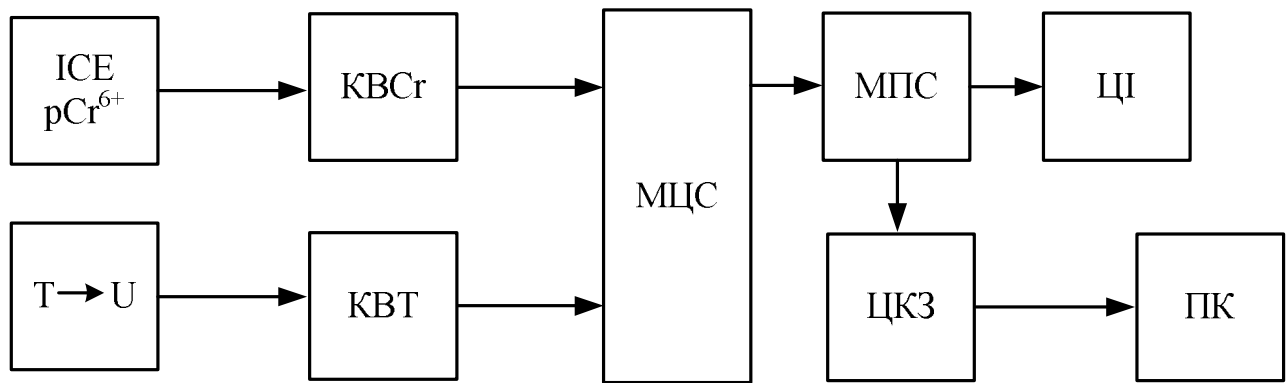


Рисунок 2.1 – Функціональна схема вимірювального пристрою концентрації іонів хрому в стічних водах

Електричні аналогові сигнали перетворюються аналогово-цифровим перетворювачем до двійкових кодів. Сигнали керування на початок перетворення та видачу коду, видає мікропроцесор. Коди поступають на буфер прийому-передачі та після цього на мікропроцесор. У постійно-запам'ятовуючому пристрої зберігаються константи й програми обробки даних. Пристрій індикації виводить інформацію щодо зміни концентрації іонів хрому безпосередньо на корпусі пристрою. Інформація щодо вміст хрому в стічних водах та температура передається по цифровому каналу зв'язку до персонального комп'ютеру, де відбувається збереження вимірювальних даних та відображення зміни параметрів на екрані ПК.

Структурна схема вимірювального пристрою концентрації іонів хрому в стічних водах представлена на рисунку 2.2, де позначено: ICE – іоноселективний електрод, ТР – терморезистор, перетворює температуру води в напругу; ЕМП – електрометричний підсилювач, ДП – диференційний підсилювач; НП – нормуючий підсилювач; МАС– мультиплексор аналогових сигналів; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; МПС – мікропроцесорна система; ЦІ – цифрова індикація; ЦКЗ – цифровий канал зв'язку; ПК – персональний комп'ютер. На структурній схемі наведено функції перетворення вихідного сигналу від датчиків до системи збору та обробки інформаційного сигналу, також функціональна схема вказує сигнали керування від мікроконтролера до аналогового блоку.

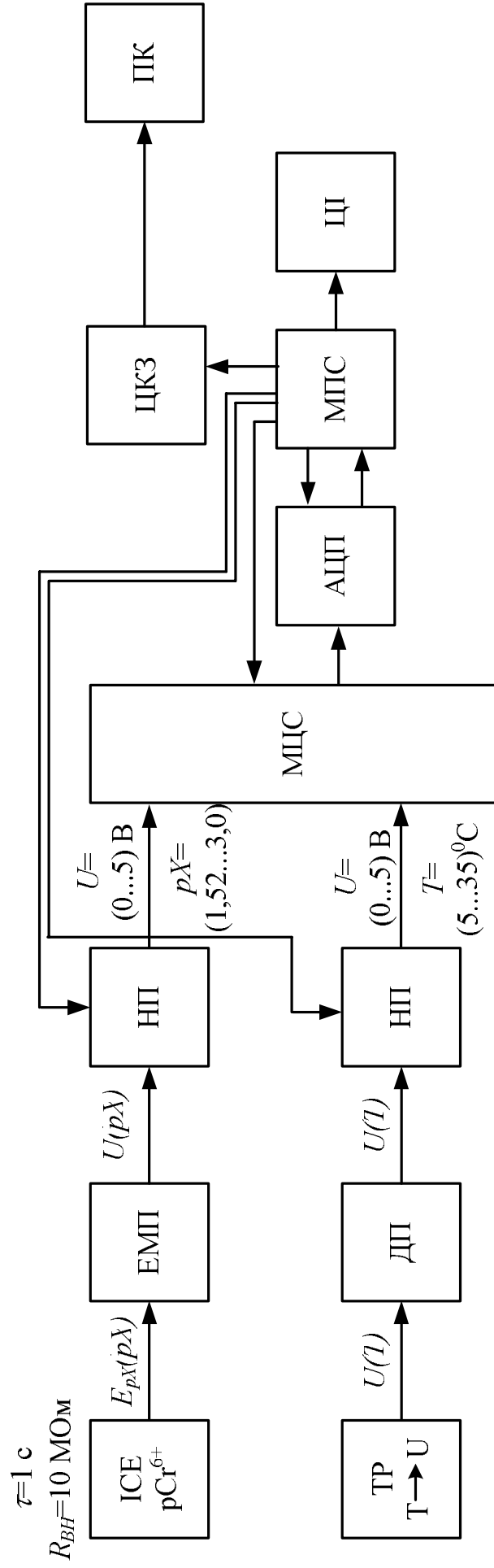


Рисунок 2.2 – Структурна схема вимірювального пристрою концентрації іонів хрому в стічних водах

3 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНІВ ХРОМУ

3.1 Розрахунок метрологічних характеристик вимірювального каналу

У іонометрії прийнято виражати концентрацію іонів через величину pX (p -функцію), яка дорівнює (негативному логарифму концентрації) [1 – 3]:

$$pX = -\lg(a),$$

де a – концентрація іонів ($\text{мг/дм}^3 = \text{мг/л}$)

Тому з рівняння Нернста виходить, що закономірність зміни потенціалу має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} E(pX, T) &= E_0 - \frac{2,303 \cdot R}{z \cdot F} \cdot T \cdot pX = E_0 - S(T) \cdot pX = \\ &= E_0 - k \cdot T \cdot pX, \end{aligned}$$

де E – різниця потенціалів між ІСЕ і електродом порівняння; S – нахил електродної функції (+ для катіонів, – для аніонів); E_0 – константа визначається вибором допоміжних електродів порівняння, і їх електродним потенціалом; $R=8,314 \text{ Дж.моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – газова постійна, T – температура, К, $F=96487 \text{ Клмоль}^{-1}$ – число Фарадея, z – заряд визначуваного іона, $k=1,984 \cdot 10^{-4} \text{ В} \cdot \text{К}^{-1}$.

Ця закономірність називається електродною функцією. У координатах E від pX , градуовальна характеристика має вид прямої, нахил якої наближається до величини 59 мВ для однозарядних іонів. Для двохзарядних іонів нахил рівний 29 мВ.

Е іонометричному аналізі важливе місце займає попередня оцінка похибки визначення аналізованого компоненту.

Абсолютна похибка вимірювання концентрації активних іонів

визначається за наступним співвідношенням [21 – 23]:

$$\Delta_{SpX} = K(P) \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial E} pX(E, T) \cdot \Delta_E\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial T} pX(E, T) \cdot \Delta_T\right)^2},$$

де $\frac{\partial}{\partial E} pX(E, T) = \frac{\partial}{\partial E} \left(\frac{E_0 - E}{kT} \right) = -\frac{1}{kT}; \quad \frac{\partial}{\partial T} pX(E, T) = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{E_0 - E}{kT} \right) = \frac{E - E_0}{kT^2} -$

похідні функції по змінних E і T ; при довірчій вірогідності $P=0,95$ $K(P)=1,1$.

Відносна похибка вимірювання pX , з умови технічного завдання не повинна перевищувати $\delta_{pX} = 2,5 \%$ та визначається за формулою:

$$\delta_{pX} = \frac{\Delta_{SpX}}{pX_{\max}} \cdot 100 \% = 2,5 \ \%.$$

Величина абсолютної похибки вимірювання pX дорівнює:

$$\Delta_{SpX} = \frac{\delta_{pX} \cdot pX_{\max}}{100 \%} = \frac{2,5 \cdot 3,5}{100 \%} = 0,0875.$$

Задамося приведеною похибкою вимірювання температури $2,5 \%$. Абсолютна похибка вимірювання температури дорівнює:

$$\Delta_T = \frac{\delta \cdot (T_{\max} - T_{\min})}{100} = \frac{2,5 \cdot (313 - 273)}{100} = 1 \text{ K}.$$

Розрахуємо абсолютну похибку вимірювання потенціалу іоноселективних електродів:

$$\left(\frac{\Delta_{SpX}}{K(P)} \right)^2 = \left(\frac{\partial}{\partial E} pX(E, T) \cdot \Delta_E \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial T} pX(E, T) \cdot \Delta_T \right)^2;$$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial}{\partial E} pX(E, T) \cdot \Delta_E \right)^2 &= \left(\frac{\Delta_{SpX}}{K(P)} \right)^2 - \left(\frac{\partial}{\partial T} pX(E, T) \cdot \Delta_T \right)^2; \\
(\Delta_E)^2 &= \frac{\left(\frac{\Delta_{SpX}}{K(P)} \right)^2 - \left(\frac{\partial}{\partial T} pX(E, T) \cdot \Delta_T \right)^2}{\left(\frac{\partial}{\partial E} pX(E, T) \right)^2}; \\
\Delta_E &= \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta_{SpX}}{K(P)} \right)^2 - \left(\frac{\partial}{\partial T} pX(E, T) \cdot \Delta_T \right)^2}{\left(\frac{\partial}{\partial E} pX(E, T) \right)^2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta_{SpX}}{K(P)} \right)^2 - \left(\frac{E - E_0}{kT^2} \cdot \Delta_T \right)^2}{\left(-\frac{1}{kT} \right)^2}} = \\
&= \sqrt{\frac{\left(\frac{0,0875}{1,1} \right)^2 - \left(\frac{(139,66 - (-55,49)) \cdot 10^{-3}}{1,984 \cdot 10^{-4} \cdot 298^2} \cdot 1,0 \right)^2}{\left(-\frac{1}{1,984 \cdot 10^{-4} \cdot 298} \right)^2}} = 4,7 \text{ мВ}.
\end{aligned}$$

Канал вимірювання температури забезпечує вимірювання температури проби води в діапазоні від +5 до + 35 °С, похибка вимірювання температури не повинна перевищувати $\pm 1^\circ\text{C}$. Під час розробки каналу вимірювання температури враховуватимемо дві основні складові інструментальної похибки:

Δ_{TM} – похибка нерівноважного резистивного мосту; $\Delta_{ТВП}$ – похибка вимірювального підсилювача каналу вимірювання температури.

Складові похибки Δ_{TM} і $\Delta_{ТВП}$ визначимо з умови:

$$1,1\sqrt{\Delta_{TM}^2 + \Delta_{ТВП}^2} \leq \Delta_T.$$

Якщо припустити, що $\Delta_{TM} = \Delta_{ТВП}$, то можна визначити, що

$$\Delta_{TM} = \Delta_{ТВП} = \frac{\Delta_T}{1,1\sqrt{2}} = \pm 0,65^\circ\text{C}.$$

3.2 Розробка принципів схем та розрахунок складових частин вимірювального пристрою

Вимірювальний пристрій, згідно технічного завдання, повинен мати такі вимірювальні канали:

1 Канал вимірювання концентрації іонів хрому:

- діапазон вимірювання концентрації хрому, pCr , від 1,52 до 3,0;
мг/л від 0,001 до 0,03;
- відносна похибка вимірювання pCr , % 2,5;
- використовуваний електрод ХС–Cr–001
- діапазон вихідної напруги ХС–Cr–001 $U_{вих}$, мВ від 139,66 до –55,49;
- вихідна напруга ЕМП, $U_{вих}$, В від 0 до –5;
- вихідна напруга НП, $U_{вих}$, В від 0 до +5.

2 Канал вимірювання температури:

- діапазон температур вимірювального середовища, °С від +5 до + 35;
- відносна похибка вимірювання температури, % $\pm 2,5$.

У таблиці 3.1 наведено характеристики іоноселективного електроду для визначення pCr [20].

Таблиця 3.1 – Характеристики іоноселективного електроду для визначення іонів хрому

Позн. електроду	Один. вимір.	Межі вимір. рХ	Температура °С	Коорд. ізопотен. точки	Іони, що заважають	Електродно-активний матеріал
ХС–Cr–001	pCr	0,22–3,5	5–55	$pX=2,9$; $E=-20mV$	$Br-100$, $I-10^6$ $CN-10^4$, OH – 0,01 S^{2-} – неможливо	Електрод мембранний

На рисунку 3.1 наведено градуювальні характеристики іоноселективного електроду ХС –Cr–001, який призначений для визначення вмісту у воді іонів Cr для різних температур.

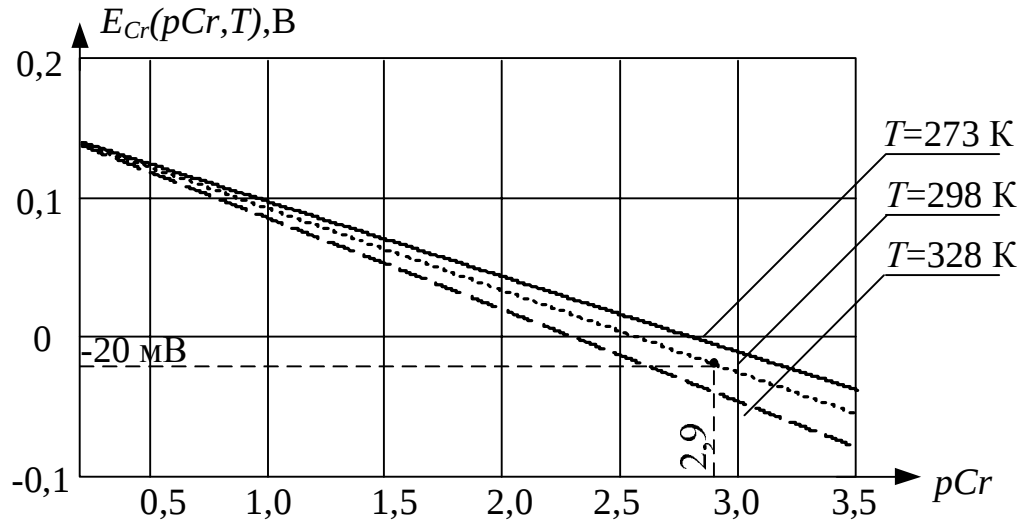


Рисунок 3.1 – Градуювальна характеристика іоноселективного електроду типу ХС –Cr–001

У відповідності з технічним завданням діапазон зміни вхідного сигналу АЦП складає від 0 до 5 В, приймаємо коефіцієнт передачі аналогового комутатора й пристрою вибірки – зберігання (ПВЗ) рівним одиниці. Тоді коефіцієнт підсилення електрометричного підсилювача каналу вимірювання концентрації хрому можна розрахувати наступним чином:

$$K_{U1} = \frac{\Delta U_{ЕМП}}{\Delta U_{12}} = \frac{5 - 0}{(139,66 - (-55,49)) \cdot 10^{-3}} = \frac{5}{195,15 \cdot 10^{-3}} = 25,6;$$

Вихідний опір іоноселективних електродів вимірювання концентрації хрому складає $R_{BH}=10$ МОм. Електрометричний підсилювач забезпечує підсилення та нормалізацію електричних сигналів до рівня, необхідного для нормальної роботи модуля АЦП. Іншою функцією ЕМП є перетворення диференціального вхідного сигналу в підсилений сигнал з одиночним виходом.

Таким чином, ЕМП повинен мати високий вхідний опір, диференціальний вхід і одиночний вихід. Вимога високого вхідного опору ЕМП здійснює тільки у разі побудови його по схемі з неінвертуючого включенням ОП на вході. Прецизійний вимірювальний підсилювач часто виконують диференціальним. При цьому схему включення вибирають такою, щоб вимірювання вихідних сигналів плечей взаємно віднімалися. Такий підхід достатньо ефективний, оскільки зміни вихідних сигналів, викликані нагрівом близьких по параметрах компонентів, в першому наближенні однакові. Різниця їх близька до нуля. Схема вимірювального підсилювача з диференціальним входом, високим вхідним опором і великим коефіцієнтом ослаблення синфазного сигналу приведена на рисунку 3.2 [24].

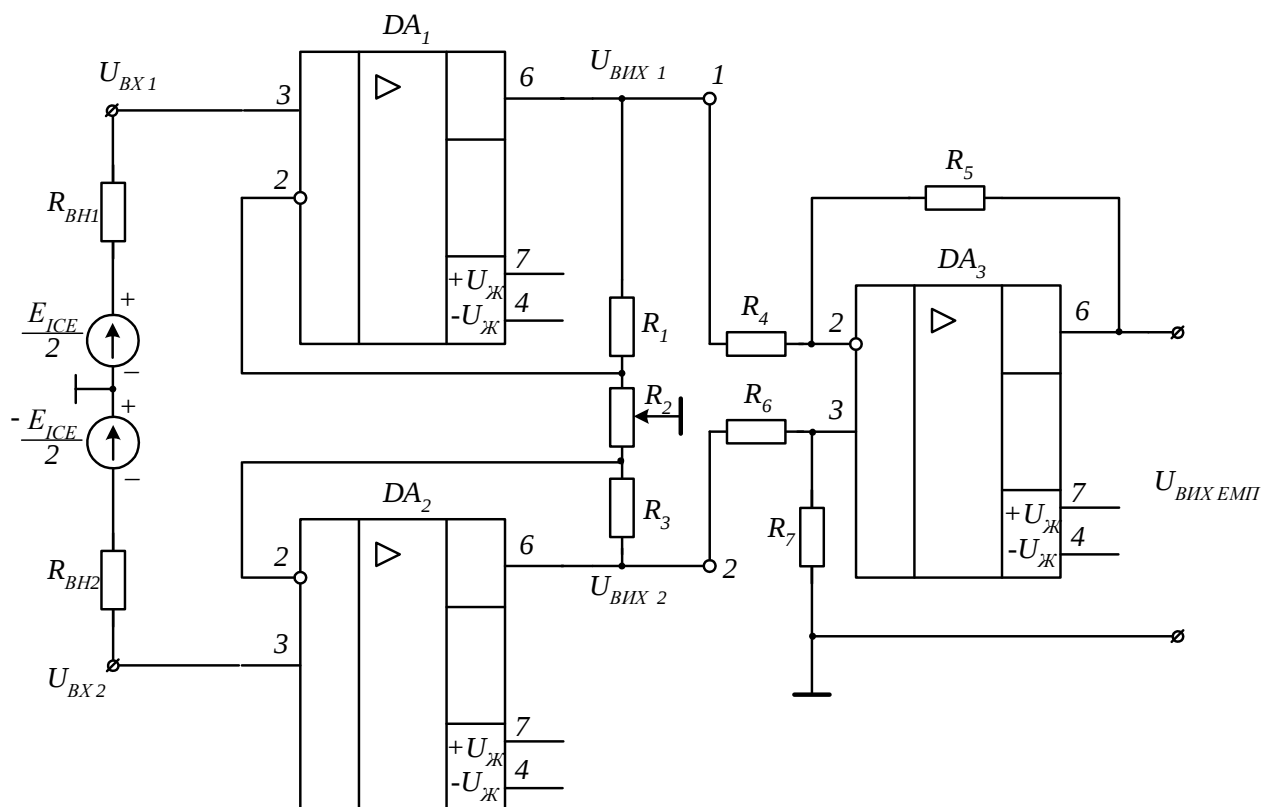


Рисунок 3.2 – Схема електрометричного підсилювача

На ОППС DA_1 і DA_2 зібрані два неінвертуючі підсилювачі напруги, які забезпечують високий вхідний опір по обох входах та утворюють перший каскад підсилення. На ОП DA_3 виконаний другий каскад підсилення з

диференціальним включенням ОП. Другий каскад має одиночний вихід, який є виходом ДП. У схемі ДП обидва каскади можуть підсилювати вхідний сигнал, тому загальний коефіцієнт підсилення ДП можна розподілити між двома каскадами, при цьому кожний з них матиме менший коефіцієнт підсилення і номінали опорів будуть в нормальних межах. В схемі однакові ОП DA_1 і DA_2 є диференціальним підсилювачем, що має високий вхідний опір. Схема їх включення забезпечує підвищення $K_{OC\ C\Phi}$. ОП DA_3 виконує віднімання вихідних сигналів ОП DA_1 і DA_2 і тим самим зменшує вплив на вихідний сигнал напруги зсуву нуля ОП DA_1 , DA_2 і синфазного вхідної напруги.

Для знаходження коефіцієнта підсилення запишемо рівняння для ОППС DA_1 , DA_2 [24]:

$$\begin{aligned} U_{BHX1} &= K_U \cdot \left(U_{BX1} - \left[U_{BHX1} - (U_{BHX1} - U_{BHX2}) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \right] + U_{3C1} \right); \\ U_{BHX2} &= K_U \cdot \left(U_{BX2} - \left[U_{BHX2} - (U_{BHX2} - U_{BHX1}) \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \right] + U_{3C2} \right); \end{aligned} \quad (3.1)$$

Перетворимо цей вираз з урахуванням того, що в таких підсилювачах резистори R_1 і R_3 рівні: $R_1=R_3=R_0$, а параметри компонентів вибирають так щоб

$K_U \cdot \frac{R_2 + R_0}{R_2 + 2 \cdot R_0} \gg 1$. В результаті цього [24]:

$$\begin{aligned} U_{BHX1} + U_{BHX2} \cdot \frac{R_0}{R_2 + R_0} &= \frac{R_2 + 2 \cdot R_0}{R_2 + R_0} \cdot (U_{BX1} + U_{3C1}); \\ U_{BHX2} + U_{BHX1} \cdot \frac{R_0}{R_2 + R_0} &= \frac{R_2 + 2 \cdot R_0}{R_2 + R_0} \cdot (U_{BX2} + U_{3C2}); \end{aligned} \quad (3.2)$$

Якщо параметри ОППС DA_3 вибрані так, що виконується умова

$$\frac{R_5}{R_4} = \frac{(R_2 + R_3) \cdot R_5}{(R_4 + R_5) \cdot R_2} = K_3,$$

та його вихідна напруга:

$$U_{BHX} = K_3 \cdot (U_{BHX2} - U_{BHX1}); \quad (3.3)$$

Підставивши в (3.3) значення U_{BHX1} і U_{BHX2} в (3.2) одержимо:

$$U_{BHX} = K_3 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_0}{R_2}\right) \cdot [(U_{BX2} - U_{BX1}) + (U_{3C2} - U_{3C1})]; \quad (3.4)$$

З (3.4) видно, що коефіцієнт підсилення по напрузі $K_3 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_0}{R_2}\right)$ залежить від опорів R_0 , R_2 і може легко регулюватися зміною значення R_2 . Вплив напруга зсуву нуля ОП DA_1 , DA_2 порівняно невелике і повністю відсутній при однакових U_{3C1} , U_{3C2} і дорівнюють їх змінам. Напруга зсув нуля ОП DA_3 ніяк не компенсується в цій схемі, але його вплив на похибку підсилення невеликий, оскільки сигнали, що поступають на входи цього ОП, мають великі значення.

Коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу дуже великий. Це обумовлено тим, що ОП DA_3 підсилює тільки різницю напруги U'_{BHX1} і U'_{BHX2} , викликаних синфазним сигналом. Тому при рівних коефіцієнтах ослаблення синфазного сигналу у ОП DA_1 , DA_2 придушення його на виході ОП DA_3 буде практично повним. Якщо необхідно одержати диференціальний вхід навантаження, то підключають до точок 1,2 (див. рис. 3.2). У електрометричних підсилювачах на вході встановлюють ОП з високим входним опором, наприклад DA_1 , DA_2 типа К544УД1А, що має наступні технічні характеристики [25] (див. таблицю 3.2). Типові схема включення мікросхем К554 приведені на рисунку 3.3.

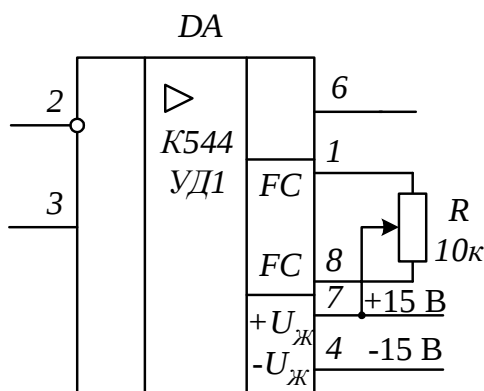


Рисунок 3.3 – Типова схема включення мікросхеми К554УД1

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики ОППС типу К544

Параметр	Позначення	Одиниця	К544 УД1А
Вхідний струм	I_{BX}	нА	0,15
Різниця вхідних струмів	ΔI_{BX}	нА	0,15
Вхідний опір	R_{BX}	МОм	$10 \cdot 10^3$
Напруга зсуву нуля	U_{3C}	мВ	30
Дрейф напруги зсуву нуля	$\Delta U_{3C}/\Delta T$	мкВ/ $^{\circ}$ С	30,0
Коефіцієнт підсилення напруги	K_U	–	$>5 \cdot 10^4$
Коефіцієнт ослаблення синфазних вхідних напруг	$K_{OC.C\Phi}$	дБ	100
Частота одиничного підсилення	F_1	МГц	>1
Швидкість наростання вихідної напруги	νU_{BIX}	В/мкс	2
Вихідний опір	R_{BIX}	Ом	200
Максимальний вихідний струм	$I_{BIX max}$	мА	5
Максимальна вихідна напруга	$U_{BIX max}$	В	± 10
Максимальна вхідна диференціальна напруга	$U_{ДФВХ max}$	В	± 10
Максимальна синфазна вхідна напруга	$U_{C\Phi BX max}$	В	± 10
Напруга живлення	$U_{Ж}$	В	± 15
Струм живлення	$I_{ЖИВ}$	мА	3,5

Проводимо розрахунок елементів підсилювача для каналу вимірювання концентрації хрому. Для отримання сумарного коефіцієнта підсилення за напругою 25,6 прийmemo коефіцієнт підсилення першого каскаду 4,575 а другого каскаду 5,6. Задаємося значеннями опорів резисторів R_1 , R_3 і визначаємо опори резисторів R_2 , R'_2 :

$$R_2 + R'_2 = \frac{2 \cdot R_0}{K_1 - 1} = \frac{R_1 + R_3}{K_1 - 1} = \frac{10 + 10}{4,575 - 1} = 5,594 \text{ кОм}.$$

Вибираємо R_2 типу С1–4–0,125 Вт–5,1 кОм $\pm$ 5%

R_1 , R_3 типу С1–4–0,125 Вт–10 кОм $\pm$ 5%.

Для підстроювання коефіцієнта підсилення в схему введений підстроєчний резистор R'_2 . Вибираємо R'_2 типу С5–2ВА–0,5 Вт–1 кОм $\pm$ 10%.

При зміні опору резистора від мінімуму до максимуму, коефіцієнт підсилення змінюватиметься у наступних межах:

$$K_{1\max} = 1 + \frac{R_1 + R_2}{R_2 + R'_{2\min}} = 1 + \frac{10 + 10}{5,1 + 0} = 4,922;$$

$$K_{1\min} = 1 + \frac{R_1 + R_2}{R_2 + R'_{2\max}} = 1 + \frac{10 + 10}{5,1 + 1} = 4,279.$$

Як видно, під час використання цього підстроєчного резистору маємо достатньо широкий діапазон регулювання коефіцієнта підсилення. Коефіцієнт підсилення другого каскаду за інвертуючим входом описується виразом:

$$K_{3i} = \frac{R_5}{R_4}.$$

Оскільки попередній каскад має низький вихідний опір, то вибираємо $R_4 = 10 \text{ кОм}$, тоді

$$R_5 = K_3 \cdot R_4 = 5,6 \cdot 10 = 56 \text{ кОм.}$$

Коефіцієнт підсилення другого каскаду за неінвертуючим входом відповідно дорівнює:

$$K_{3н} = \frac{(R_5 + R_4) \cdot R_7}{(R_6 + R_7) \cdot R_4} = \frac{(56 + 10) \cdot 56}{(10 + 56) \cdot 10} = 5,6.$$

Вибираємо R_4 і R_6 типу С1–4–0,125 Вт–10 кОм $\pm$ 5 %,

R_5 і R_7 типу С1–4–0,125 Вт–56 кОм $\pm$ 5 %.

Вплив напруги зсуву ОП DA_1 , DA_2 повністю компенсуються, так як схема працює в режимі диференційного каскаду та ОППС DA_1 DA_2 в електрометричних підсилювача вибираються однаковими або близькими. Напруга похибки на виході ОППС DA_3 визначається наступним співвідношенням:

$$U_{3C}(T \pm \Delta T = (20 \pm 20)^0 C) = U_{3C3} + U_{3C3}(\Delta T) \cdot \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) + \Delta I \cdot R_5 + \Delta I(\Delta T) \cdot R_5.$$

Під час настройки підсилювача за допомогою змінних резисторів R (див. рис. 3.3) вплив адитивних складових U_{3C3} та $\Delta I \cdot R_5$, величина яких не залежить від температури, компенсуються. При цьому напругу похибки на виході DA_3 визначимо за формулою:

$$\begin{aligned} U_{3C}(T \pm \Delta T = (20 \pm 20)^0 C) &= U_{3C3}(\Delta T) \cdot \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) + \Delta I(\Delta T) \cdot R_5 = \\ &= 30,0 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot \left(1 + \frac{56 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}\right) + 0,15 \cdot 10^{-9} \cdot 20 \cdot 10 \cdot 10^3 = \\ &= 3,960 \cdot 10^{-3} + 0,03 \cdot 10^{-3} = 4,00 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 4,0 \text{ мВ.} \end{aligned}$$

Використовуємо резистори $R_4 - R_7$ з допуском $\pm 5\%$, розрахуємо коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу:

$$K_{OC\ C\Phi} = \left(1 + \frac{2}{a}\right) \cdot (1 + m) \cdot \frac{m}{\Delta m} = \left(1 + \frac{2}{4,6}\right) \cdot (1 + 5,6) \cdot \frac{5,6}{0,05} = 1060,6.$$

$$K_{OC\ C\Phi\ дБ} = 20 \cdot \lg(K_{OC\ C\Phi}) = 20 \cdot \lg(1060,6) = 60,51\ дБ.$$

З параметрів операційного підсилювача К554УД1 відомо, що коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу операційного підсилювача:

$$K_{OC\ C\Phi\ ОП} = 100\ дБ.$$

Розрахуємо мінімальне і максимальне значення напруги в точках $U_{ВИХ1}$ і $U_{ВИХ2}$ за наступними формулами:

$$U_{ВИХ1} = U_{\min} \cdot a = -55,49 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = -0,1110\ В;$$

$$U_{ВИХ2} = U_{\max} \cdot a = 139,66 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 0,2793\ В$$

Розрахуємо середнє значення напруги, використовуючи співвідношення:

$$U_{cp} = \frac{U_{ВИХ2} - U_{ВИХ1}}{2} = \frac{0,2793 - (-0,1110)}{2} = 0,1952\ В.$$

Розрахуємо вихідну напругу з урахуванням синфазної складової сигналу:

$$U_{ВИХ\ C\Phi} = U_s \cdot \frac{\left(1 + \frac{2}{a}\right) \cdot m}{K_{OC\ C\Phi}} = 0,1952 \cdot \frac{\left(1 + \frac{2}{4,6}\right) \cdot 5,6}{10000} = 0,157\ мВ.$$

Розрахуємо сумарну похибку на виході вимірювального підсилювача по формулі:

$$\begin{aligned}\Delta_{ВП} &= \sqrt{(U_{ВНХ\text{ }СФ})^2 + (U_{ЗС}(\Delta T = 20^{\circ}C))^2} = \\ &= \sqrt{(0,157 \cdot 10^{-3})^2 + (4,00 \cdot 10^{-3})^2} = 4,0 \text{ мВ}.\end{aligned}$$

Розрахуємо діапазон зміни вихідної напруги ВП:

$$U_{ВНХ\text{ }ВП\text{ }min} = U_{min} \cdot K_{У\text{ }ВП} = -55,49 \cdot 10^{-3} \cdot 4,6 \cdot 5,6 = -1,4294 \text{ В};$$

$$U_{ВНХ\text{ }ВП\text{ }max} = U_{max} \cdot K_{У\text{ }ВП} = 139,66 \cdot 10^{-3} \cdot 4,6 \cdot 5,6 = 3,5976 \text{ В}.$$

Приведена похибка вимірювання вихідної напруги ВП розрахуємо за наступним співвідношенням:

$$\gamma_{ВП} = \frac{\Delta_{ВП}}{U_{ВНХ\text{ }ВП\text{ }max} - U_{ВНХ\text{ }ВП\text{ }min}} \cdot 100 = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{3,5976 - (-1,4294)} \cdot 100 = \pm 0,08 \text{ \%}.$$

Для нормалізації вихідної напруги ЕМП до рівня вхідного сигналу АЦП використовується нормуючий підсилювач, принципову схему якого наведено на рисунку 3.4 [26]. Вихідний каскад повинен мати коефіцієнт підсилення за напругою K_4 від 1 до 2 і забезпечувати плавне регулювання коефіцієнту в невеликих межах ($\approx \pm 10\%$). Приймаємо опір $R_9 = R_{10} = 10 \text{ кОм}$. Вибираємо R_9 і R_{10} типа С1-4-0,125Вт-10кОм $\pm 5\%$

Коефіцієнт підсилення вихідного каскаду каналу вимірювання концентрації хрому, дорівнює:

$$K_4 = -\frac{R_{11}}{R_9},$$

звідки $R_{11} = K_4 \cdot R_9 = 1 \cdot 10 = 10 \text{ кОм}$. R_{11} слідє виконати складовим з двох послідовно включених резисторів $R_{11}=9,1 \text{ кОм}$ типа С1–4–0,125Вт–9,1 кОм $\pm 5\%$ і $R_{12}=2,0 \text{ кОм}$ типа С5–2ВА–0,5 Вт–2,0 кОм $\pm 10\%$. (змінне, для забезпечення регулювання K_4).

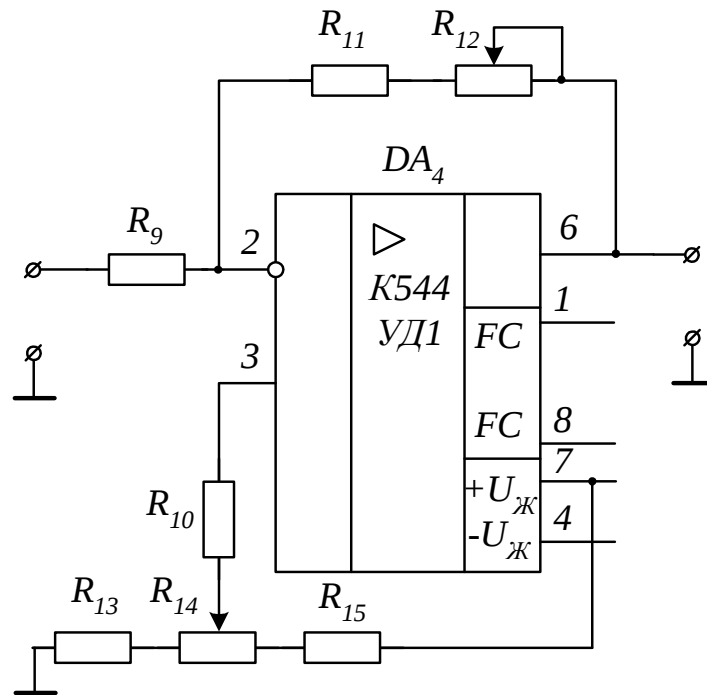


Рисунок 3.4 – Принципова схема вихідного каскаду,
каналу вимірювання концентрації хрому

Під час розрахунку каналу вимірювання концентрації іонів хрому в стічних водах прийнято, що канал настроюється при концентрації хрому $pX=0,2$, так напруга вимірювального підсилювача повинна бути $U_{ВНХ}=0 \text{ В}$ при концентрації хрому $pX=0,2$. Тому, при настройці каналу слід змістити його градуїровочную характеристику. Це здійснюється шляхом подачі напруги U_2 з виходу резистивного дільника $R_{13}-R_{15}$ на неінвертуючий вхід DA_4 . Необхідне значення напруги U_2 визначаємо з рівняння:

$$U_1(pX) \cdot K_2^- + U_2 \cdot (|K_2^-| + 1) = U_{ВНХ}(pX),$$

де $U_1(pX)$ – вихідна напруга електрометричного підсилювача при концентрації хрому у воді pX ;

$$K_4^- = -1;$$

$U_{BHX}(pX)$ – вихідна напруга каналу при концентрації pX .

При $pX=0,2$ маємо:

$$U_1(pX = 0,2) = U_{BHX ICE}^P(pX = 0,2) \cdot K_1 = 0,1397 \text{ В} \cdot 25,621 = 3,578 \text{ В}.$$

$$U_{BHX}(pX = 0,2) = 0 \text{ В.} \quad (\text{за вимогами ТЗ}).$$

Тоді $3,578(-1) \text{ В} + U_2 \cdot (1+1) = 0 \text{ В}$, звідки $U_2 = 1,789 \text{ В}$.

Перевіряємо при $pX=3,5$:

$$U_1(pX = 3,5) = U_{BHX ICE}^P(pX = 3,5) \cdot K_1 = -0,0555 \text{ В} \cdot 25,621 = -1,422 \text{ В}$$

$$U_{BHX}(pX = 3,5) = 5,0 \text{ В.} \quad (\text{на вимогу ТЗ}).$$

$$-1,422(-1) \text{ В} + U_2 \cdot (1+1) = 5 \text{ В}, \quad \text{звідки} \quad U_2 = 1,789 \text{ В}.$$

Таким чином, на виході резистивного діляника напруги $R_{11}-R_{12}$ необхідно забезпечити напругу $U_2 = 1,789 \text{ В}$. Схема установки нуля є діляником напруги на підстроювальному резисторі (див. рис. 3.5).

Початкові дані для розрахунку:

– напруга живлення $U_{Ж}=U_1=+15 \text{ В}$;

– напруга на виході $U_{BX}=U_2=1,789 \text{ В}$;

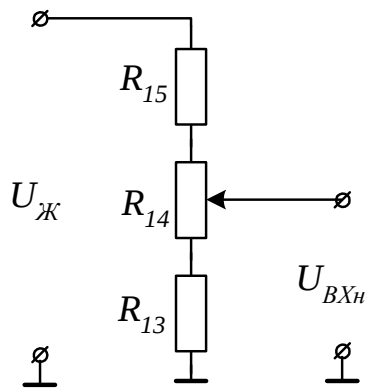


Рисунок 3.5 – Принципова схема встановлення нуля НП

Розрахунок: коефіцієнт розподілу напруги: $\alpha = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1,789}{15} = 0,1193$.

Задаємося зміною $\alpha \pm 10\%$:

$$\alpha_{\min} = 0,9 \cdot \alpha = 0,9 \cdot 0,1193 = 0,1073; \quad \alpha_{\max} = 1,1 \cdot \alpha = 1,1 \cdot 0,1193 = 0,1181.$$

R_{11} вибираємо підстроєчний резистор типу СП5–17–1 Вт – 1 кОм $\pm 10\%$.

$P_{\text{НОМ}} = 1$ Вт. Діапазон робочих температур: від -60 до $+125$ °С.

Розрахунок ведемо на середнє значення: $R_{14} = 500$ Ом.

$$\begin{cases} \alpha_{\min} = \frac{R_{13}}{R_{13} + R_{14} + R_{15}}, \\ \alpha_{\max} = \frac{R_{13} + R_{14}}{R_{13} + R_{14} + R_{15}}; \end{cases}$$

$$R_{13} = \frac{\alpha_{\min} \cdot R_{14}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} = \frac{0,1073 \cdot 500}{0,1181 - 0,1073} = 4967,6 \text{ Ом.}$$

Вибираємо номінал резистору $R_{13} = 5,1$ кОм.

$$R_{15} = \frac{(R_{13} + R_{14}) \cdot (1 - \alpha_{\max})}{\alpha_{\max}} = \frac{(500 + 5100) \cdot (1 - 0,1181)}{0,1181} \approx 41817 \text{ кОм.}$$

Вибираємо номінал резистору $R_{15} = 43 \text{ кОм}$.

$$\begin{cases} \alpha_{\min} = \frac{R_{13}}{R_{13} + R_{14} + R_{15}} = \frac{5,1}{43 + 1 + 5,1} = 0,1039, \\ \alpha_{\max} = \frac{R_{13} + R_{14}}{R_{13} + R_{14} + R_{15}} = \frac{1 + 5,1}{43 + 1 + 5,1} = 0,1263; \end{cases}$$

Струм діляника дорівнює:

$$I = \frac{U_{\text{ж}}}{R_{13} + R_{14} + R_{15}} = \frac{15}{43 \cdot 10^3 + 5,1 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} = 0,305 \text{ мА}.$$

Потужність, що розсіюється на резисторах:

$$P_{R13} = I^2 \cdot R_{13} = (0,305 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 5,1 \cdot 10^3 = 0,47 \text{ мВт};$$

$$P_{R14} = I^2 \cdot R_{14} = (0,305 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1 \cdot 10^3 = 0,093 \text{ мВт};$$

$$P_{R15} = I^2 \cdot R_{15} = (0,305 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 43 \cdot 10^3 = 4,0 \text{ мВт};$$

Вибираємо опір R_{15} типу С1–4–0,125 Вт–43 кОм $\pm$ 5%

R_{13} типу С1–4–0,125 Вт–5,1 кОм $\pm$ 5%

Напруга похибки на виході ОППС DA₄ визначається наступним співвідношенням:

$$U_{\text{зс}}(T \pm \Delta T = (20 \pm 20)^0 \text{ C}) = U_{\text{зс4}} + U_{\text{зс4}}(\Delta T) \cdot \left(1 + \frac{R_{11} + \frac{R_{12}}{2}}{R_9} \right) + \Delta I \cdot R_9 + \Delta I(\Delta T) \cdot R_9.$$

При настройці підсилювача за допомогою змінного резистору R (див. рис. 3.4) вплив адитивних складових $U_{\text{зс4}}$ та $\Delta I \cdot R_9$, величина яких не залежить від температури, компенсуються. При цьому напругу похибки на

виході DA₄ визначимо за формулою:

$$\begin{aligned}
 U_{3C}(T \pm \Delta T = (20 \pm 20)^0 C) &= U_{3C4}(\Delta T) \cdot \left(1 + \frac{R_{11} + \frac{R_{12}}{2}}{R_9} \right) + \Delta I(\Delta T) \cdot R_9 = \\
 &= 30 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot \left(1 + \frac{9,1 \cdot 10^3 + \frac{2 \cdot 10^3}{2}}{10 \cdot 10^3} \right) + 0,15 \cdot 10^{-9} \cdot 20 \cdot 10 \cdot 10^3 = \\
 &= 1,206 \cdot 10^{-3} + 0,03 \cdot 10^{-3} = 1,236 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 1,236 \text{ мВ}.
 \end{aligned}$$

Приведена похибка вимірювання вихідної напруги НІ розрахуємо за співвідношенням:

$$\gamma_{НІ} = \frac{\Delta_{НІ}}{U_{ВІХ \text{ НІ} \max} - U_{ВІХ \text{ НІ} \min}} \cdot 100 = \frac{1,236 \cdot 10^{-3}}{5 - 0} \cdot 100 = \pm 0,025 \%.$$

Абсолютна похибка вимірювання вихідної напруги каналу вимірювання концентрації хрому визначається за співвідношенням:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{S\Delta E} &= K(P) \cdot \sqrt{(\Delta_{ВІ} \cdot K_{У \text{ НІ}})^2 + (\Delta_{НІ})^2} = \\
 &= 1,1 \cdot \sqrt{(4 \cdot 10^{-3} \cdot 4,6 \cdot 5,6)^2 + (1,2 \cdot 10^{-3})^2} = 11,3 \text{ мВ}.
 \end{aligned}$$

Приведена похибка вимірювання каналу концентрації хрому:

$$\gamma_{\Delta E} = \frac{\Delta_{S\Delta E}}{U_{AIN}} \cdot 100 \% = \frac{0,0113}{5,0} \cdot 100 = 0,2 \%.$$

Принципову схему каналу вимірювання концентрації іонів хрому в стічних водах наведено на рисунку 3.6.

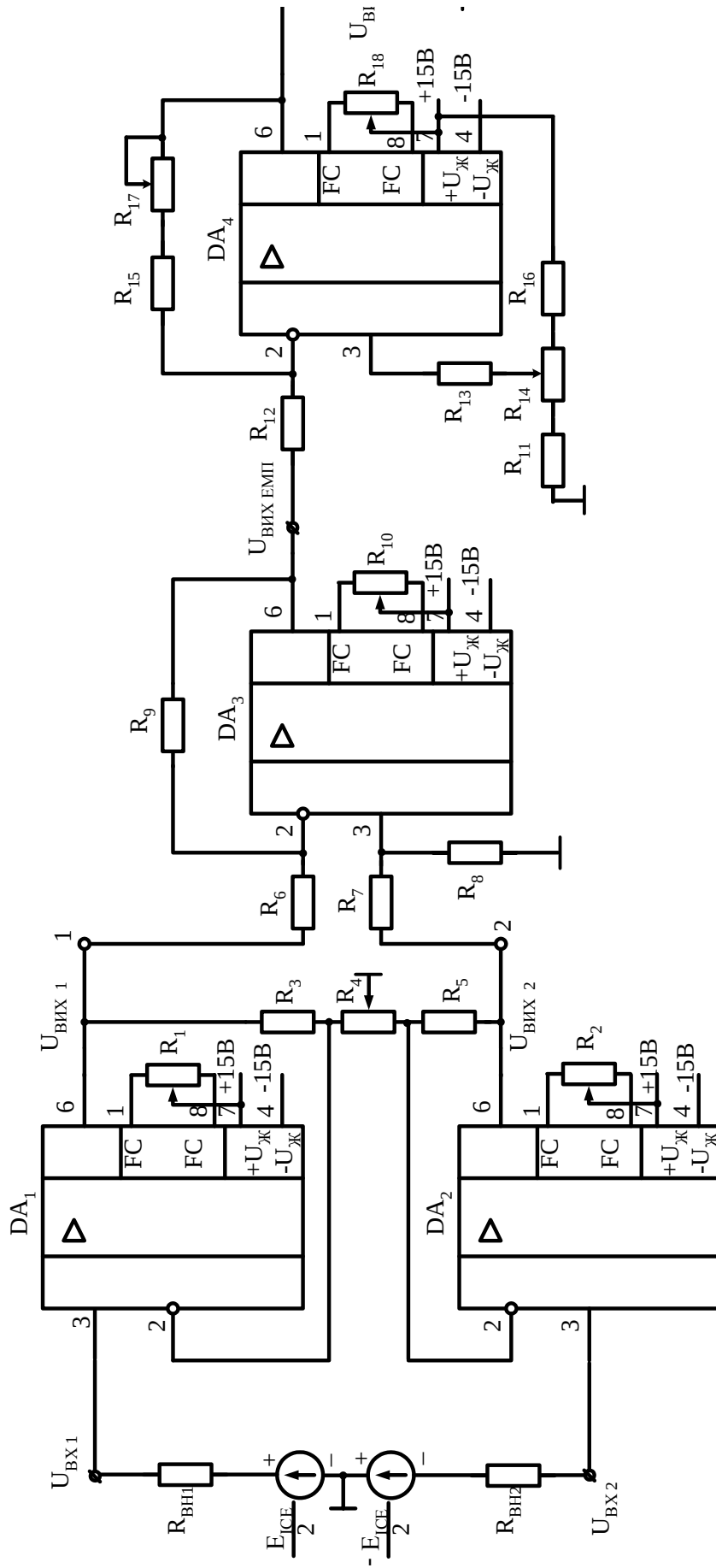


Рисунок 3.6 – Принципова схема каналу вимірювання концентрації іонів хрому в стічних водах

ВИСНОВКИ

У випускної кваліфікаційної роботі наведено аналітичний огляд методів вимірювання концентрації домішок у воді, проаналізовані їх переваги та недоліки. Вибрано для контролю концентрації іонів хрому в стічних водах потенціометричний метод з використання іоноселективний електродів, як найбільш перспективний й точний метод.

Виконано розробку структурної схеми вимірювального пристрою концентрації іонів хрому в стічних водах промислових підприємств. На базі розробленої структурної схеми проведено проектування аналогової частини вимірювального пристрою. Розраховано вимірювальний канал концентрації іонів хрому, а також розроблено та обґрунтовано вимоги до каналу вимірювання температури, який потрібен для підвищення показників точності вимірювання концентрації активних іонів.

Концентрація іонів хрому й температура води знаходяться в наступних межах:

- діапазон вимірювання концентрації хрому pCr , мг/л від 1,52 до 3;
- активність іонів Cr , мг/л від 0,001 до 0,03;
- відносна похибка вимірювання pCr , % $\pm 2,5$;
- діапазон температур вимірювального середовища, °C від + 5 до + 35;
- відносна похибка вимірювання температури, % $\pm 2,5$.

Вимірювальний пристрій розраховано для функціонування під час зміни температури навколишнього середовища від + 5 до + 35°C, відносній вологості 90 % та барометричного тиску від 700 до 800 мм.рт.ст.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зори, А.А. Методы, средства, системы измерения и контроля водных средств / А.А. Зори, В.Д. Коренев, М.Г. Хламов. – Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. – 388 с.
2. Бойко, В.І. Прилади і системи екологічного моніторингу (вступ до фаху): навчальний посібник / В.І. Бойко, О.В. Вовна, А.А. Зорі., В.А. Порєв. – 3-е вид., доповн. і прееробл. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – 292 с.
3. Вовна, О.В. Аналітичні прилади та системи: навч. посіб. / О.В. Вовна, А.А. Зорі, В.А. Порєв, В.П. Приміський; під заг. ред. В.А. Порєва. – Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2016. – 330 с.
4. Порєв, В.А. Аналітичні екологічні прилади та системи: монографія / В.А. Порєв, О.А. Дашковський, Я.Л. Миндюк та ін.; під заг. ред. В.А. Порєва – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009 – 336 с.
5. Технический справочник по обработке воды: в 2т. – СПб.: Новый журнал, 2007. – Т.1 – 774 с; Т. 2 – 922 с.
6. Гудков, А.Г. Механическая очистка сточных вод: учебное пособие / А.Г. Гудков. – Вологда: ВоГТУ, 2003. – 152 с.
7. Яковлев, С.В. Очистка производственных сточных вод / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.В. Ласков и др. – М. : Стройиздат, 1985. – 335 с.
8. Алферова, Л.А. Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий / Л.А. Алферова, А.П. Нечаев. – М.: Стройиздат, 1984. – 272 с.
9. Тимонин, А.С. Инженерно-экологический справочник / А.С. Тимонин. – Т. 2. – Калуга: Изд-во Н. Бочкарёвой, 2003. – 884 с.
10. Игнатович, Э. Химическая техника. Процессы и аппараты / Э. Игнатович. – М.: Техносфера, 2007. – 656 с.
11. Проскуряков, В.А. Очистка сточных вод химических производств / В.А. Проскуряков, Л.И. Шмидт. – Л.: Химия, 1987. – 365 с.
13. Горелик, Д.О. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы. В 2-х томах. / Д.О. Горелик, Л.А. Конопелько, Э.Д. Панков.

– СПб.: Крисмас, 1998. – 592 с.

14. Агасян, П.К. Основы электрохимических методов анализа / П.К. Агасян, Е.П. Николаева. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 192 с.

15. Бонд, А.М. Полярографические методы в аналитической химии / А.М. Бонд; пер. с англ. – М.: Химия, 1983. – 327 с.

16. Галюс, З. Теоретические основы электрохимического анализа / З. Галюс; пер. с польск. – М.: Мир, 1974. – 552 с.

17. Корица, И. Ионоселективные электроды / И. Корица, К. Штулик. – М.: Мир, 1989. – 267 с.

18. Морф, В. Принципы работы ионоселективных электродов – мембранный транспорт / В. Морф. – М.: Мир, 1985. – 280 с.

19. Ионоселективные электроды / Под ред. Р. Дарста. – М.: Мир, 1972. – 430 с.

20. Електронприлад [Електронний ресурс] / Халькогенідний скляний електрод для визначення іонів Cr(VI) у водних розчинах. – Електронні данні. – Режим доступу: <http://www.electronpribor.ru/catalog/1076/hs-crvi-001.htm>, вільний. – Загл. з екрану.

21. Бурдун, Г.Д. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Изд. стандартов, 1985. – 256 с.

22. Тартаковский, Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерения: [учеб. для вузов] / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с.

23. Сергеев, А.Г. Метрология: [учебник] / А.Г. Сергеев. – М.: Логос, 2005. – 272 с.

24. Электроника и микропроцессорная техника: [учеб. для вузов] / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – [4-е изд., доп.]. – М.: Высш. шк., 2006. – 799 с.

25. Терещук, Р.М. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: справочник радиолюбителя / Р.М. Терещук, К.М. Терещук, С.А. Седов. – 4-е изд. стер. – К.: Наукова думка, 1989. – 800 с.

26. Схемотехніка електронних систем: у 3 кн. кн. 1: Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: [підручник] / В.І. Бойко, А.М. Гурджій, В.Я. Жуйкою, А.А. Зорі, В.М. Співак, Т.О. Терещенко. – [2-ге вид., допов. і переробл.]. – К.: Вища школа, 2004. – 366 с.

27. Жидецький, В.Ц. Практикум із охорони праці / В.Ц. Жидецький та ін. – Л.: Афіша. – 2000 – 349 с.

Додаток А – Технічне завдання на розробку електронного пристрою контролю концентрації іонів хрому

А.1 Найменування й область застосування пристрою

А.1.1 Повне найменування пристрою

Електронний пристрій контролю концентрації іонів хрому в стічних водах промислових підприємств, скорочено ЕПККІХ.

А.1.2 Область застосування пристрою

А.1.3 Загальна характеристика об'єкту контролю

Концентрація іонів хрому й температура стічних вод знаходяться у наступних межах:

- діапазон температур вимірювального середовища, °С від +5 до + 35;
- діапазон вимірювання концентрації хрому рCr, мг/л від 1,52 до 3;
- активність іонів Cr, мг/л від 0,001 до 0,03.

А.2 Підстави для проведення проектних робіт

Підставою для проведення проектних робіт є наказ по ДонНТУ №_____ від 00.05.2018 р. про затвердження тем кваліфікаційних робіт бакалаврів.

А.3 Мета та призначення розробки

А.3.1 Мета розробки

Мета розробки – спроектувати вимірювальний пристрій концентрації іонів хрому в стічній воді, з більш високою точністю вимірювань, більш розширеними сервісними функціями та універсальністю.

А.3.2 Призначення розробки

Вимірювальний пристрій, що проектується, призначений для визначення концентрації іонів хрому в стічній воді, обробки отриманих результатів і відображення їх на індикаторі.

А.4 Джерела розробки

Технічна документація та звіт з переддипломної практики.

А.5 Технічні вимоги

А.5.1 Склад пристрою та вимоги до його складових частин

А.5.1.1 Найменування, кількість і призначення блоків пристрою

Електронний пристрій має у своєму складі такі основні функціональні блоки:

- іоноселективний електрод ІСЕ (1 шт.) – для визначення концентрації активних іонів хрому в стічних водах;

- електрометричний підсилювач ЕМП (1 шт.) – для підсилення вхідного сигналу ІСЕ;

- терморезистор (1 шт.) – для вимірювання температури стічних вод;
- вимірювальний міст ВМ (1 шт.) – перетворення сигналу терморезистору у вихідний сигнал напруги, який пропорційний зміні температури стічних вод;
- вимірювальний підсилювач ВП (1 шт.) – для підсилення вихідного сигналу вимірювального мосту, який пропорційний зміні температури стічних вод;
- нормуючий підсилювач (2 шт.) – для підсилення вихідних сигналів аналогових вимірювальних каналів для вхідного рівня аналого-цифрового перетворювача;
- мультиплексор аналогових сигналів МАС (1 шт.) – для мультиплексування сигналів із вимірювальних каналів;
- пристрій вибірки-зберігання ПВЗ (1 шт.) – для усунення додаткової динамічної похибки вимірювання концентрації іонів хрому, а також температури стічних вод;
- аналого-цифровий перетворювач АЦП (1 шт.) – для перетворення аналогових сигналів у цифрові;
- мікропроцесор (1 шт.) – для обробки отриманої інформації та управління системою;
- цифрова індикація (1 шт.) – для виводу зорової інформації про концентрацію іонів хрому безпосередньо на корпусі системи.

А.5.1.2 Конструктивні вимоги

Пристрій має бути виготовлений у вигляді одного основного блоку, який включає вимірювальний перетворювач та систему обробки інформації, габаритні розміри яких не повинні перевищувати, мм $100 \times 190 \times 50$.

А.5.1.3 Вимоги до ваги

Маса блоків вимірювального пристрою не повинна перевищувати 2,5 кг.

А.5.2 Показники призначення

Вимірювальний пристрій, що проектується, повинен забезпечувати:

- діапазон робочих температур, °С: від +5 до + 35;
- діапазон температур вимірювального середовища, °С від +5 до + 35;
- відносна похибка вимірювання температури, % $\pm 2,5$;
- діапазон вимірювання концентрації хрому pCr , мг/л від 1,52 до 3;
- активність іонів Cr , мг/л від 0,001 до 0,03.
- відносна похибка вимірювання pCr , % $\pm 2,5$;
- вихідний сигнал:

ICE – вихідна напруга (–0,1..+0,15) В, з внутрішнім опором, не більш 10 МОм; на рідкокристалічному індикаторі повинно відображатися концентрація іонів хрому й температура стічної води. Концентрація повинна відображатися з точністю до 0,1, інші величини – з точністю не гірше точності вторинного вимірювального перетворювача.

А.5.3 Вимоги до надійності

- Середній наробіток на відмову, годин не менш 25 000;
- Середній час відновлення, годин не більш 1,0;
- Імовірність безвідмовної роботи не менш 0,95.

А.5.4 Вимоги до технологічності, рівня уніфікації та стандартизації

Вимірювальний пристрій повинен бути технологічним у виготовленні та містити максимум стандартних й уніфікованих виробів.

А.5.5 Умови експлуатації

Вимірювальний пристрій, що проектується, повинен нормально

функціонувати під час впливу температури навколишнього середовища від +5 до +35°C та відносній вологості 90 % при барометричному тиску від 700 до 800 мм.рт.ст.

А.5.6 Вимоги безпеки, охорони праці, здоров'я і навколишнього середовища

Заходи щодо охорони праці потрібно розробити відповідно до НПАОП, ДСТУ, ССБТ, СНіПами, правилами по ПУЕ, ПТБ та іншими спеціальними документами та підтвердити розрахунками або обґрунтуванням із посиланням на відповідний документ.

А.6 Етапи розробки

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра відповідає стадії розробки «Технічне проектування» і повинен мати такі документи: пояснювальна записка; схема електрична структурна; схема електрична принципова; демонстраційні листи.

ДОДАТОК Б – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві

До приміщення науково-дослідного відділу й організації робочого місця з обліком шкідливих виробничих факторів пред'являється ряд вимог. Приміщення в якому знаходиться робоче місце з ПК повинно мати природне освітлення, бажано з однобічним розміщенням світопрорізів, площа осклянілості яких не повинна перевищувати 25 % від площі стіни світопрорізами. Віконні прорізи в приміщенні з ПК повинні мати регульовані жалюзі чи занавеси або інші сонцезахисні пристрої. Не допускається розташування робочих місць із ПК у підвальних і цокольних поверхах. Робочі місця з ПК рекомендується розміщати в окремих приміщеннях. Площа на одного працюючого з ПК повинна складати 6 м^2 , об'єм – 20 м^3 . Неприпустиме розташування ПК, при якому працюючий звернений обличчям, або спиною до вікон чи кімнати задньої частини ПК, у яку монтуються вентилятори.

Забороняється застосовувати для обробки інтер'єра приміщень із ПК полімерні матеріали (дерев'яностружечні плити, шпалери що миються, плівкові та рулоні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик та ін.), що виділяються в повітря шкідливі хімічні речовини, що перевищують гранично допустимі концентрації, не включені в «Перелік дозволених», МЗ» 1977-1985 р.

В лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідної роботи робочі місця з ПК розташовані від стіни з вікнами на відстані 1 м, відстань між столами складає 3 м. Екрани відеомоніторів ПК знаходяться від очей користувача на відстані 700 мм відповідно до СН 512-78, приміщення ($S=21 \text{ м}^2$, $V=73,5 \text{ м}^3$) дозволяє розташовувати більше 3 робочих місця.

Робочі місця в положенні сидячі відповідають вимогам ДСТ 12.2.032 – 78 та ДСТ 12.2.029 – 77. Поверхня робочого столу знаходиться на висоті 0,75 метрів від підлоги, розміри робочої поверхні стільниці складають 1050x590 міліметрів, розміри вільного простору для ніг під столом складає висота 650, глибина 550, ширина 450 міліметрів відповідно. Робочий стілець оснащений

підйомно-поворотнім пристроєм, що забезпечує регуляцію висоти сидіння і спинки, пневматичним і гідравлічними амортизаторами та обладнанні підлокітниками.

Б.1 Мікроклімат робочого місця

У приміщенні науково-дослідного відділу є джерела тепловиділення, тому необхідно визначити необхідні умови його вентилявання. Витрату повітря в приміщенні з додатковим тепловиділенням визначаємо за формулою:

$$L = \frac{Q_{\text{НАД}}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)}, \quad (\text{Б.1})$$

де $Q_{\text{НАД}}$ – надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.; c – теплоємність повітря (0,237 ккал/кг); p – обсягова вага повітря (1,226 кг/м³); t_B – температура витяжного повітря (30°C); t_H – температура приточного повітря (20°C).

Розрахуємо надлишкове надходження тепла за наступною формулою:

$$Q_{\text{НАД}} = Q_{\text{УСТ}} + Q_{\text{ПЕР}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{СР}}, \quad (\text{Б.2})$$

де $Q_{\text{УСТ}}$ – виділення тепла від устаткування; $Q_{\text{ПЕР}}$ – виділення тепла робітниками; $Q_{\text{ОСВ}}$ – надходження тепла від електричного освітлення; $Q_{\text{СР}}$ – надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначимо виділення тепла від устаткування за формулою:

$$Q_{\text{УСТ}} = P \cdot K_a \cdot K_o \cdot 860, \quad (\text{Б.3})$$

де P – сумарна потужність устаткування, кВт/год; K_a – коефіцієнт установленної потужності (0,95); K_o – коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$\begin{aligned} Q_{уст} &= [x_1 \cdot k_1 + x_2 \cdot k_2 + x_3 \cdot k_3 + x_4 \cdot k_4 + x_5 \cdot k_5 + x_6 \cdot k_6 + x_7 \cdot k_7 + \\ &+ x_8 \cdot k_8 + x_9 \cdot k_9] \cdot K_a \cdot K_o \cdot 860 = \\ &= [1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,15 + \\ &+ 1 \cdot 3,5] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 5131 \text{ ккал/год.} \end{aligned}$$

Визначимо виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою наступної формули:

$$Q_{пер} = n \cdot g = 2 \cdot 100 = 200 \text{ ккал/год,} \quad (\text{Б.4})$$

де n – кількість працюючих; g – кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.).

Визначимо надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

$$Q_{осв} = E_M \cdot g_1 \cdot S = 300 \cdot 0,05 \cdot 21 = 315 \text{ ккал/год,} \quad (\text{Б.5})$$

де E_M – нормована освітленість для цієї зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк; g_1 – питоме тепловиділення на 1 м² підлоги при 1 лк освітленості (для / люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.) S – площа приміщення, м².

Визначимо надходження тепла від сонячної радіації через вікна за наступною формулою:

$$Q_{сп} = F \cdot g_2 \cdot K_{осл} = 7,5 \cdot 65 \cdot 0,4 = 195 \text{ ккал/год,} \quad (\text{Б.6})$$

де F – площа віконних прорізів (3х2,5=7,5 м²); g_2 – кількість тепла, що

надходить через 1 м² віконного прорізу (65 ккал/год.); $K_{осл}$ – коефіцієнт ослаблення, приймаємо 0,4.

Визначимо кількість надлишкового тепла:

$$Q_{НАД} = Q_{УСТ} + Q_{ПЕР} + Q_{ОСВ} + Q_{СР} = 5131 + 200 + 315 + 195 = 5841 \text{ ккал/год.}$$

Визначимо витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{Q_{НАД}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)} = \frac{5848}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (30 - 20)} = 2010 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Існуюча в наявності система кондиціонування та вентилявання має продуктивність 2200 куб. м./годину, що задовольняє необхідним нормативам.

Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДНАОП 0.03.3.15 – 86 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень № 4088–86». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря та відносна вологість у холодні періоди року повинна складати (22 – 24) градуса за Цельсієм, 0,1 метра в секунду та 40-60 % відповідно. При збереженні всіх параметрів можливе коливання температури від 21 до 25 градусів Цельсія. У теплі періоди року температура повітря повинна складати (23 – 25) градусів Цельсія, рухливість повітря (0,1 – 0,2) метрів секунду, вологість (40 – 60) %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія при збереженні всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним даним приміщення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідним відділом.

Б.2.2 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розміри приміщення: довжина ($a=6$ м), ширина ($b=3,5$ м), висота ($h=3,5$ м). Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $P_{стелі} = 70 \%$, $P_{стін} = 50 \%$. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, які підвищуються до стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,4$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=200$ лк.

1) Визначимо висоту підвісу світильників над підлогою

$$h_0 = H - h_c = 3,5 - 0,4 = 3,1 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНІП П-4-79 повинна бути у межах (2,5–4,0) м, залежно від характеристики світильника. В лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідному відділу відповідає цій вимозі.

2) Визначимо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 3,5 - 0,4 = 2,8 \text{ м.}$$

Рівномірність освітлення досягається при відповідному співвідношенні відстані між світильниками (L) та висоти їх підвісу (h).

3) Визначимо рекомендовану відстань між світильниками

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,8 = 2,0 \text{ м.}$$

4) Розрахуємо необхідну кількість світильників

$$N = \frac{a \cdot b}{L^2} = \frac{6 \cdot 3,5}{2^2} = 6.$$

Приймаємо 6 світильників, враховуючи розміри приміщення розміщуємо їх у два ряди по 3 штуки.

5) Світловий потік лампи світильника (Φ_L) визначається за формулою:

$$\Phi_L = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де E – нормативна освітленість, лк; K_3 – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп; S – площа приміщення, що освітлюється, м²; Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розширювання (1,15); N – кількість світильників; n – кількість ламп у світильнику; η – коефіцієнт використання світового потоку, який визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та коефіцієнтів відбиття стін та стелі.

6) Визначимо показник приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,5}{3,5 \cdot (6 + 3,5)} = 2,21.$$

Коефіцієнт використання $\eta = 0,48$ для світильника УПМ-15 (при $i = 2,5$, $P_{стелі} = 70\%$, $P_{стін} = 50\%$)

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 21 \cdot 1,15}{6 \cdot 1 \cdot 0,48} = 1677 \text{ лм.}$$

9) обираємо лампу Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої становить 2100 лм. Хоча це значення на 18% більше розрахованого, однак не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$P_{\text{св}} = P \cdot N = 150 \cdot 6 = 900 \text{ Вт.}$$