

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра приладобудування

ГУРЗАН ТЕРЕЗА МИХАЙЛІВНА

**«АВТОМАТИЗОВАНИЙ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНИЙ
АНАЛІЗАТОР»**

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник:
Овчаренко. В. В.
канд. ф.-м. н., доцент

Ужгород – 2025

Регистрація _____
(номер)

« _____ » 2025 р. _____
(підпис)

Людмила ХАБІБУЛІНА

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

Завідувач кафедри

_____ Ігор ЧИЧУРА
(підпис)

к.ф.-м.н., доцент

« _____ » 2025 р.

Рецензент _____
(підпис)

_____ (Ім'я, Прізвище)

_____ (науковий ступінь, вчене звання)

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра приладобудування
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри
_____ (Ігор ЧИЧУРА)

« ____ » _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу

(Гурзан Терезі Михайлівні)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Автоматизований рентгенофлуоресцентний аналізатор _____

затверджена на засіданні кафедри приладобудування
протокол № ____ від 20 лютого 2025 р.

2. Строк подання здобувачем завершеної кваліфікаційної роботи: 9 червня 2025 р.

3. Перелік завдань, що підлягають опису та дослідженню (зміст розрахунково-пояснювальної записки): Вступ. Технічні вимоги. Огляд та аналіз аналогів. Принципи рентгенофлуоресцентного аналізу. Методика вимірювання. Опис роботи приладу. Розрахунки блоку обробки та живлення. Висновки. Перелік посилань. Додатки. _____

4. Перелік графічного матеріалу (за необхідності):

Схема комбінована структурна приладу (А3). Схема оптична принципова (А3). Схема електрична принципова блоку обробки та керування (А3). Схема електрична принципова блоку живлення (А3). _____

5. Консультування роботи із зазначенням розділів

Розділ	Прізвище та ініціали консультанта	Завдання видав		Завдання прийняв	
		Підпис	Дата	Підпис	Дата
1. Розрахунки передавальних характеристик	доц. Овчаренко В.В.				
2. Розрахунки електричних вузлів і систем	доц. Овчаренко В.В.				

6. Дата видачі завдання: 4 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Найменування етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Технічні вимоги	11/03/2025	
2	Огляд та аналіз аналогів	18/03/2025	
3	Принципи рентгенофлуоресцентного аналізу	01/04/2025	
4	Генерація характеристичного випромінювання	08/04/2025	
5	Методика вимірювання	15/04/2025	
6	Дифракція в кристалах	22/04/2025	
7	Опис роботи приладу	06/05/2025	
8	Розрахунки блоку обробки та живлення	13/05/2025	

Здобувач освіти _____
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної бакалаврської роботи 77: с., 8 табл., 32 рис., 10 джерел.

РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНИЙ АНАЛІЗ, СЦИНТИЛЯЦІЙНИЙ ЛІЧИЛЬНИК, АВТОМАТИЗОВАНИЙ РФ АНАЛІЗАТОР.

Об'єкт дослідження - автоматизований безконтактний аналізатор визначення Pb, Zn, Cu, Na, K, Ni, Mn, V, Cl в речовинах.

Мета роботи - розробка приладу автоматизованого безконтактного аналізатора визначення Pb, Zn, Cu, Na, K, Ni, Mn, V, Cl в речовинах. Проект включає розгляд аналогів, теоретичну частину, розробку блоку живлення та розрахунок вихідних характеристик, вибір та обґрунтування структурної та принципової схем.

Методи дослідження – аналіз принципів роботи рентгенофлуоресцентного аналізу, принципів визначення хімічного складу компонентів у речовинах та підходів до автоматизації процесів вимірювання.

У результаті виконання роботи було визначено принципи роботи рентгенофлуоресцентного спектрометра та розроблено комбіновану структурну схему приладу, визначено методи вимірювання масової долі елементів Pb, Zn, Cu, Na, K, Ni, Mn, V, Cl в пробі, створено оптичну принципову схему ПВП, розраховано блок живлення системи керування та збору інформації.

Кінцевий результат роботи може бути використаний в подальшому для навчальних цілей або розробки складніших проектів.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification bachelor's thesis: 77 pp., 8 tables, 32 figures, 10 sources.

X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS, SCINTILLATION COUNTER, AUTOMATED XRF ANALYSER.

The object of study is an automated non-contact analyser for the determination of Pb, Zn, Cu, Na, K, Ni, Mn, V, Cl in substances.

Purpose - to develop an automated non-contact analyser for the determination of Pb, Zn, Cu, Na, K, Ni, Mn, V, Cl in substances. The project includes consideration of analogues, theoretical part, development of the power supply unit and calculation of output characteristics, selection and justification of structural and schematic diagrams.

Research methods include analysis of the principles of X-ray fluorescence analysis, principles of determining the chemical composition of components in substances and approaches to automating measurement processes.

As a result of the work, the principles of operation of the X-ray fluorescence spectrometer were determined and a combined structural diagram of the device was developed, methods for measuring the mass fraction of Pb, Zn, Cu, Na, K, Ni, Mn, V, Cl in the sample were determined, an optical circuit diagram of the XRF was created, a power supply for the control system and data acquisition was calculated.

The final result of the work can be used in the future for educational purposes or the development of more complex projects.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ	9
2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АНАЛОГІВ.....	10
2.1 Компактний аналізатор.....	10
2.2 Аналізатори спеціального призначення. Відповідність RoHS	13
2.3 Багатофункціональний РФА спектрометр для високоточного аналізу.....	16
3 ПРИНЦИПИ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛІЗУ	19
3.1 Вступ в рентгенофлуоресцентний аналіз.....	19
3.2 Електромагнітне випромінювання, кванти	21
3.3 Виникнення рентгенівських променів. Модель атома Бора.....	22
3.4 Характеристичне випромінювання.....	23
3.5 Принцип випромінювання.....	24
3.6 Якісний та кількісний аналіз елементів проби.....	25
4 ГЕНЕРАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	29
4.1 Принцип РФА.....	29
4.2 Рентгенівські трубки, спектр гальмівного випромінювання.....	29
4.3 Типи трубок, генератор.....	31
4.4 Збудження характеристичного випромінювання в матеріалі зразка.....	33
4.5 Поглинання, масовий коефіцієнт ослаблення	35
4.6 Товщина шару, насичений шар.....	36
4.7 Вторинне збудження.....	38
4.8 Розсіювання спектра трубки в матеріалі проби.....	38
5 МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ	41
5.1 Детектори, спектр амплітуд імпульсів	41
5.2 Аналіз амплітуд імпульсів (РНА), розподіл амплітуд імпульсів.....	43
6 ДИФРАКЦІЯ В КРИСТАЛАХ.....	46
6.1 Основні положення.....	46

						КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизований рентгенофлуоресцентний аналізатор Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробила		Гурзан Т.М.				У	7	77
Перевірив		Овчаренко В.В.				УжНУ, ІТФ, кафедра ПБ, 4 курс, бакалаври очна форма		
Т. контр.								
Н.Контр.		Ничура І.І						
Затвердив		Ничура І.І						

ВСТУП

Сучасні технології аналізу складу матеріалів відіграють ключову роль у наукових дослідженнях, промисловості та екологічному моніторингу. Одним із найефективніших методів визначення хімічного складу речовин є рентгенофлуоресцентний (РФА) аналіз, який дозволяє швидко та безконтактно отримувати дані про концентрацію хімічних елементів у зразку.

У даній роботі розглядається розробка автоматизованого рентгенофлуоресцентного аналізатора, здатного визначати вміст Pb, Zn, Cu, Na, K, Ni, Mn, V, Cl у речовинах. Основою аналізу є сцинтиляційний лічильник, що забезпечує точність вимірювань у діапазонах 10–1000 ppm для Pb, Zn, Cu, Na, K та 20–500 ppm для Ni, Mn, V, Cl. Автоматизація процесу дозволяє підвищити швидкість обробки даних та мінімізувати людський фактор у вимірюваннях.

Ми розглянемо, як працює аналізатор, його ключові технічні характеристики, можливі помилки вимірювання, потреби в робочих налаштуваннях і способи обробки зібраних даних. Під час роботи також буде проведено аналіз особливостей системи для чіткого розуміння того, як вона працює, і роботи над проектом. Результати роботи можуть принести користь науковим лабораторіям, металургійній промисловості, контролю за навколишнім середовищем та іншим секторам, які потребують швидкого й точного визначення хімічного складу матеріалів.

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						8
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

Мета роботи націлена на розробку автоматизованого безконтактного аналізатора визначення Pb, Zn, Cu, Na, K, Ni, Mn, V, Cl в речовинах. Даний розділ встановлює чіткі вимоги до технічних параметрів приладу, завдяки чому автоматизований безконтактний аналізатор гарантуватиме точність вимірювань та стабільність роботи.

Надалі буде розглянуто більш детально принцип роботи автоматизованого безконтактного аналізатора та встановлення технічних вимог до приладу.

Нижче наведено основні положення до технічних вимог приладу для чіткого уявлення принципів подальшого проектування:

- Метод вимірювання – рентгенофлуоресцентний аналіз. Давач – сцинтиляційний лічильник.
- Діапазон вимірювання: Pb, Zn, Cu, Na, K - 10÷1000 ppm , Ni, Fe, Mn, V, Cl – 20÷500 ppm.
- Основна допустима похибка вимірювання : Pb, Zn, Cu, Na, K – $2 + 0,04X$ ppm, Ni, Mn, V, Cl – $4 + 0,04X$.
- Температура оточуючого середовища від 10 до 35°C.
- Розмір проби: діаметр до 50мм, висота до 47мм. Тиск 86,6÷106,7 кПа. Вологість при +25°C до 80%.
- Живлення від мережі 220 + % – % 10 15 В, 50±1Гц.
- Вихідна напруга блоку живлення для системи керування та обробки сигналу: $U_{вих1} = 5В$, $I_{вих1} = 1,5А$, $U_{вих2} = 12В$, $I_{вих2} = 1А$.
- Споживана потужність не більше 1 кВА.
- Час встановлення показів не більше 1 хв.
- Основний керуючий пристрій – мікроконтролер.

									Арк.
									9
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ				

2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АНАЛОГІВ

З розвитком технологій та зростанням виробничих стандартів, аналіз хімічних компонентів в різних зразках матеріалів стає чи не одним з основоположних та ключових етапів до використання якісних компонентів.

Даний розділ розглядає опис існуючих аналізаторів, що базуються на принципі рентгенівської флуоресценції. - одному із сучасних спектроскопічних методів дослідження речовини з метою отримання його елементного складу, тобто його елементного аналізу за якісним та кількісним складом.

Це допоможе встановити нам основні особливості існуючих аналізаторів, технічні характеристики та можливості використання.

2.1 Компактний аналізатор

До вашої уваги нижче, на рис 2.1, наведено найбільш швидкий, компактний і легкий рентгено-флуоресцентний аналізатор на ринку – Elvatech ProSpector 3.



Рис.2.1 - ProSpector 3 — портативний аналізатор металів та інших матеріалів

ProSpector 3 — портативний аналізатор металів та інших матеріалів нового покоління. Він відрізняється новим рівнем точності аналізу, меж виявлення елементів, високою швидкістю роботи і широким спектром застосувань. ProSpector 3 — найшвидкодійший, малогабаритний і легкий ручний рентгенофлуоресцентний аналізатор на ринку. Унікальні алгоритми обробки

						Арк.
						10
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	

даних у поєднанні з інтуїтивним інтерфейсом програмного забезпечення дають змогу з легкістю проводити високоточний елементний аналіз різних типів матеріалів — металів, сплавів, руд, пластиків, автомобільних каталізаторів та ін.

1. Продуктивність:

Висока швидкість та точність аналізу матеріалів.

2. Стабільність:

Барометрична й температурна корекція результатів для стабільної роботи у будь-яких умовах.

3. Мобільність:

Надкомпактний розмір, вага (усього 1.05 кг), 16 годин автономної роботи.

4. Надійність:

Пило- та вологозахищена конструкція зі ступенем захисту IP67.

5. Функціональність:

Дві вбудовані ССD-камери з підсвічуванням для макро- і мікротомки

6. Застосування:

- Аналіз РМІ та сплавів
- Метали
- Гірничодобувна промисловість
- Екологічний аналіз
- RoHS та WEEE
- Свинець у фарбі
- Археологія
- Глини та оксиди
- Криміналістика
- Ґрунт та відкладення
- Автомобільні каталізатори

У ProSpector 3 використовується найбільший сенсорний дисплей серед портативних аналізаторів. Розмір у 4.3" забезпечить роботу в будь-яких умовах. Унікальний дизайн відкидного дисплейного модуля забезпечує комфортну роботу аналізатора у лабораторному стенді без необхідності підключення до зовнішнього

						КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк. 11
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

ПК.

Завдяки унікальному збільшеному детектору рентгенівського випромінювання та швидкому процесору досягається швидкість обробки інформації більше ніж удвічі порівняно з будь-яким іншим аналогічним аналізатором.

Специфікація:

- Цифровий рентгенівський випромінювач digiX-50
- Анод: Rh, W
- Напруга: 50 кВ
- Струм: 200 мкА
- Потужність: 5 Вт
- 8-позиційний змінник фільтрів
- 2-позиційний змінник коліматорів

Детектор

- Тип: SDD
- Площа: 10, 30, or 40 mm²
- Роздільна здатність: <140 eV @ 5.9 keV
- Швидкість рахунку: 500,000 імп/с

Електроніка

- DPP: DAS (Dynamically Adaptive Shaping), 80 MHz АЦП
- МСА: 4096 каналів
- Дисплей: 4.3"
- Інтерфейси: USB, Bluetooth, Wi-Fi
- Візуалізація об'єкта: 2 відеокамери

Загальні

- Габарити: 236 x 193 x 68 мм
- Маса: 0.82 кг, 1.05 кг з батареєю
- Захист: IP67

Програмне забезпечення

- ОС: Windows EC7
- Кількісний аналіз: метод фундаментальних параметрів (ФПА),

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						12
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

емпіричні калібрування

В таблиці 2.1 наведено основні технічні характеристики серії ProSpector 3:

Табл. 2.1 – Характеристики моделі ProSpector 3

	ProSpector 3	ProSpector 3 Advanced	ProSpector 3 Max
Рентгенівська трубка	W, 40 кВ (опція 50 кВ)	Rh, 40 кВ (опція 50 кВ)	Rh, 50 кВ
Первинні фільтри	1	автоматичний 8-позиційний	автоматичний 8-позиційний
Коліматори	1	автоматичний 2-позиційний	автоматичний 2-позиційний
Рентгенівський детектор	SDD (опція - SDD детектор великої площі)	SDD детектор великої площі	SDD детектор ультра великої площі
Вікно детектора	Графен, 1 мкм	Графен, 1 мкм	Графен, 1 мкм
Діапазон виявлення	S - U	Mg - U	Mg - U (Na - U)
CCD камера	Опція - область аналізу	Область аналізу (опція - макрозйомка)	Область аналізу, макрозйомка
Температурна корекція	Так	Так	Так
Барометрична корекція	Ні	Так	Так
Bluetooth	Опція	Опція	Так
Wi-Fi	Опція	Опція	Так
GPS	Опція	Опція	Так
Ступінь захисту	IP65	IP65	IP67
Продув гелієм	Ні	Ні	Опція

2.2 Аналізатори спеціального призначення. Відповідність RoHS

Розглянемо один з аналізаторів спеціального призначення - Аналізатор ElvaX RoHS. Він спроектований спеціально для тестування споживчих товарів на відповідність директиві RoHS.

Директива RoHS набула чинності у 2006 році на території ЄС та контролює використання токсичних елементів (Pb, Hg, Cd, Cr, Br) в електричному та електронному обладнанні, освітлювальній апаратурі, дитячих іграшках та інших споживчих товарах.

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						13
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рентгенофлуоресцентний аналіз (РФА), як неруйнівний метод аналізу, доречний для тестування на відповідність директиві RoHS. Він дає змогу виявляти важкі метали у дуже низьких концентраціях (від 1 частини на мільйон) та забезпечує високу точність вимірювання.

Одне з першорядних особливостей ElvaX RoHS — автоматичне СІ коригування калібровок, що враховує вплив вмісту хлору у пластиках на результати виявлення концентрацій важких металів. Це дає змогу за однієї калібровки тестувати об'єкти, виготовлені з різних видів пластику (ПВХ, ПЕ та ін.), та уникнути можливих помилок при аналізі виробів із невідомого матеріалу.

Інша важлива властивість аналізатора — автоматичне коригування впливу товщини матеріалу на результати аналізу.

Представлена нижче на рисунку 2.2.



Рис.2.2 - Міні-лабораторія, призначена для високоточного аналізу на відповідність директиві RoHS

Параметри:

1. Чутливість

Завдяки високочутливому SDD-детектору пристрій дає змогу виявляти

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						14
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

небезпечні елементи у концентраціях, які в десятки разів нижчі за мінімально дозволені директивою RoHS.

2. Швидкість

Вимірювання виконується лише декілька секунд, бо прилад має швидкодіючий цифровий імпульсний процесор з технологією DAS та спеціально розроблений конверсійний фільтр.

3. Функціональність

Відеокамера, 5-позиційний змінник коліimatorів від 1 до 10 мм, вбудований комп'ютер та принтер, можливість повнофункціональної роботи при підключенні до ПК.

До прикладу, нижче в таблиці 2.2 наведено тестування повторюваності вимірювання концентрації поліетилену 10 разів по 5 секунд:

Табл.2.2 – Приклад тестування повторюваності вимірювання концентрації поліетилену 10 разів по 5 секунд.

Вимірювання	Концентрація, ppm				
	Cr	Br	Cd	Hg	Pb
1	528	237	48	480	469
2	502	224	45	475	459
3	502	230	50	472	459
4	489	230	51	465	460
5	516	234	51	473	464
6	510	232	45	471	461
7	513	233	45	477	465
8	517	234	45	476	459
9	508	237	44	476	460
10	516	231	48	471	462
Середнє	510.1	232.5	48	473.2	462
СКВ	7.9	2.6	2	7.9	3.6
% оСКВ	1.55	1.12	4.17	1.55	0.78

Специфікація

Загальне

- Розміри: 280 × 385 × 200 мм
- Аналітична камера: 185 × 212 × 90 мм
- Маса: 7 кг
- Живлення: 90 — 240 В, 50/60 Гц

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ

Арк.
15

- Споживана потужність: 40 Вт
- Батарея: 6 годин безперервної роботи
- Термопринтер: опціонально

Програмне забезпечення

- Операційна система: Windows EC
- Кількісний аналіз: Метод фундаментальних параметрів (ФПА), емпіричні калібрування

Інтерфейси

- Передача даних: 2 USB порти, картка Micro SD, Ethernet
- Введення даних: сенсорний дисплей, клавіатура, миша
- Цифровий рентгенівський випромінювач digiX-40 (опціонально digiX-50)
- Анод: W
- Напруга: 40 кВ (50 кВ)
- Струм: 200 мкА
- Потужність: 4 Вт
- 5-позиційний змінник коліматорів від 1 до 10 мм

Детектор

- Тип: CSA SDD (опція Si-PIN)
- Площа: 30 мм² (6 мм² для Si-PIN)
- Роздільна здатність: < 140 эВ (165 эВ для Si-PIN) на лінії Mn Ka

Електроніка

- DPP: DAS (Dynamically Adaptive Shaping)

2.3 Багатофункціональний РФА спектрометр для високоточного аналізу

Також, пропоную розглянути багатофункціональний аналізатор ElvaX Pro, рис 2.3.

ElvaX Pro — це новітня розробка компанії «Елватех», лабораторний рентгенофлуоресцентний аналізатор нового покоління для оперативного якісного і кількісного аналізу складу найрізноманітніших матеріалів у твердому, рідкому або порошкоподібному стані. Забезпечує найвищу точність аналізу, унікальну

						КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
							16
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

швидкість і низькі межі виявлення для широкого діапазону елементів від Na (11) до U (92) завдяки використанню нової потужної рентгенівської трубки з напругою анода до 60 кВ і струмом до 1000 мкА і SDD-детектора надвеликої площі 70 мм².



Рис 2.3 – РФА спектрометр ElvaX Pro

Переваги:

- Найшвидший у світі РФА-спектрометр (пропускна здатність понад 500 000 імпульсів/с) у поєднанні з високою точністю вимірювання
- Рентгенівська трубка з напругою до 60 кВ суттєво збільшує чутливість для елементів від Pd ($Z = 46$) до Ba ($Z = 56$) і дає змогу аналізувати рідкоземельні елементи за К-серіями
- Великий струм рентгенівської трубки до 1000 мкА збільшує точність визначення і межі виявлення для легких елементів (Na, Mg, Al, Si, P, S) і дає змогу використовувати коліматори маленького діаметра (<1 мм) для точного локального аналізу
- Автоматична зміна коліматорів для локального аналізу ювелірних виробів, зварних швів, друкованих плат та ін. Розмір зони аналізу від 1 до 10 мм.
- Продування зони аналізу газоподібним гелієм збільшує чутливість до легких елементів (Na, Mg, Al, Si, P, S) у кілька разів
- 16-ти позиційна система автоматичної зміни зразків підвищує продуктивність лабораторії
- Обертання зразків під час аналізу дає змогу аналізувати неоднорідні

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

зразки із високою точністю

- Найвища стабільність калібрувань, компенсація впливу температури і тиску навколишнього середовища
- Вбудована камера для точного позиціонування зразків

Специфікація:

- Цифровий рентгенівський випромінювач digiX-50
- Анод: Rh
- Напруга: 60 кВ
- Потужність: 12 Вт
- 8-позиційний змінник фільтрів
- 5-позиційний змінник коліматорів

Детектор

- Тип: Large area Fast SDD
- Площа: 40 мм²
- Роздільна здатність: 135 еВ на Mn K α , 80 еВ на Al K α
- Завантаження: > 500 000 імп/с

Електроніка

- DPP: DAS (Dynamically Adaptive Shaping), 80 MHz АЦП
- МСА: 4096 каналів

Загальні

- Габарити: 430 x 340 x 200 мм
- Маса: 18 кг
- Живлення: 90 - 240 В, 50/60 Гц
- Потужність: 60 Вт

Програмне забезпечення

Операційна система: Windows 7/8/10

Алгоритми аналізу: Метод фундаментальних параметрів (ФПА), в т.ч. з використанням комптонівського розсіювання, емпіричні (регресивні) калібрування, безеталонний кількісний аналіз, перевірка матеріалів на відповідність стандартам, ТУ, специфікаціям, порівняння спектрів.

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						18
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРИНЦИПИ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛІЗУ

3.1 Вступ в рентгенофлуоресцентний аналіз

Рентгенофлуоресцентний аналіз (РФА) - це швидкий, неруйнівний і екологічно чистий метод аналізу з дуже високою точністю і відтворюваністю. Всі елементи періодичної таблиці від берилію до каліфорнію можуть бути виміряні якісно, напівкількісно і кількісно в порошках, твердих і рідких речовинах. Концентрації до 100% аналізуються безпосередньо, без будь-якого розведення, з відтворюваністю краще, ніж $\pm 0,1\%$. Типові межі виявлення складають від 0,1 до 10 ppm. Більшість сучасних рентгенівських спектрометрів з модульними пристроями для зміни зразків забезпечують швидку, гнучку обробку зразків і адаптацію до специфічних для замовника процесів автоматизації.

Зразки для РФА можуть бути твердими, такими як скло, кераміка, метал, гірські породи, вугілля або пластик. Це також можуть бути рідини, такі як бензин, масло, фарба, розчини, кров або навіть вино. За допомогою рентгенофлуоресцентного спектрометра можна аналізувати як дуже малі концентрації (декілька частин на мільйон), так і дуже високі концентрації (до 100%) безпосередньо без будь-якого процесу розведення. Завдяки простоті і швидкості пробопідготовки XRF-аналіз є універсальним методом аналізу, який отримав широке визнання в галузі досліджень і промислового контролю технологічних процесів. Рентгенофлуоресцентний аналіз особливо ефективний для комплексного аналізу навколишнього середовища, а також для виробництва і контролю якості проміжних і кінцевих продуктів.

Якість підготовки зразка для рентгенофазового аналізу є щонайменше такою ж важливою, як і якість

вимірювань.

Ідеальний зразок готують так, щоб він був:

- репрезентативним для матеріалу
- однорідним
- достатньо товстим, щоб відповідати вимогам нескінченно товстого зразка

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						19
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- без нерівностей поверхні
- складався з достатньо дрібних частинок для вимірюваних довжин хвиль

Основною передумовою точного і відтворюваного аналізу є рівна, однорідна і чиста поверхня для аналізу. Для аналізу дуже легких елементів, наприклад, берилію, бору і вуглецю, флуоресцентне випромінювання, що аналізується, походить з шару, товщина якого становить лише декількох атомних шарів до декількох десятих мікрметра і який сильно залежить від матеріалу зразка (Таблиця 3.1). Тому ретельна підготовка зразка є надзвичайно важливою для аналізу легких елементів.

Табл.3.1 - Товщина шару (h, в мкм), з якого походить 90% флуоресцентного випромінювання

Sample matrix	Graphite	Glass	Iron	Lead	
Line	h_(90%, μm)	h_(90%, μm)	h_(90%, μm)	h_(90%, μm)	
U	$L\alpha_1$	28000	1735	154	22.4
Pb	$L\beta_1$	22200	1398	125	63.9
Hg	$L\alpha_1$	10750	709	65.6	34.9
W	$L\alpha_1$	6289	429	40.9	22.4
Ce	$L\beta_1$	1484	113	96.1	6.72
Ba	$L\alpha_1$	893	71.3	61.3	4.4
Sn	$L\alpha_1$	399	44.8	30.2	3.34
Cd	$K\alpha_1$	144600	8197	701	77.3
Mo	$K\alpha_1$	60580	3600	314	36.7
Zr	$K\alpha_1$	44130	2668	235	28.9
Sr	$K\alpha_1$	31620	1947	173	24.6
Br	$K\alpha_{1,2}$	18580	1183	106	55.1
As	$K\beta_1$	17773	1132	102	53
Zn	$K\alpha_{1,2}$	6861	466	44.1	24
Cu	$K\alpha_{1,2}$	5512	380	36.4	20
Ni	$K\alpha_{1,2}$	4394	307	29.8	16.6
Fe	$K\alpha_{1,2}$	2720	196	164	11.1
Mn	$K\alpha_{1,2}$	2110	155	131	9.01
Cr	$K\alpha_{1,2}$	1619	122	104	7.23
Ti	$K\alpha_{1,2}$	920	73.3	63	4.52
Ca	$K\alpha_{1,2}$	495	54.3	36.5	3.41
K	$K\alpha_{1,2}$	355	40.2	27.2	3.04
Cl	$K\alpha_{1,2}$	172	20.9	14.3	2.19
S	$K\alpha_{1,2}$	116	14.8	10.1	4.83
Si	$K\alpha_{1,2}$	48.9	16.1	4.69	2.47
Al	$K\alpha_{1,2}$	31.8	10.5	3.05	1.7
Mg	$K\alpha_{1,2}$	20	7.08	1.92	1.13
Na	$K\alpha_{1,2}$	12	5.56	1.15	0.728
F	$K\alpha_{1,2}$	3.7	1.71	0.356	0.262
O	$K\alpha_{1,2}$	1.85	2.50	0.178	0.143
N	$K\alpha_{1,2}$	0.831	1.11	0.08018	0.07133
C	$K\alpha_{1,2}$	13.6	0.424	0.03108	0.03124
B	$K\alpha_{1,2}$	4.19	0.134	0.01002	0.01166

3.2 Електромагнітне випромінювання, кванти

Щоб краще розуміти про що йде мова зануримось в теорію.

Рентгенівські промені мають, з фізичного погляду, ту ж саму природу, що і видиме світло. Видиме світло можна описати як електромагнітне випромінювання, різні кольори якого (наприклад, кольори веселки) інтерпретуються як різні довжини хвиль. Діапазон довжин хвиль електромагнітного випромінювання простягається від кілометрового діапазону радіохвиль до пікометрового діапазону (10-12 м) жорсткого гамма-випромінювання (Таблиця 3.2).

Табл.3.2 - Діапазон енергій і довжин хвиль електромагнітного випромінювання

Діапазон енергій (кеВ)	Діапазон довжин хвиль	Назва
$< 10^{-7}$	від см до км	Радіохвилі (короткі, середні, довгі хвилі)
$< 10^{-3}$	від мкм до см	Мікрохвилі
$< 10^{-3}$	від мкм до мм	Інфрачервоне випромінювання
0,0017 - 0,0033	від 380 до 750 нм	Видиме світло
0,0033 - 0,1	від 10 до 380 нм	Ультрафіолетове випромінювання
0,11	від 0,01 до 12 нм	Рентгенівське випромінювання
10 - 5000	від 0,0002 до 0,12 нм	Гамма-випромінювання

Надалі для довжини хвилі λ (= лямбда) застосовуватиметься одиниця виміру нанометр (нм = 10^{-9} м), а для енергії E - одиниця виміру кілоелектрон-вольт (кеВ).

Рентгенофлуоресцентний аналіз охоплює такі діапазони енергій або довжин хвиль:

$$E = 0,11 - 60 \text{ кеВ}$$

$$\lambda = 11,3 - 0,02 \text{ нм}$$

Поряд із хвильовими властивостями світло має також і корпускулярні властивості. У зв'язку з цим ми зазвичай вживаємо термін фотон або квант світла.

У подальшому ми будемо використовувати позначення кванти або рентгенівські кванти. Як одиницю вимірювання інтенсивності ми вживаємо число

рентгенівських квантів, виміряних за секунду, імп/с (= кількість імпульсів за секунду) або кімп/с (= кількість кілоімпульсів за секунду).

3.3 Виникнення рентгенівських променів. Модель атома Бора

Електромагнітне випромінювання може виникнути завжди, коли електрично заряджені частинки, особливо електрони, внаслідок якоїсь зміни втрачають енергію свого стану руху. Це може статися, наприклад, під час гальмування, зміни напрямку руху або переходу на нижчий енергетичний рівень в електронній оболонці атома. У генерації рентгенівського випромінювання в діапазоні рентгенівської аналітики важливу роль відіграють процеси гальмування електронів та їхні переходи з деякого енергетичного рівня в електронній оболонці атома на нижчий рівень. Для розуміння процесів, що відбуваються в електронній оболонці атома, необхідно зупинитися на моделі атома Бора на рис 3.2.

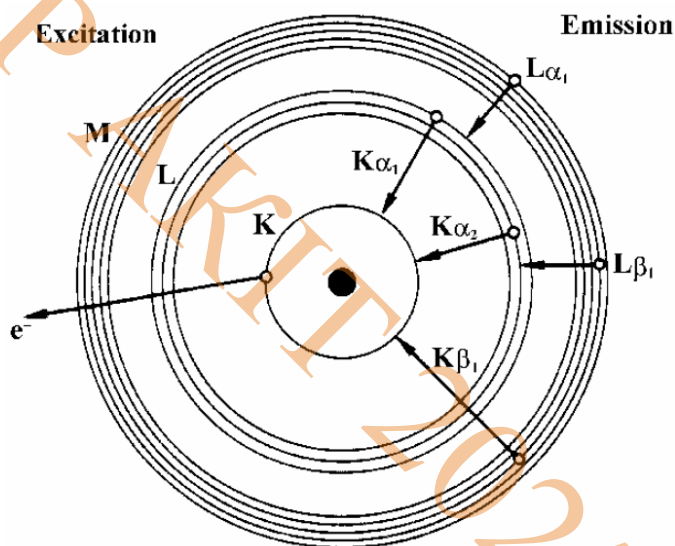


Рис.3.1 - Модель атома Бора описує будову атома у вигляді атомного ядра, оточеного електронними оболонками

Позитивно заряджене ядро оточене електронами, які обертаються в певних областях простору (оболонках). Електрони різних оболонок або рівнів різко різняться за силою свого зв'язку з атомним ядром, тобто вони різняться за своїми енергіями. При цьому говорять про енергетичні рівні або енергетичні оболонки. Це означає, що для того, щоб видалити електрон з самої внутрішньої оболонки атома, необхідна точно визначена мінімальна енергія. Щоб видалити електрон із другої внутрішньої оболонки атома, необхідна точно визначена мінімальна

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

енергія, менша за ту, що необхідна для видалення найвнутрішніших електронів. Зв'язок електронів в атомі тим слабший, чим далі вони віддалені від атомного ядра. Мінімальна енергія, необхідна для видалення електрона з атома, і, таким чином, енергія, з якою електрон пов'язаний з атомом, називається також енергією зв'язку електрона в атомі. Енергія зв'язку електрона в атомі встановлюється, в основному, в результаті визначення поглиненої енергії, за якої відбувається процес поглинання атомом випромінювання. Тому в літературі дуже часто зустрічається поняття край поглинання:

енергетичний рівень = енергія зв'язку = край поглинання

Окремі оболонки позначають буквами K, L, M, N, ..., причому найвнутрішніша оболонка називається K-оболонкою, наступна за нею - L-оболонкою тощо. K-оболонка зайнята 2 електронами, L-оболонка має три підрівня і може в сукупності містити до 8 електронів. M-оболонка має п'ять підрівнів і може містити до 18 електронів.

3.4 Характеристичне випромінювання

Кожен елемент однозначно визначається його атомним номером Z у Періодичній системі елементів або за числом його електронів у нейтральному стані. Завдяки різному числу електронів (носіїв негативного заряду) або числу Z позитивних зарядів в атомному ядрі (= атомний номер) енергії зв'язку або енергетичні рівні в кожному елементі є різними й характеристичними для кожного елемента.

Нехай тепер один з електронів внутрішньої оболонки видалено з атома в результаті опромінення. Вакансія, що утворилася таким чином, заповнюється електроном з більш високої оболонки. При цьому вивільняється енергія, що відповідає різниці енергетичних рівнів, які беруть участь у цьому процесі.

Енергія, що вивільнилася, або емітується у вигляді рентгенівських квантів, або передається іншому електрону оболонки (ефект Оже). Імовірність утворення рентгенівського кванта в цьому процесі називається виходом флуоресценції ω . Вона залежить від атомного номера елемента й оболонки, в якій утворилася вакансія. Для легких елементів ω дуже мала (приблизно 10^{-4} для бору) і швидко досягає значення 1 для K-оболонки важчих елементів (наприклад, урану). Однак

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк. 23
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вирішальним фактом є те, що енергія або довжина хвилі рентгенівського кванта є характеристичною для елемента, з якого він був емітований. Це випромінювання називається характеристичним рентгенівським випромінюванням.

Такою є основа визначення хімічних елементів за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу.

3.5 Принцип випромінювання

Енергія рентгенівського кванта визначається різницею енергій відповідних енергетичних рівнів. К-випромінюванням називається те випромінювання, яке утворюється під час заповнення К-оболонки; L-випромінюванням називається те випромінювання, яке утворюється під час заповнення L-оболонки тощо (рис. 3.2.).

До повного позначення емітованої рентгенівської лінії належить ще інформація про те, з якої оболонки походить той електрон, який заповнює вакансію, що утворилася. При цьому використовують грецькі літери α , β , γ , з нумерацією 1, 2, 3, для встановлення відмінностей між різними оболонками та підрівнями.

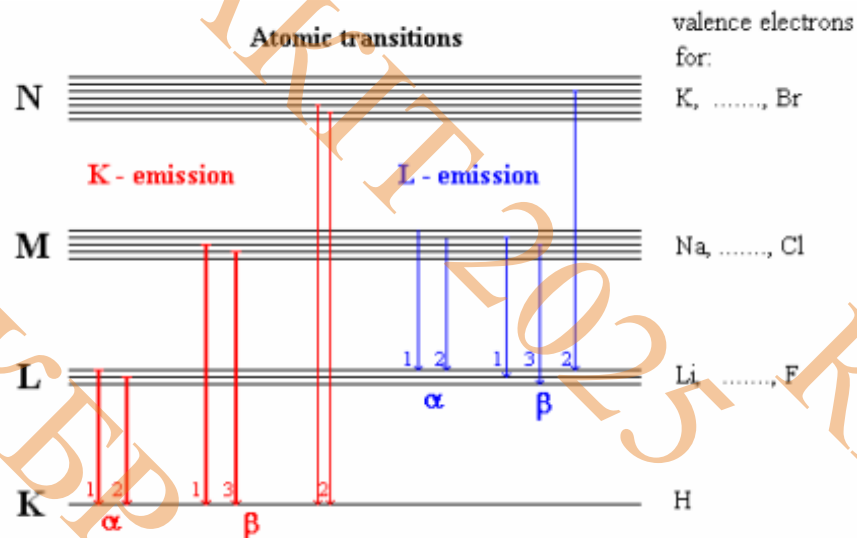


Рис.3.2 - Позначення рентгенівських ліній

Приклади:

$K\alpha_1$ електрон з LIII-підрівня в К-оболонці (KA1)

$K\alpha_2$ електрон з LII-підрівня в К-оболонці (KA2)

$K\alpha_{1,2}$ коли обидві лінії не можуть бути дозволені спектрометром: KA1,2

$K\beta_1$ електрон з M-підрівня в К-оболонці (KB1)

$L\alpha_1$ електрон з M-підрівня в L-оболонці (LA1)

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк. 24
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.6 Якісний та кількісний аналіз елементів проби

Коли фотони високої енергії (рентгенівські або гамма-промені) поглинаються атомами, електрони внутрішньої оболонки викидаються з атома, стаючи «фотоелектронами». Це залишає атом у збудженому стані з вакансією у внутрішній оболонці.

Потім електрони зовнішньої оболонки потрапляють у вакансію, випускаючи фотони з енергією, що дорівнює різниці енергій між двома станами. Оскільки кожен елемент має унікальний набір енергетичних рівнів, кожен елемент випромінює шаблон рентгенівського випромінювання, характерний для елемента, який називається «характеристичне рентгенівське випромінювання». Інтенсивність рентгенівського випромінювання зростає зі збільшенням концентрації відповідного елемента.

Деякі типові оптичні спектри показані нижче на рис 3.3.

Внутрішні оболонки важчих елементів мають вищу енергію зв'язку, тому виробляють фотони в діапазоні довжин хвиль рентгенівського випромінювання.

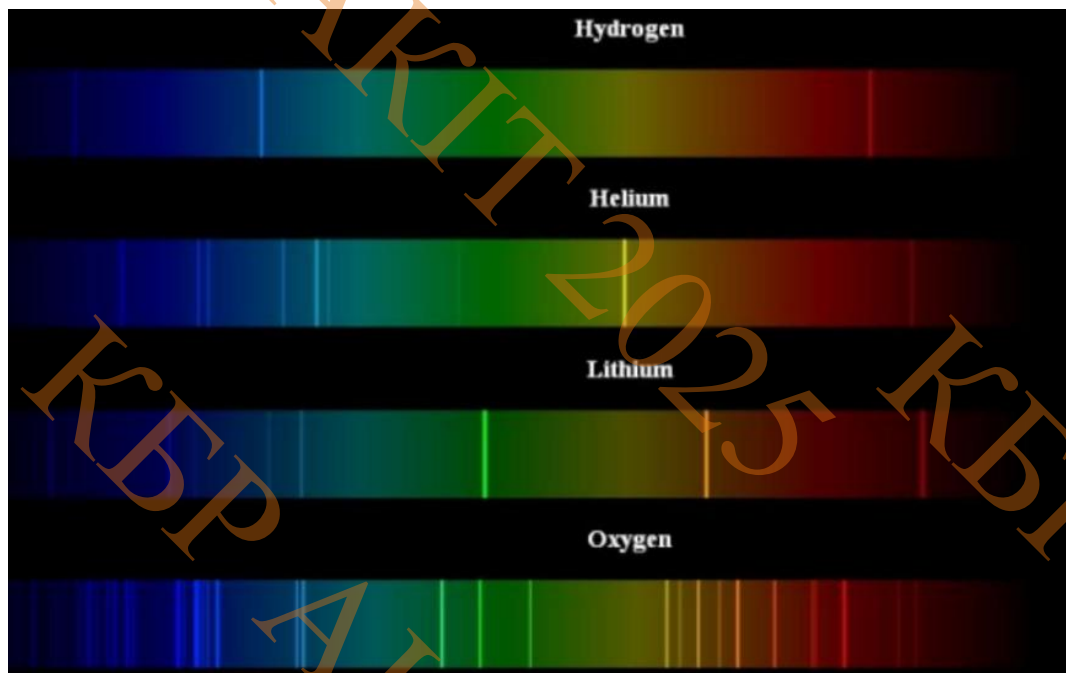


Рис. 3.3 - Спектри оптичного випромінювання

Характеристичне рентгенівське випромінювання випромінюється елементами, коли їх електрони здійснюють переходи між рівнями атомної енергії. Якщо електрон переходить з рівня з енергією E_i на рівень з енергією E_j , випромінюване рентгенівське

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						25
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випромінювання має енергію:

$$E_X = E_i - E_j \quad [3.1]$$

Оскільки кожен елемент має унікальний набір рівнів атомної енергії, він випромінює унікальний набір рентгенівських променів, характерних для цього елемента.

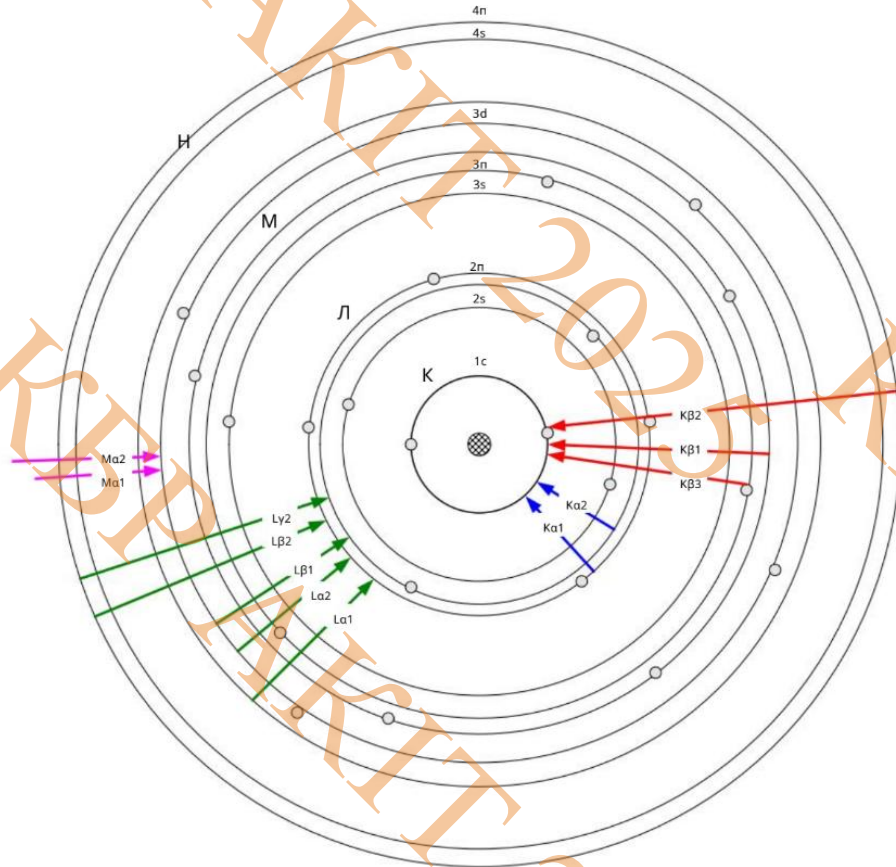


Рис. 3.4 – Приклад атома з енергетичними рівнями

Наведений вище рисунок 3.4 є ескізом атома, що показує різні атомні рівні, позначені K, L, M, N, ... Кожен із них має додаткові підоболонки. Характерні рентгенівські промені виникають через переходи між цими оболонками. На рисунку показано, як називаються лінії: АК рентген виникає в результаті переходу в оболонку К від зовнішньої оболонки і так далі. Наприклад, рентгенівське випромінювання $K\alpha_1$ виникає, коли в К-оболонці є вакансія, і електрон падає з оболонки М3, щоб заповнити її. Потім атом випромінює рентгенівське проміння з енергією, що відповідає різниці: $E_{Xray} = E_K - E_{M3}$.

На рисунку 3.5 показано виміряне характеристичне рентгенівське випромінювання, випромінюване свинцем.

Електрони К-оболонки мають енергію зв'язку 88,04 кеВ. Лінії $K\beta$

						Арк. 26
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	

відповідають переходам з оболонок M і N з енергіями 85 і 87 кеВ. Лінії Ка виникають через переходи з L-оболонок з енергією 72 і 75 кеВ. L-лінії виникають в результаті переходів на L-оболонку з енергією від 10 до 15 кеВ. Лінії М виникають через переходи до зовнішніх оболонок М і мають енергію близько 2,5 кеВ.

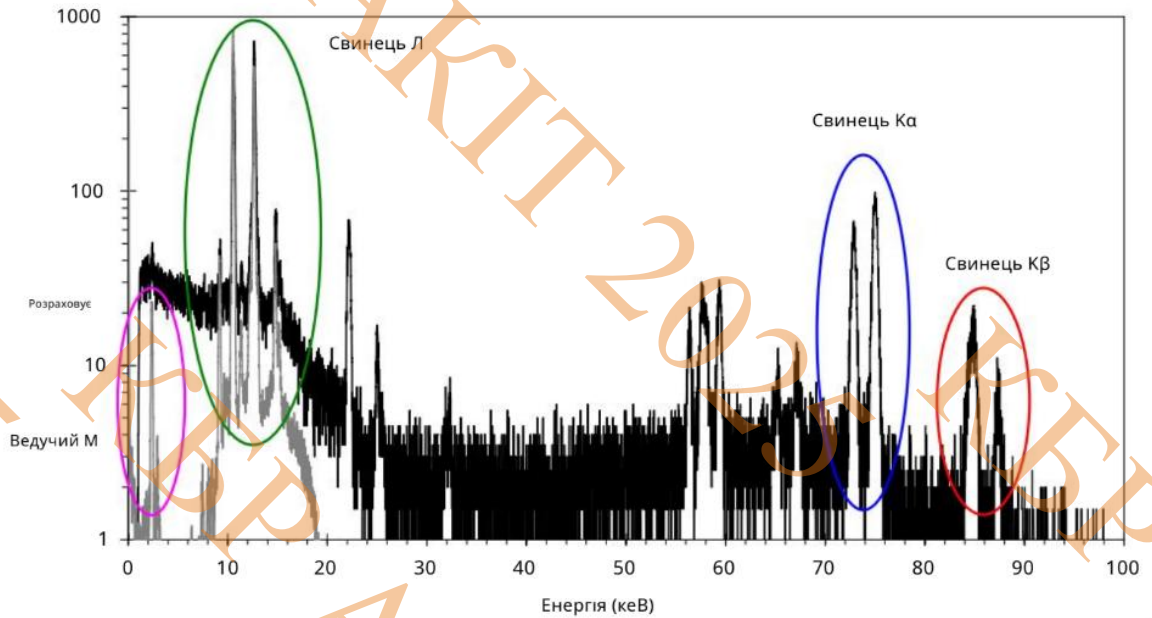


Рис. 3.5 – Характеристичне випромінювання свинцю

Енергії характеристичних рентгенівських ліній залежать лише від атомних енергетичних рівнів, тому завжди однакові.

Вимірjana інтенсивність ліній випромінювання залежить від кількості відповідних атомів у зразку, які були збуджені, а також від багатьох інших параметрів. Ймовірність рентгенівського випромінювання залежить від елемента і від енергії джерела збудження.

Ймовірність виявлення рентгенівського випромінювання залежить від чутливості детектора, ослаблення в самому зразку тощо.

На рисунку 3.6 нижче порівнюються спектри трьох чистих елементів і спектр, взятий із зразка латуні. Латунь - це сплав Cu-Zn, який часто містить невелику кількість Pb та інших елементів. Лінії Cu і Zn дуже чітко видно, зі слабкими лініями Pb. Наявність цих ліній свідчить про наявність цих елементів.

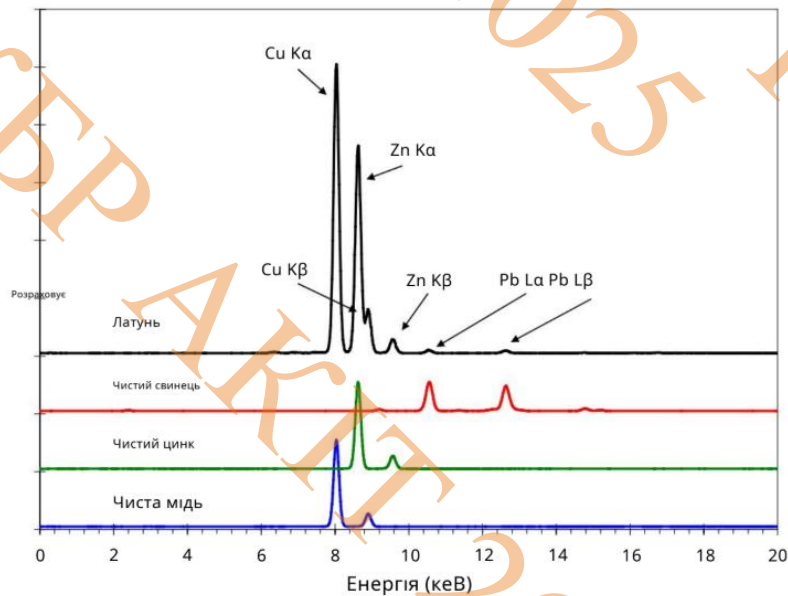


Рис. 3.6 – Спектри елементів латуні

Інтенсивність характерних рентгенівських ліній пов'язана з концентрацією елемента в зразку, але зв'язок не простий. Виміряна інтенсивність однієї лінії випромінювання, скажімо Cu Ka.

Пік вище, залежить від енергетичного спектру та інтенсивності збуджуючого рентгенівського випромінювання, від ефективності детектора рентгенівського випромінювання та від геометрії джерела та зразка. Це також залежить від інших елементів у зразку: деякі з рентгенівських променів Zn Ka взаємодіють з атомами Cu в зразку латуні, посилюючи лінії Cu та зменшуючи лінії Zn. Вони відомі як матричні ефекти, що показано на рисунку 3.7.

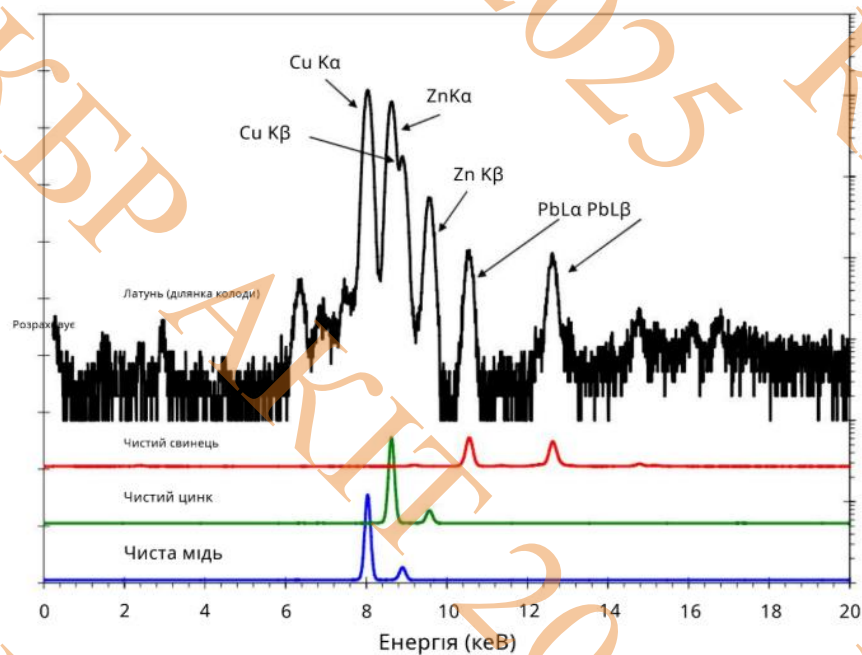


Рис. 3.7 – Повний спектр випромінювання латуні

					Арк. 28
КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

4 ГЕНЕРАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

4.1 Принцип РФА

Метою рентгенофлуоресцентного аналізу є якісне та кількісне визначення хімічних елементів шляхом вимірювання їхнього характерного випромінювання. Для цього хімічні елементи в зразку повинні бути змушені випромінювати рентгенівське випромінювання. Оскільки характерне рентгенівське випромінювання виникає лише при переході електронів атомної оболонки на нижчі, вакантні енергетичні рівні атома, необхідно застосовувати метод, який підходить для вивільнення електронів з внутрішньої оболонки атома. Це передбачає додавання внутрішнім електронам енергії, яка є вищою за енергію, що зв'язує їх ніж енергія, що зв'язує їх з атомом.

Це можна зробити кількома способами:

- Опромінення за допомогою елементарних частинок достатньої енергії (електронів, протонів, α -частинок тощо), які передають енергію, необхідну для випускання, електронам атомної оболонки під час процесів зіткнення
- Опромінення рентгенівськими або гамма-променями від радіонуклідів
- Опромінення рентгенівськими променями з рентгенівської трубки

Використання рентгенівської трубки тут виявляється технічно найпростішим і, з точки зору радіаційного захисту, найбезпечнішим рішенням радіаційного захисту, найбезпечнішим рішенням (рентгенівську трубку можна вимкнути, а радіонуклід - ні).

4.2 Рентгенівські трубки, спектр гальмівного випромінювання

У рентгенівській трубці електрони прискорюються в електричному полі і спрямовуються до матеріалу мішені, де вони гальмуються. Технічно це реалізується таким чином, що між нагрітим катодом (наприклад, спіральна нитка розжарення) і анодом з відповідного матеріалу прикладається сильне електричне поле. Електрони випускаються з нагрітого матеріалу катода і прискорюються, завдяки прикладеній високій напрузі, у напрямку анода. Далі вони проникають у матеріал анода і втрачають там свою енергію внаслідок гальмування. Тільки мала частина енергетичних втрат електронів (прим. 1-2 % на матеріал анода)

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						29
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випускається у вигляді рентгенівських квантів. Більша частина енергії йде на нагрівання матеріалу анода. Звідси випливає, що анод повинен охолоджуватися. Технічно це реалізується за допомогою підключення циркуляційного контуру водяного охолодження.

Частина енергетичних втрат електрона, що емітується у вигляді рентгенівських квантів, може перебувати між нулем і максимальною енергією, що була набута електроном, завдяки прискоренню в електричному полі. Якщо між анодом і катодом прикладена напруга 30 кВ (кіловольт), то електрони набувають енергію 30 кеВ (кілоелектрон-вольт) при проходженні цієї напруги. (Визначення: 1 еВ = енергія, якої набуває електрон під час проходження напруги 1 В).

При гальмуванні в матеріалі анода може бути досягнута максимальна рентгенівська енергія 30 кеВ, тобто розподіл багатьох рентгенівських квантів за енергіями лежить у діапазоні від нуля до максимальної енергії. Представляючи інтенсивність цього виду рентгенівських променів залежно від енергії, отримують спектр гальмівного випромінювання трубки.

На додаток до спектра гальмівного випромінювання рентгенівська трубка емітує, звісно, і характеристичне випромінювання, яке має особливу важливість для флуоресцентного аналізу (Рис. 4.1)

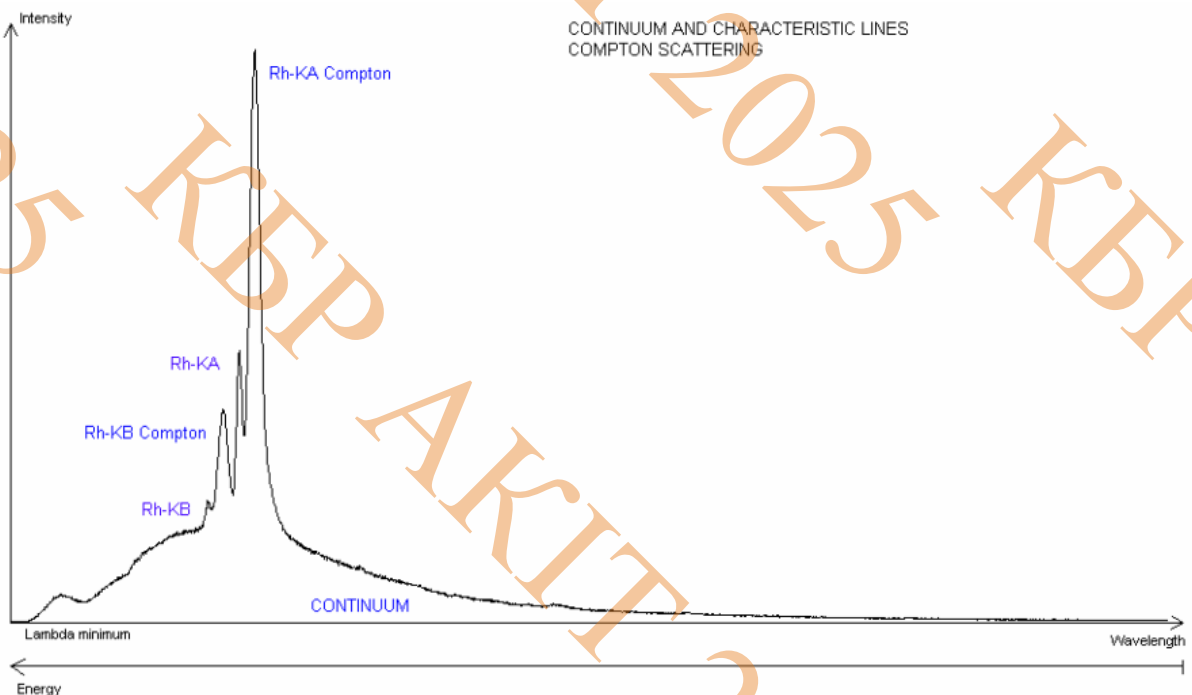


Рис.4.1 - Спектр гальмівного випромінювання з характеристичним випромінюванням матеріалу анода

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк. 30
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.3 Типи трубок, генератор

Усі рентгенівські трубки працюють за однаковим принципом: прискорення електронів в електричному полі та їх гальмування у відповідному матеріалі анода. При цьому необхідно вакуумувати шлях проходження пучка, щоб уникнути зіткнення з газовими молекулами. Усередині корпусу, тому, створюється вакуум. Вихід рентгенівського випромінювання з корпусу здійснюється через тонке берилієве вікно, проникне для цього випромінювання.

Основні відмінності між типами трубок полягають у полярності анода і катода, а також у розташуванні вихідних вікон. Два найважливіші типи - це трубка з торцевим вікном (її також називають трубкою з кінцевим вікном) і трубка з бічним вікном.

1. Трубка з боковим вікном

У трубці з боковим вікном до катода прикладена негативна напруга. Електрони випускаються нагрітим катодом і прискорюються в напрямку анода. Анод перебуває під нульовим потенціалом. Таким чином, різниця потенціалів між анодом і матеріалом корпусу з бічним вихідним вікном відсутня (Рис. 4.2)

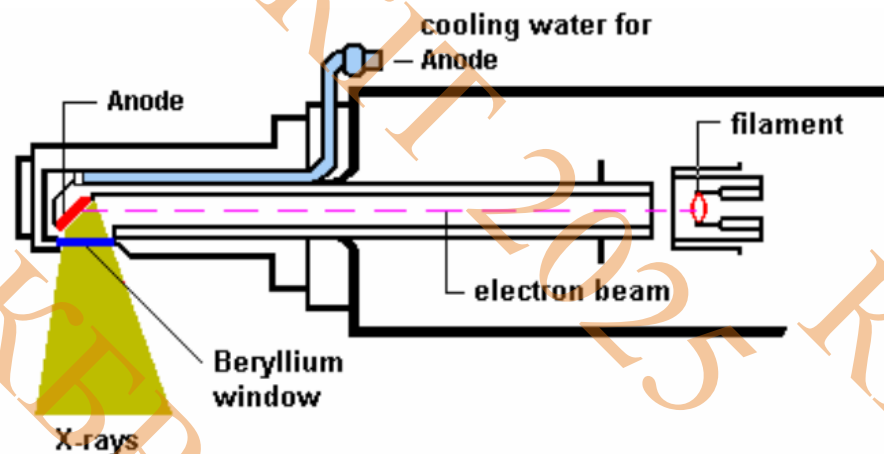


Рис.4.2 - Принципова будова трубки з боковим вікном

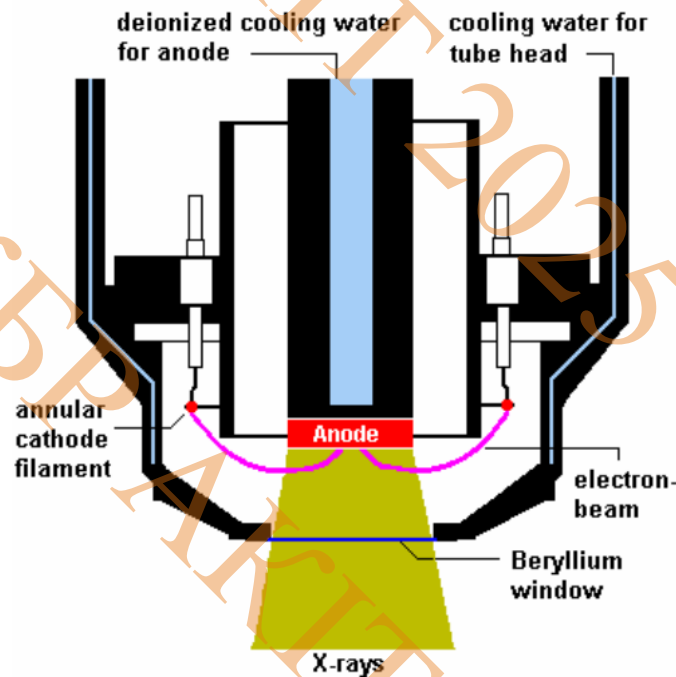
З фізичних основ випливає, що частина електронів завжди буде розсіюватися на поверхні анода. Число цих зворотно розсіяних електронів залежить від матеріалу анода і може становити до 40 %. У трубці з бічним вікном зворотно розсіяні електрони сприяють нагріванню навколишніх матеріалів, особливо бічного вікна. Тому вихідне вікно має бути стійким до високих термічних навантажень і не може бути дуже тонким. Мінімальна товщина берилієвих вікон, що використовуються в трубках з боковим вікном, становить 300 мкм. Це

						КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк. 31
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

призводить до занадто високого поглинання низькоенергетичного характеристичного L-випромінювання матеріалу анода у вихідному вікні та, у зв'язку з цим, до обмеження у збудженні легших елементів у пробі.

2. Трубка з торцевим вікном

Трубка з торцевим вікном вирізняється тим, що до анода прикладена позитивна висока напруга, а берилієве вихідне вікно розташоване на торцевому боці корпусу трубки (Рис. 4.3).



4.3 - Принципова будова трубки з торцевим вікном

Кільцевий катод розташовується навколо анода і перебуває під нульовим потенціалом. Електрони випускаються нагрітим катодом і прискорюються в напрямку електричних силових ліній над анодом. Завдяки тому факту, що між позитивно зарядженим анодом і навколишнім матеріалом, включно з берилієвим вікном, є різниця потенціалів, зворотно розсіяні електрони за фізичними умовами прямуватимуть назад до анода. При цьому вихідне вікно не буде нагріватися. Берилієве вікно залишається «холодним» і, тому, може бути значно тоншим порівняно з трубкою з бічним вікном. Зазвичай використовуються вікна з товщиною 125 і 75 мкм. Ця умова виконується для того, щоб легкі елементи збуджувалися характеристичним L-випромінюванням матеріалу анода (наприклад, родію).

Через прикладену високу напругу для охолодження анода повинна

						КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
							32
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

застосовуватися неелектропровідна, деіонізована вода. Прилади з трубками з торцевим вікном з цієї причини забезпечені замкнутим внутрішнім контуром водяного охолодження з деіонізованою водою, яка також охолоджує головну частину трубки. З початку 80-х років усіма відомими виробниками хвиледисперсійних рентгенофлуоресцентних спектрометрів використовуються трубки з торцевим вікном.

3. Генератор

Струм і висока напруга для рентгенівської трубки, а також струм нагріву для розжарюваного катода виробляються в так званому рентгенівському генераторі. Наявні сьогодні в розпорядженні генератори виробляють струм трубки аж до максимального значення 150 мА і максимальну високу напругу 60 кВ за максимальної потужності 4 кВт. Тобто струм і напруга мають бути обрані таким чином, щоб не було перевищено значення 4 кВт. Сучасна керуюча електроніка та програмне забезпечення виконані таким чином, що неправильні установки, які можуть призвести до пошкодження трубки, виключені. Обмеження максимальної потужності збудження величиною 1 кВт дає змогу відмовитися від зовнішнього водяного охолодження і, відповідно, спростити установчі умови.

4.4 Збудження характеристичного випромінювання в матеріалі зразка

Для збудження характеристичного випромінювання елемента в матеріалі проби використовуються гальмівне випромінювання і характеристичне випромінювання матеріалу анода рентгенівської трубки. Дуже важливо знати, що хімічний елемент у пробі може емітувати рентгенівське випромінювання тоді, коли енергія збуджувальних рентгенівських квантів вища, ніж енергія зв'язку (край поглинання) внутрішнього електрона елемента. Під час опромінення проби з рентгенівською напругою, наприклад, 20 кВ, максимальна енергія квантів, що емітуються трубкою, становить 20 кеВ. Тому, наприклад, неможливо збудити К-випромінювання елементів з атомним номером $Z > 43$, оскільки енергія зв'язку їхнього К-рівня вища за 20 кеВ. Порушення К-випромінювання важчих елементів здійснюється за напруги генератора 60 кеВ.

Як стандартний матеріал анода всіма відомими виробниками використовується родій (Rh), оскільки характеристичне випромінювання цього

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						33
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

елемента одночасно підходить для збудження важких і легких елементів. У Таблиці 4.1 наведено енергії та довжини хвиль характеристичних ліній родію, а також найважчі елементи, які можуть бути збуджені за допомогою тієї чи іншої з перерахованих у таблиці ліній.

Табл.4.1 - Енергії та довжини хвиль характеристичних ліній родію

Лінія	Енергія	Довжина хвилі	Найважчий елемент
Rh Ka1	20,214 кеВ	кеВ 0,0613 нм	Молібден (Mo)
Rh Ka2	20,072 кеВ	0,0617 нм	Тантал (Ta)
Rh Ka1	22.721 кеВ	0.0546 нм	Рутеній (Ru)
Rh La1,2	2.694 кеВ	0.4601 нм	Сірка (S)
Rh La1	2.834 кеВ	0.4374 нм	Хлор (Cl)

З Таблиці 4.1 випливає, що:

- К-лінії важких елементів від родію до танталу (Ta) принципово можуть бути збуджені тільки за допомогою гальмівного випромінювання родієвої трубки, оскільки енергії родієвих ліній для цього не вистачає. У цьому випадку рекомендується встановлювати напругу генератора 60 кеВ.

- Елементи до молібдену (Mo) збуджуються Rh К-випромінюванням. Rh KB1-випромінювання може вже збудити елемент рутеній (Ru), але це випромінювання має низьку інтенсивність порівняно з Rh KA-випромінюванням.

- Легкі елементи до сірки (S) дуже ефективно збуджуються Rh L-випромінюванням.

- Rh LB1-випромінювання збуджує вже елемент хлор (Cl), але має низьку інтенсивність. Вирішальне значення для застосування Rh L-випромінювання незмінної інтенсивності має товщина берилієвого вихідного вікна трубки.

Для спеціальних застосувань замість родію як матеріалу анода застосовуються інші елементи. Вольфрам (W) і золото (Au) особливо підходять для збудження важчих елементів за допомогою гальмівного випромінювання. Хром (Cr) часто використовується в трубках з боковим вікном для збудження легких елементів. Молібден (Mo) нерідко застосовується для вільного від перешкод визначення родію і, наприклад, кадмію (Cd).

Застосування родієвої трубки з торцевим вікном як «універсальної трубки» повністю виправдане, оскільки легкі елементи збуджуються значно краще за

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						34
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допомогою Rh L-випромінювання, ніж за допомогою K-випромінювання хромового анода.

4.5 Поглинання, масовий коефіцієнт ослаблення

Під час проходження рентгенівського випромінювання через матерію відбувається ослаблення його інтенсивності. Ступінь ослаблення залежить як від енергії випромінювання, так і від хімічного складу поглинаючого матеріалу (наприклад, проби). Важкі елементи поглинають сильніше, ніж легкі: свинець завтовшки 1 мм поглинає високоенергетичні промені, що випускаються під час рентгенівської флуоресценції, повністю, а поліпропілен (вуглеводень) завтовшки 1 мм майже проникний для високоенергетичного рентгенівського випромінювання. Рентгенівські кванти з меншою енергією поглинаються сильніше, ніж кванти з більшою енергією (= мала довжина хвилі): кванти, що емітуються з елемента бору, мають, наприклад, дуже малу енергію 1,185 кеВ (= 67 нм) і майже повністю поглинаються вже в плівці поліпропілену товщиною 6 мкм.

Нехай рентгенівський промінь із квантами, що володіють енергією E , і з інтенсивністю I_0 проходить через шар матеріалу, наприклад, лист чистого заліза (Fe) товщиною 1 мм. Тоді на виході з шару заліза внаслідок поглинання цей промінь матиме інтенсивність $I < I_0$. Взаємозв'язок між I і I_0 після проходження через шар товщиною x описується законом поглинання [4.1]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad [4.1]$$

μ = лінійний коефіцієнт поглинання

Лінійний коефіцієнт поглинання має розмірність [1/см]. Він залежить від енергії або довжини хвилі поглинаємих рентгенівських квантів і від густини ρ того матеріалу, через який проходить випромінювання (ρ у [г/см³]).

Замінюючи у вищевказаному прикладі аркуш заліза на шар порошку заліза завтовшки 1 мм, отримаємо, що поглинання в ньому слабкіше, тому що густина поглиначів менша. Питомою характеристикою поглинання елемента Fe є не лінійний коефіцієнт поглинання, а коефіцієнт, пов'язаний із густиною ρ поглинаючого матеріалу

μ / ρ = масовий коефіцієнт ослаблення

Масовий коефіцієнт ослаблення має розмірність [см²/г]. Він залежить лише

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						35
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

від атомного номера елемента, що поглинає, і від енергії або довжини хвилі поглинаємих рентгенівських квантів.

На рис. 4.4 схематично показано вид залежності масового коефіцієнта ослаблення від енергії або довжини хвилі.

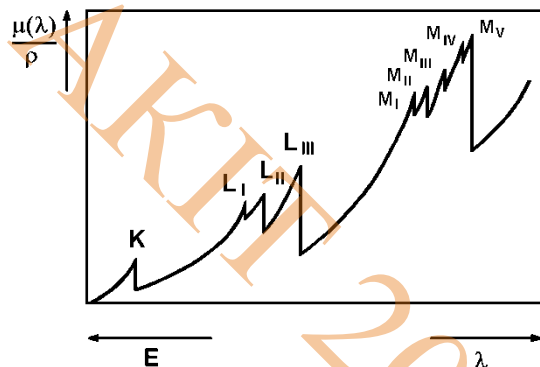


Рис.4.4 - Схематичний вигляд залежності масового коефіцієнта ослаблення від енергії або довжини хвилі

З Рис. 4.4 випливає, що:

- При збільшенні енергії коефіцієнт загалом зменшується, тобто, чим більша енергія рентгенівських квантів, тим менше вона поглинається.

- Стрибкоподібні зміни масового коефіцієнта ослаблення вказують на енергії зв'язку електронів у відповідних оболонках. Якщо рентгенівський квант має енергію, яка відповідає енергії зв'язку електрона у відповідній оболонці, то виникає ситуація, коли квант повністю передає свою енергію цьому електрону, і електрон видаляється з атома. Поглинання відбувається стрибкоподібно. Кванти, енергія яких лише незначно менша за край поглинання, поглинаються помітно менше.

Приклад:

K-випромінювання заліза (Fe) поглинається менше сусіднім елементом марганцем (Mn), ніж елементом хромом (Cr), оскільки Fe K_{A1,2}-лінія лежить нижче за край поглинання Mn, але вище за край поглинання Cr.

4.6 Товщина шару, насичений шар

Що сильніше поглинається випромінювання елемента в пробі, то меншою є товщина шару проби, з якого приходять вимірюване випромінювання. Імовірність вимірювання K-альфа кванта елемента молібдену (Mo K_{A1}, 17,5 кеВ) з глибини 0,5 мм на аналізованій поверхні сталі істотно вища, ніж у випадку кванта вуглецю

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						36
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(С КА1,2, 0,282 кеВ). Звідси випливає висновок про те, що під час аналізу різних елементів у пробі свій внесок у вимірювання вносять також де-факто шари різної товщини. Під час аналізу дуже легких елементів, наприклад, у твердому тілі (таких як, наприклад, Ве, В, С, ...) необхідно мати рівну поверхню проби, тому що їхнє випромінювання виходить із шару завтовшки всього лише в кілька атомних шарів. Випромінювання з більш глибоких шарів практично повністю поглинається.

Проба вважається нескінченно товстою для компонента випромінювання, якщо товщина проби достатня для того, щоб практично повністю поглинути випромінювання зворотного боку проби. Так, наприклад, проба цементу товщиною 1 мм є практично нескінченно товстою для Fe КА1,2-випромінювання, оскільки випромінювання атомів заліза на зворотному боці проби майже повністю поглинається матеріалом проби. Шар проби з товщиною, достатньою, щоб поглинути випромінювання лінії елемента на великому процентному рівні (наприклад, 90 %), називається насиченим шаром.

Необхідно з обережністю підходити до проб, що складаються з легких матриць, як, наприклад, рідини або полімери (вуглеводні). Для високоенергетичного випромінювання важких елементів у цьому випадку легко досяжні високі значення товщини насиченого шару (наприклад, 10 см). Проби такої товщини зазвичай не застосовуються на практиці. До того ж для цієї групи матеріалів слід звернути увагу на те, що в кількісному аналізі потрібно використовувати однакові кількості проби, оскільки виміряна інтенсивність може залежати від товщини проби.

Нанесення рідких проб на фільтрувальний папір - це метод, за якого ефект поглинання практично виключений. У цьому випадку говорять про нескінченно тонку пробу.

Розрахунок товщин шарів у певних матеріалах, що використовуються в аналізі, включено сьогодні в пакети сучасного програмного забезпечення.

Список різних товщин шарів, з яких виходить 90 % флуоресцентного випромінювання, для різних матеріалів наведено в Таблиці 3.1.

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						37
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.7 Вторинне збудження

У тісному взаємозв'язку з поглинанням генерованого рентгенівського випромінювання в пробі перебуває вторинне збудження, тобто рентгенівські кванти, що виникають у пробі внаслідок поглинання випромінювання іншими елементами пробі.

Приклад:

Si KA1-квант утворився в пробі під впливом випромінювання рентгенівської трубки. У середині пробі можливе поглинання цього кванта за рахунок передачі його енергії Al K-електрону. Утворений у результаті цього процесу іон Al може, своєю чергою, емітувати рентгенівський квант. Таким чином, генероване випромінювання кремнію бере участь також в емісії рентгенівського випромінювання алюмінію. Цей ефект називається вторинним збудженням (Рис. 4.5).

У кількісному аналізі мають бути враховані поправки на ефекти поглинання і вторинного збудження. Пакети сучасного програмного забезпечення пропонують для цього на вибір моделі корекції (Матрична корекція або Міжелементна корекція).

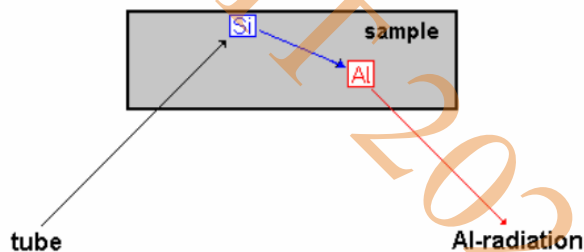


Рис.4.5 - Вторинне збудження

4.8 Розсіювання спектра трубки в матеріалі пробі

Завданням рентгенофлуоресцентного аналізує якісне та кількісне визначення хімічних елементів у пробі на основі вимірювання їхніх спектрів характеристичного випромінювання. Оскільки проба опромінюється рентгенівськими квантами з трубки, то частина цього випромінювання трубки в результаті фізичного процесу розсіювання доходить до детектора у вигляді фонового випромінювання. У той час як розсіяне гальмівне випромінювання формує безперервний фон, розсіяне характеристичне випромінювання матеріалу

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						38
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

анода створює лінійчастий спектр. Крім ліній елементів проби в спектрі з'являються, як правило, лінії матеріалу анода і фон, зумовлений розсіяним гальмівним випромінюванням. Інтенсивність розсіяного випромінювання залежить від складу проби: для проб, до складу яких входять, в основному, легкі елементи (легкі матриці), частка розсіяного випромінювання велика. Для проб, які складаються, в основному, з важких елементів (важкі матриці), частка розсіяного випромінювання відносно мала.

Фон і характеристичне розсіяне випромінювання можна дуже ефективно зменшити, якщо встановити між трубкою і пробю відповідний поглинаючий матеріал (див. Фільтри первинного випромінювання).

Є два види розсіяного випромінювання, які розрізняються за типом фізичного процесу розсіювання. У літературі їх позначають як:

- **релеївське розсіювання** = пружне розсіювання = класичне розсіювання
- **комptonівське розсіювання** = непружне розсіювання

Надалі ми використовуватимемо виділені жирним шрифтом позначення і зупинимося на наслідках, до яких призводить розсіяне характеристичне випромінювання матеріалу анода.

1. Релеївське розсіювання

Рентгенівські кванти R_h , що прийшли з трубки, змінюють у пробі напрямок свого руху без енергетичних втрат. Таким чином, вони можуть дійти до детектора і можуть бути виміряні. У лінійчастому спектрі з'являються лінії матеріалу анода (наприклад, родію). Якщо елемент родій має бути проаналізований у пробі за допомогою родієвої трубки, то характеристичне випромінювання, що прийшло з трубки, має бути поглинуте ще до проби за допомогою фільтра первинного випромінювання.

2. Комптонівське розсіювання

Рентгенівські кванти R_h , що прийшли з трубки, потрапляють на електрони елемента проби. Частина енергії кванта передається електрону в результаті процесу розсіювання. Таким чином, рентгенівський квант втрачає енергію. Інтенсивність квантів, розсіяних унаслідок комптонівського ефекту, залежить від

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						39
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кута падіння рентгенівського випромінювання на пробу і від кута приймання випромінювання спектрометром. Оскільки ці кутові установки в спектрометрі фіксовані (див. Шлях проходження випромінювання), то з низькоенергетичного боку наявної в спектрі Rh-лінії з'являється дещо розширена лінія. Ця лінія називається комптонівською лінією.

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						40
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ

5.1 Детектори, спектр амплітуд імпульсів

Під час вимірювання рентгенівських променів використовується їхня здатність іонізувати атоми і молекули, тобто за допомогою передачі енергії видаляти з них електрони. У низці матеріалів, використовуваних для детектування рентгенівського випромінювання, під впливом рентгенівських променів виникають імпульси. Амплітуда цих імпульсів пропорційна енергії рентгенівських квантів, що впливають. Реєструючи амплітуду імпульсів, отримують інформацію про енергію рентгенівських квантів. Число рентгенівських квантів за час вимірювання, наприклад, імпульси за секунду (імп/с = імпульси за секунду, кімп/с = кілоімпульси за секунду), називається інтенсивністю випромінювання і містить, у першому наближенні, інформацію про концентрацію випромінювального елемента в пробі.

У сучасних хвиледисперсійних рентгенофлуоресцентних спектрометрах в основному застосовують два типи детекторів: газопропорційний лічильник і сцинтиляційний лічильник.

Нижче описано принцип дії цих лічильників квантів:

1. Газопропорційний лічильник

Газопропорційний лічильник складається з циліндричної металевої трубки, вздовж осі якої натягнута тонка нитка (лічильний дріт). Ця трубка заповнена відповідним газом (наприклад, Ar + 10% CH₄). До лічильного дроту прикладено позитивну високу напругу (+U). Збоку на трубці є отвір або вікно, закрите матеріалом, проникним для рентгенівського випромінювання (Рис. 5.1).

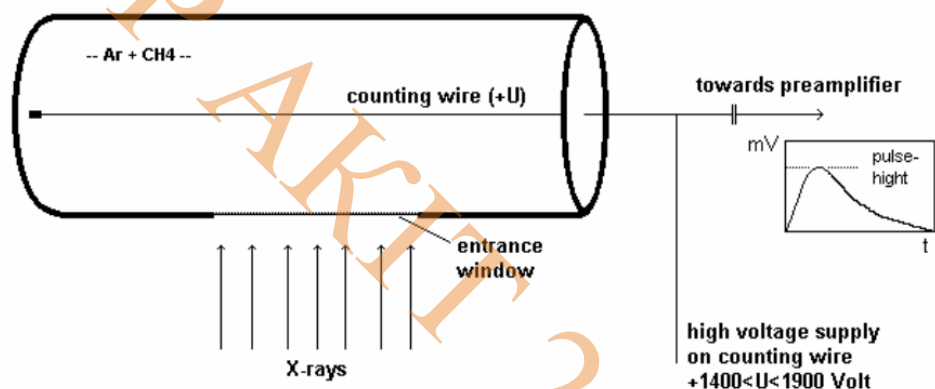


Рис. 5.1 - Газопропорційний лічильник

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						41
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рентгенівський квант проникає через вікно в газову камеру лічильника і поглинається там, іонізуючи атоми і молекули газу. Утворені позитивні іони рухаються до катода (стілки трубки), вільні електрони рухаються до анода, яким є лічильний дріт. Число утворених електрон-іонних пар пропорційне енергії рентгенівського кванта. У середньому для створення однієї електрон-іонної пари потрібно приблизно 0,03 кеВ. Таким чином, наприклад, випромінювання елемента бору з енергією 0,185 кеВ створює приблизно 6 пар, а К-альфа випромінювання молібдену з енергією 17,5 кеВ - 583 пари. Первинні електрони, що утворилися, пересуваються до лічильного дроту під дією прикладеного електричного поля, що має циліндричну симетрію. Величина високої напруги на лічильному дроті вибирається таким чином, щоб електрони могли отримати достатню енергію від електричного поля поблизу лічильного дроту для подальшої іонізації атомів і молекул газу. Один електрон може створити до 10000 вторинних електрон-іонних пар. Вторинні іони, що рухаються до катода, створюють вимірюваний сигнал.

Без цих процесів газового посилення сигнали, наприклад, бору з 6 парами або молібдену з 583 парами зарядів, не були б вимірюваними. Ці сигнали було б важко виділити на тлі електронних шумів. Газове посилення, таким чином, регулюється високою напругою на лічильнику і вибирається дещо більшим при вимірюванні бору, ніж при вимірюванні молібдену. Подальша імпульсна електроніка виробляє імпульси напруги, амплітуда яких залежить від енергії поглинутих рентгенівських квантів.

Існують дві різні конструкції газопропорційних лічильників: проточний лічильник (ПС) (англ. flow counter) і відпаяний пропорційний лічильник (ОПЛ). Проточний лічильник під'єднаний до безперервного газопостачання лічильним газом ($Ar + 10\% CH_4$), але має перевагу в тому, що може бути обладнаний дуже тонким вікном ($<0,6$ мкм). Таким чином, проточний лічильник підходить також для вимірювання дуже легких елементів і має високу стабільність. Відпаяний пропорційний лічильник, своєю чергою, має замкнутий об'єм, але потребує товстих вікон, виготовлених, як правило, з берилію. Високе поглинання цих товстих берилієвих вікон не дає змоги вимірювати дуже легкі елементи (від Be до Na).

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						42
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Із застосуванням інноваційних органічних матеріалів, що володіють високим пропусканням, стало можливим використання відпаяного пропорційного лічильника, що не поступається за чутливістю проточному лічильнику, для визначення дуже легких елементів (від Be до Na).

2. Сцинтиляційний лічильник

Сцинтиляційний лічильник (СС) (англ. scintillation counter), який застосовують у РФА, складається з кристала йодиду натрію, легованого домішкою талію, - NaJ(Tl). Товщина кристала досить висока, щоб поглинути всі високоенергетичні кванти, використовувані в РФА. Енергія рентгенівських квантів, що проникли в кристал, поступово передається атомам кристала, які, своєю чергою, випромінюють світло. Сукупність таких квантів світла створює світловий спалах. Світлова енергія цих світлових спалахів - це енергія, яка пропорційна енергії рентгенівського кванта, відданої кристалу. Утворене світлове випромінювання досягає фотокатода, з поверхні якого емітуються електрони. Ці електрони прискорюються у вторинно-електронному помножувачі або фотопомножувачі і створюють за допомогою набору динодів так звані вторинні електрони. На виході помножувача в результаті лавиноподібного процесу виробляється вимірюваний сигнал (Рис. 5.2). Амплітуда утворених імпульсів напруги, як і в разі газопропорційного лічильника, пропорційна енергії детектованого рентгенівського кванта.

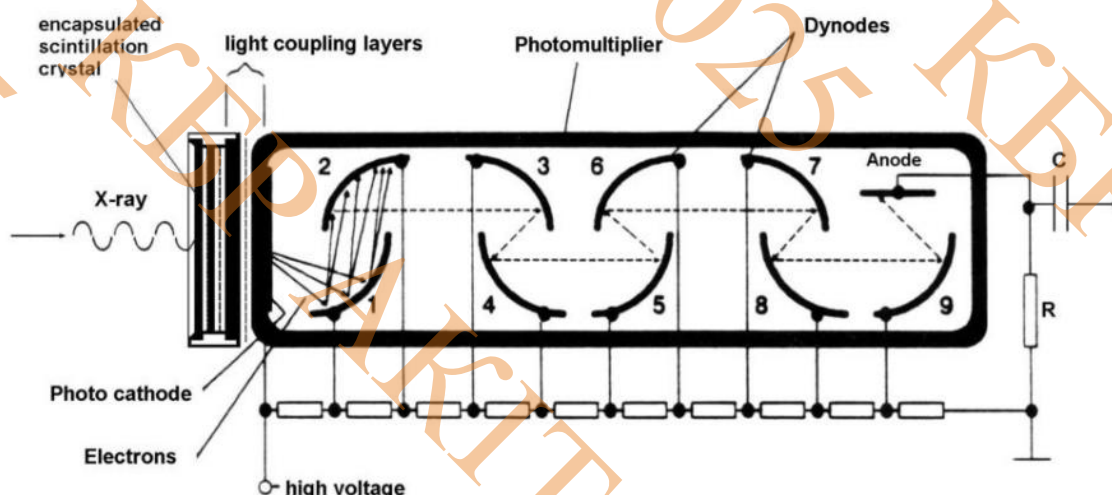


Рис. 5.2 - Сцинтиляційний лічильник, включно з фотопомножувачем
5.2 Аналіз амплітуд імпульсів (РНА), розподіл амплітуд імпульсів

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Графічна залежність числа вимірних імпульсів (інтенсивності) від амплітуди імпульсу називається спектром амплітуд імпульсів. Вживаються також позначення-синоніми, а саме: аналіз амплітуд імпульсів або розподіл амплітуд імпульсів.

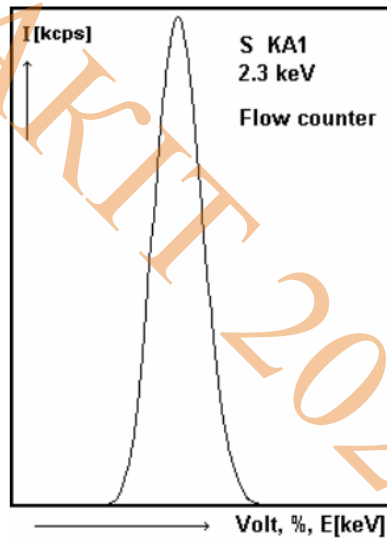


Рис. 5.3 - Розподіл амплітуд імпульсів (S) газопропорційного лічильника

Оскільки амплітуди імпульсів напруги пропорційні поглинутій енергії рентгенівських квантів, то ця залежність називається також енергетичним спектром (Рис. 5.3, Рис. 5.4). Амплітуда імпульсу вказується у В, поділках шкали або % (і може бути також представлена в кеВ після відповідного градування). Шкала у % визначається таким чином, щоб аналізована лінія з'являлася при 100 %.

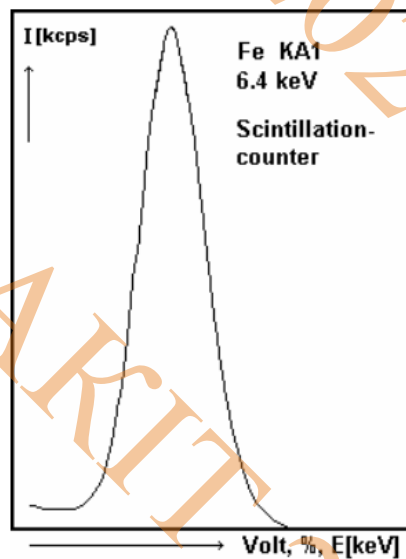


Рис. 5.4 - Розподіл амплітуд імпульсів (Fe) сцинтиляційного лічильника

У газопропорційних лічильниках (проточному лічильнику або відпаяному

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						44
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лічильнику) як компонент лічильного газу використовується аргон. Тому під час поглинання рентгенівських квантів з енергіями, що лежать вище за край поглинання аргону, з'являється додаткова лінія - пік витоку (Рис. 5.5).

Пік витоку утворюється таким чином:

Поглинений рентгенівський квант віддає свою енергію лічильному газу, причому з атома аргону видаляється К-електрон. Утворений іон аргону може тепер емітувати рентгенівський квант $Ar\ K\alpha_{1,2}$ з енергією 3 кеВ. Витік цього флуоресцентного випромінювання Ar з лічильника призводить до того, що вимірюваний сигнал має тепер тільки енергію, яка дорівнює енергії поглинутого кванта мінус 3 кеВ. У результаті цього процесу в розподілі амплітуд імпульсів з'являється друга лінія (пік витоку), енергія якої завжди на 3 кеВ менша від поглиненої енергії. Зверніть увагу на те, що на Рис. 10а пік витоку відсутній. Це пояснюється тим, що поглинена енергія випромінювання сірки ($S\ K\alpha_{1,2}$) лежить нижче за край поглинання аргону.

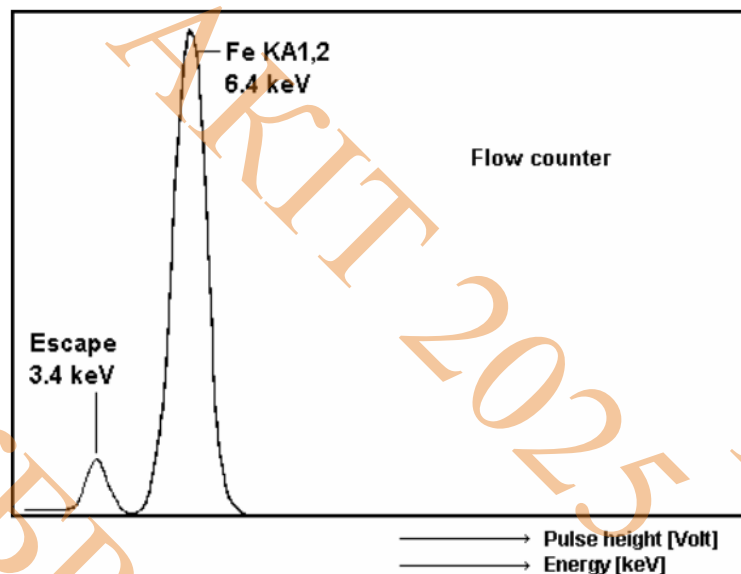


Рис.5.5 - Розподіл амплітуд імпульсів (Fe) разом із піком витоку (Escape)

У разі використання іншого лічильного газу (Ne, Kr, Xe) замість аргону спостерігаються лінії витоку з енергією меншою, ніж поглинута енергія, на величину, яка відповідає емітованому флуоресцентному випромінюванню (Kr, Xe). При використанні неону як компонента лічильного газу помітний пік витоку практично відсутній. Це пояснюється тим, що Ne К-випромінювання з енергією 0,85 кеВ майже повністю поглинається в лічильнику, а енергетична різниця щодо поглинутої енергії (0,85 кеВ) і вихід флуоресценції дуже малі.

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк. 45
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6 ДИФРАКЦІЯ В КРИСТАЛАХ

6.1 Основні положення

З нашого повсякденного досвіду ми знаємо, що світло поширюється прямолінійно. Це відповідає уявленню світла у вигляді корпускулярного випромінювання (фотони, кванти). Про хвилі ми знаємо, що під час проходження хвильового фронту (наприклад, хвилі води) через отвір, розміри якого менші за довжину хвилі, хвилі за цим отвором поширюються в сторони. Це ж саме явище характерне і для світла, що має хвильову природу. Таке відхилення світлових променів від прямолінійного поширення за відсутності відбиття або заломлення називається **дифракцією**.

Застосування дифракційного ефекту багатостороннє. У хвиледисперсійному РФА нас, в основному, цікавить дифракція на відбивних решітках. В оптичному діапазоні ($\lambda = 380 - 750$ нм) часто застосовують решітки із дзеркальним відбиттям. Вони складаються із дзеркальних металевих поверхонь із набором еквідистантно розташованих на них штрихів. Таке технічне рішення, однак, не підходить для рентгенівського діапазону, оскільки довжини хвиль тут на 2 - 5 порядків менші ($\lambda = 0,02 - 11$ нм). Для рентгенівської дифракції на відбивних решітках потрібні дуже маленькі міжплощинні відстані кристалічної решітки, характерні для природних кристалів.

Дифракційний ефект лежить в основі хвиледисперсійного РФА. Після збудження елемента в пробі (за допомогою рентгенівського випромінювання) набір довжин хвиль, характеристичних для елемента, залишає пробу. Для ідентифікації цих різних довжин хвиль у РФА існують два методи (або способи). В енергодисперсійному РФА застосовується енергодисперсійний детектор, здатний розрізняти випромінювання з різними довжинами хвиль. **Хвиледисперсійний РФА** використовує дифракційний ефект, щоб розділити різні довжини хвиль за допомогою кристала-аналізатора. Потім детектор визначає інтенсивність певних довжин хвиль. У наступних розділах буде детально описано саме цей спосіб.

6.2 Рентгенівська дифракція на кристалічній решітці, рівняння

Брегга

						Арк.
						46
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	

Кристали складаються з періодично розташованих атомів (молекул), що складають кристалічну решітку. У такому розташуванні частинок є багато площин різного напрямку, через які проходять вузли кристалічної ґратки (= атоми, молекули), що, правда, не тільки горизонтальні та вертикальні, а й косі площини. Ці площини називаються площинами кристалічної решітки. Усі площини, паралельні площині кристалічної решітки, теж є такими. Вони рівновіддалені одна від одної на певну відстань. Ця відстань називається міжплощинною відстанню d .

Якщо рентгенівські промені, що йдуть паралельно, падають на площину кристалічної решітки, то кожна розташована на ній частинка діє як центр розсіювання й емітує вторинну хвилю. Усі вторинні хвилі збираються разом у відбиту хвилю. Те ж саме відбувається до того ж на паралельних площинах кристалічної решітки, бо в межах міжплощинної відстані d рентгенівські хвилі поглинаються дуже слабо. Усі ці відбиті хвилі інтерферують. Якщо умова посилення «Різниця ходу рентгенівських променів = ціле кратне довжини хвилі» ($\Delta l = n\lambda$) виконується не точно, то відбиті хвилі інтерферують з ослабленням. Для решти довжин хвиль умова посилення виконується точно. Для певної довжини хвилі і певної міжплощинної відстані вона виконується тільки за заданого кута, який називається брегговським кутом (Рис. 6.1).

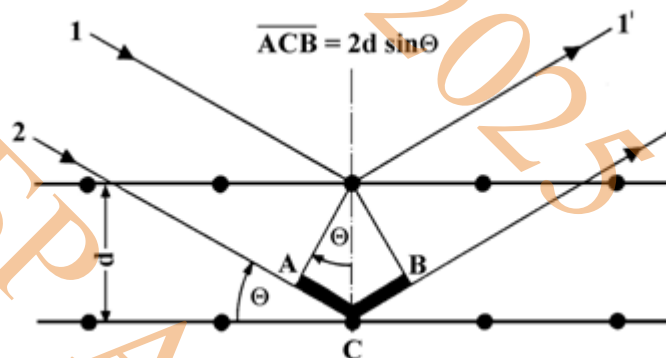


Рис. 6.1 - Умова відбиття Брегга

До Рис. 6.1:

На кристал з міжплощинною відстанню d падає паралельне, когерентне рентгенівське випромінювання (1,2) за умови посилення і розсіюється під кутом θ (тета) (1', 2'). Частина випромінювання, що розсіюється на 2-ій площині, матиме різницю ходу ACB відносно частини випромінювання, розсіяної на 1-ій площині.

						Арк. 47
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	

З визначення синуса випливає, що:

$$\frac{'AC'}{d} = \sin \theta \quad \text{або} \quad 'AC' = d \sin \theta \quad [6.1]$$

Таким чином, різниця ходу АСВ подвоюється і дорівнює:

$$'ACB' = 2d \sin \theta \quad [6.2]$$

Умова посилення виконується в тому випадку, коли різниця ходу дорівнює цілому кратному довжини хвилі:

$$'ACB' = n\lambda \quad [6.3]$$

Звідси виходить умова відображення Брегга:

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad [6.4]$$

де $n = 1, 2, 3 \dots$ порядок відображення.

Рис. 6.2 (а), 6.2 (b), 6.2 (c) наочно показують умову відбиття Брегга для порядків відбиття $n = 1, 2, 3$.

На основі умови відбиття Брегга стає можливим, вимірюючи кут θ , визначати довжину хвилі λ за відомої міжплощинної відстані d , і відповідно, хімічний елемент, або за відомої довжини хвилі λ визначати міжплощинну відстань d , і відповідно, кристалічну структуру.

Це є основою для двох методів вимірювання, які застосовують під час якісного та кількісного визначення хімічних елементів (РФА) і кристалічної структури (молекул) (РД) залежно від того, яку величину визначають під час вимірювання кута θ - довжину хвилі λ або значення $2d$ (Табл. 6.1):

Таблиця 6.1 - Хвилеводисперсійні рентгенівські методи

Відома величина	Шукана величина	Вимірювана величина	Метод вимірювання	Тип приладу
d	λ	θ	рентгенівська флуоресценція	спектрометр
λ	d	θ	рентгенівська дифрактометрія	дифрактометр

У рентгенівській дифрактометрії (РД) проба збуджується монохроматичним випромінюванням відомої довжини хвилі (λ), і рівняння Брегга розв'язують щодо d (міжплощинна відстань).

У РФА нам відоме значення d кристала-аналізатора, і рівняння Брегга розв'язують відносно довжини хвилі (λ), що є характеристичною для елемента.

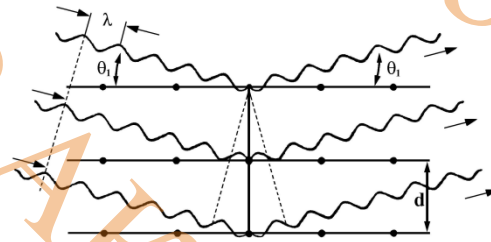


Рис. 6.2 (а) - Відображення 1-го порядку $\lambda = 2d \sin \theta_1$

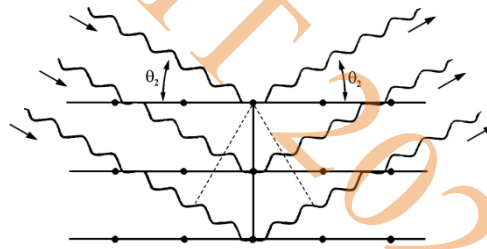


Рис. 6.2 (b) - Відображення 2-го порядку $2\lambda = 2d \sin \theta_2$

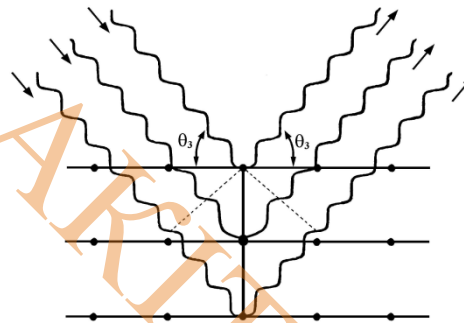


Рис. 6.2 (c) - Відображення 3-го порядку $3\lambda = 2d \sin \theta_3$

6.3 Типи кристалів

За допомогою хвиледисперсійного рентгенофлуоресцентного аналізу можна визначати всі елементи, починаючи з Be (атомний номер 4). Довжини хвиль при цьому охоплюють діапазон значень у чотири порядки: 0,01 - 11,3 нм. Оскільки кут θ теоретично може набувати значень між 0° і 90° (а технічно в приладі від 2° до 75°), то значення $\sin \theta$ варіюються тільки між 0 і +1. За рівнянням Брегга це означає, що:

$$0 \leq \frac{n\lambda}{2d} = \sin \theta \leq 1 \quad [6.5]$$

і, що, відповідно, для кристала з міжплощинною відстанню d діапазон вимірюваних елементів обмежений. Тому для реєстрації повного діапазону елементів (починаючи з атомного номера 4) необхідні різні типи кристалів з

						Арк. 49
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	

різними значеннями 2d. У табл. 6.2 подано список поширених типів кристалів.

Кристали фториду літію з позначеннями площин перерізу (200, 220, 420) ідентичні таким позначенням:

$$\text{LiF}(420) = \text{LiF}(210)$$

$$\text{LiF}(220) = \text{LiF}(110)$$

$$\text{LiF}(200) = \text{LiF}(100)$$

Поряд зі значеннями 2d беруть до уваги такі критерії вибору для застосування типу кристалів у конкретних додатках:

- роздільна здатність
- відбивна здатність (→інтенсивність)

Можуть бути й інші критерії:

- термостійкість
- придушення вищих порядків відбиття
- власне випромінювання

Табл. 6.2 - Типи кристалів

Кристал	Позначення	Діапазон елементів	Значення 2d (нм)
LiF(420)	Фторид літію	> Co KB1	0,1801
LiF(220)	Фторид літію	> V KA1	0,2848
LiF(200)	Фторид літію	> K KA1	0,4028
Ge	Германій	P, S, Cl	0,653
InSb	Антимонід індію	Si	0,7481
PET	Пентаеритрит	Al - Ti	0,874
AdP	Дигідрофосфат амонію	Mg	1,0648
TIAP	Гідрофталаат талію	F, Na	2,576

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

OVO-55	Багатошарова структура	O – Si (C)	5,5
OVO-160	Багатошарова структура	B, C	16
OVO-N	Багатошарова структура	N	11
OVO-C	Багатошарова структура	C	12
OVO-B	Багатошарова структура	B (Be)	20

6.4 Дисперсія, роздільна здатність ліній

Величина зміни кута $\Delta\theta$ при зміні довжини хвилі на величину $\Delta\lambda$ (отже: $\Delta\theta/\Delta\lambda$) називається дисперсією. Що більша дисперсія, то краща роздільна здатність двох сусідніх ліній або ліній, що накладаються. Поряд із якістю поверхні та чистотою кристала дисперсія визначає роздільну здатність.

Математично дисперсію отримують диференціюванням рівняння Бреґга:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{n}{2d \cos\theta} \quad [6.6]$$

З цього рівняння випливає, що дисперсія (або роздільна здатність ліній) збільшується зі зменшенням міжплощинної відстані d .

Приклади: (див. табл. 6.3)

Значення 2θ КА1-ліній ванадію (V) і хрому (Cr) мають під час вимірювання за допомогою кристала LiF(220) більшу відстань між собою, ніж під час використання кристала LiF(200).

Значення 2θ КА1-ліній сірки (S) і фосфору (P) мають під час вимірювання за допомогою кристала Ge більшу відстань між собою, ніж під час використання кристала PET. (Див., наприклад: Періодичну систему елементів).

Табл. 6.3 - Коментар до поняття дисперсії

Тип кристала	Значення $2d$ (нм)	2θ (Ел.1) (град)	2θ (Ел.2) (град)	Різниця (град)
LiF(220)	0,2848	107.11 (Cr)	123.17 (V)	16.06
LiF(200)	0,4028	69.34 (Cr)	76.92 (V)	7,58
Ge	0,653	110.69 (S)	141.03 (P)	30.34
PET	0,874	75.85 (S)	89.56 (P)	13.71

6.5 Стандарні типи, багатошарові структури

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						51

1) LiF(200), LiF(220), LiF(420)

Є різні площини перерізу (200/220/420) кристалів LiF. Роздільна здатність у ряду (200) → (220) → (420) збільшується, а відбивна здатність зменшується (Рис. 6.3).

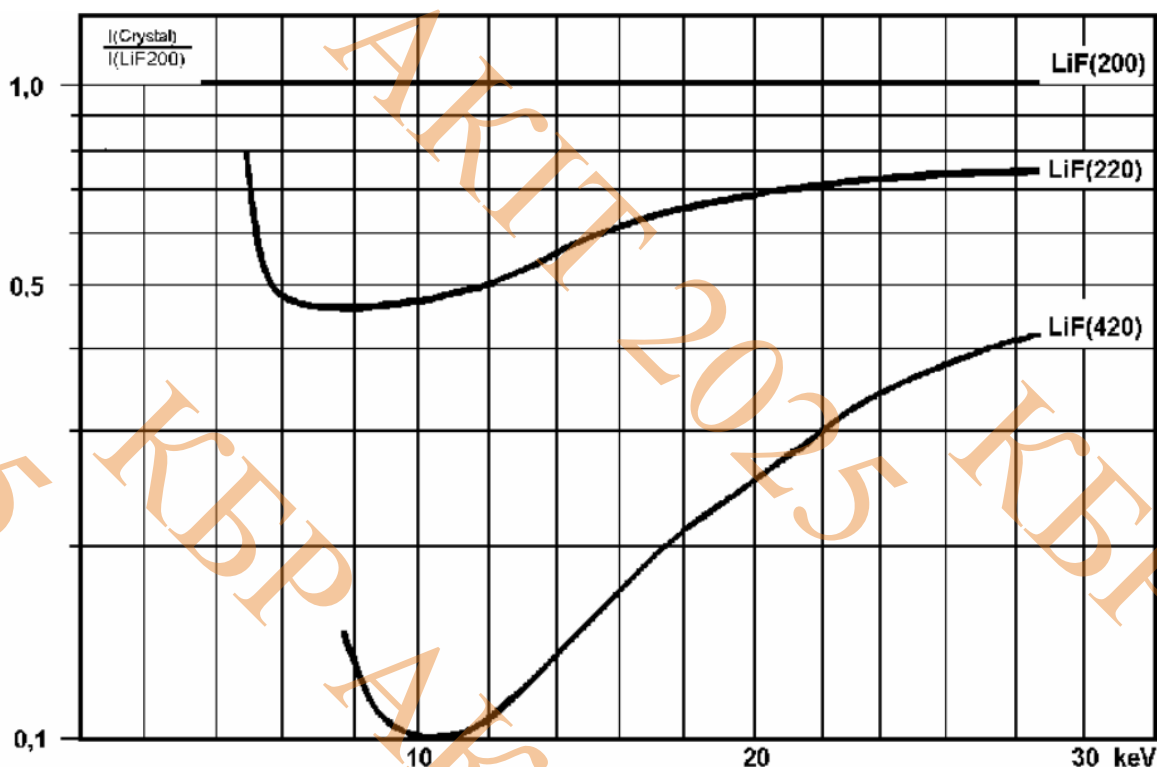


Рис. 6.3 - Співвідношення інтенсивностей кристалів LiF(220) і LiF(420) порівняно з LiF(200). (Інтенсивність LiF(200) = 1)

LiF(200):

Універсальний кристал, застосовуваний для діапазону елементів, починаючи з атомного номера 19 (K); висока відбивна здатність, хороша роздільна здатність.

LiF(220):

Менша відбивна здатність порівняно з LiF(200), але вища роздільна здатність; застосовується для діапазону елементів, починаючи з атомного номера 23 (V); особливо підходить для поліпшення роздільної здатності спектральних ліній під час їх накладення.

Приклади використання LiF(220) для зменшення накладання ліній:

Cr KA_{1,2} - V KB₁

Mn KA_{1,2} - Cr KB₁

U LA₁ - Rb KA_{1,2}

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

LiF(420):

Належить до спеціальних кристалів; застосовується для діапазону елементів, починаючи з атомного номера 28 (Ni) або Co KV1; найкраща роздільна здатність, але слабка відбивна здатність.

З Рис. 6.3 видно, що в діапазоні енергій поблизу 10 кеВ відбивна здатність LiF(420) становить лише 10% від відбивної здатності LiF(200).

PET:

Універсальний кристал для елементів від Al до Ti (K-лінії) і від Rb до I (L-лінії).

Зверніть увагу:

PET - це кристал з найбільш високим коефіцієнтом теплового розширення, тобто коливання температури стають тут дуже помітними.

2) Багатошарові структури OVO-55, OVO-160, OVO-N, OVO-C, OVO-B

Багатошарові структури - це не вирощені кристали, а штучним шляхом виготовлені «шарові аналізатори». Міжплощинні відстані d у них утворюються при нанесенні тонких шарів двох матеріалів, що чергуються, на підкладку (Рис. 6.4). Багатошарові структури вирізняються високою відбивною здатністю і дещо зменшеною роздільною здатністю. Для аналізу легких елементів багатошарова техніка являє собою майже революційне поліпшення в багатьох додатках стосовно природних кристалів з великою міжплощинною відстанню (наприклад, RbAP, PbST, KAP).

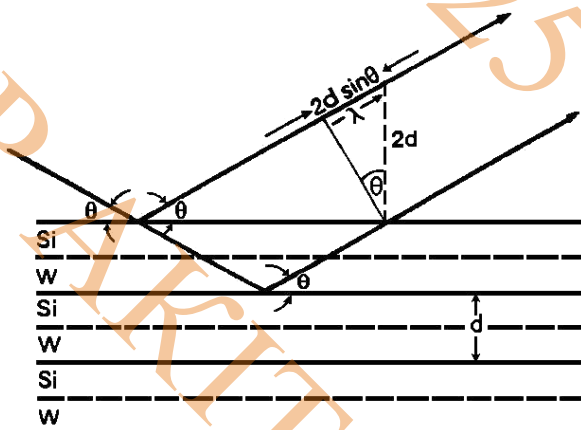


Рис. 6.4 - Дифракція на шарах (тут: Si/W) багатошарової структури

OVO-55:

Найчастіше застосовувана багатошарова структура зі значенням $2d$, що

						Арк.
						53
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	

дорівнює 5,5 нм, для аналізу елементів від N (C) до Si; обмежене застосування для вимірювання елементів F, Na, Mg.

6.6 Спеціальні кристали

Під поняттям «Спеціальні кристали» маються на увазі ті типи кристалів і багатошарові структури, які не є універсальними, а застосовуються в спеціальних додатках.

LiF(420):

Див. «Стандартні типи», опис кристалів LiF (200, 220, 420).

Ge:

Дуже гарний кристал для вимірювання елементів S, P, Cl. Ge відрізняється від PET вищою дисперсією і стабільнішим температурним режимом. Ge пригнічує особливо лінії 2-ого і 4-ого порядку.

Особливо добре підходить Ge для роздільної здатності сульфідів/сульфатів в пробах цементу.

AdP:

На практиці AdP застосовується тільки для аналізу Mg і має порівняно з багатошаровою структурою OVO-55 вищу роздільну здатність за помітно слабкішої відбивної здатності. Тому застосування AdP необхідне за появи ліній домішок, як, наприклад, за малих концентрацій Mg у матриці Al.

TlAP:

TlAP має хорошу роздільну здатність, але слабку відбивну здатність. Його застосовують під час аналізу F і Na в тому разі, коли не вистачає роздільної здатності OVO-55 (наприклад, під час накладення Na на Zn L-лінію в пробах із високим вмістом Zn). До його недоліків належать обмежений термін дії, токсичність і висока вартість.

InSb:

InSb - дуже хороший кристал для аналізу Si як на рівні слідів, так і в діапазоні високих концентрацій (наприклад, скло). Він замінює PET і застосовується завжди, коли необхідна висока точність і висока стабільність. До його недоліків належать обмежене застосування (тільки Si) і висока вартість.

OVO-160:

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						54
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

OVO-160 - це багатошарова структура зі значенням $2d$, що дорівнює 16 нм. Вона підходить для вимірювання В і С.

OVO-C:

OVO-C - це спеціально оптимізована для вуглецю багатошарова структура зі значенням $2d$, що дорівнює 12 нм.

OVO-N:

OVO-N - це спеціально оптимізована для азоту багатошарова структура зі значенням $2d$, що дорівнює 11 нм.

OVO-B:

OVO-B - це спеціально оптимізована для бору багатошарова структура зі значенням $2d$, що дорівнює 20 нм. Вона підходить також для аналізу Ве.

6.7 Вигнуті кристали

Поряд із застосуванням плоских кристалів у послідовних спектрометрах, у багатоканальних спектрометрах використовують переважно вигнуті кристали.

Вигин кристала вибирається таким чином, щоб за допомогою щільної оптики відбувалося фокусування вхідної щілини випромінювання на вихідну щілину. Цим досягаються високі інтенсивності за просторово обмеженої геометрії конструкції.

Для фокусування використовують різні види вигину кристалів. Найбільш уживаним є вигин за логарифмічною спіраллю (Рис. 6.5), а також вигин і шліфування за Йогансоном (Рис. 6.6).

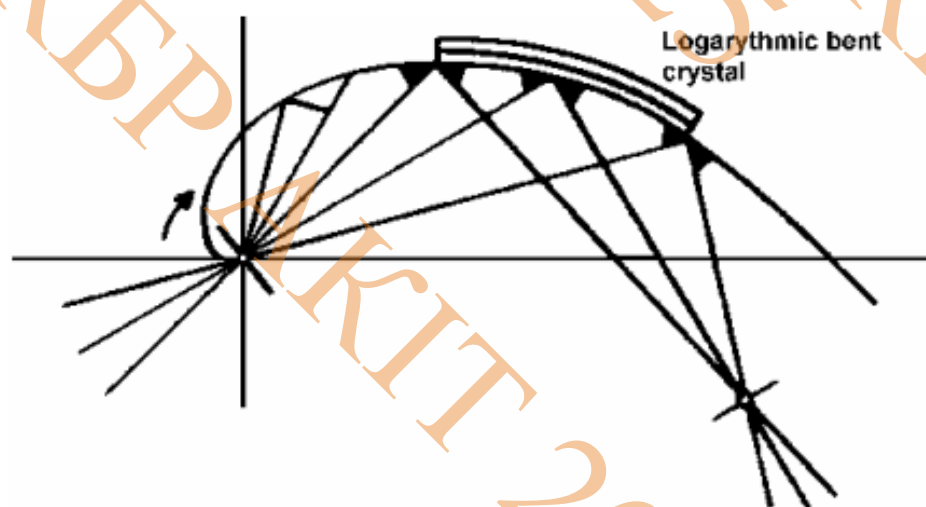


Рис. 6.5 - Вигин за логарифмічною спіраллю

						Арк. 55
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	

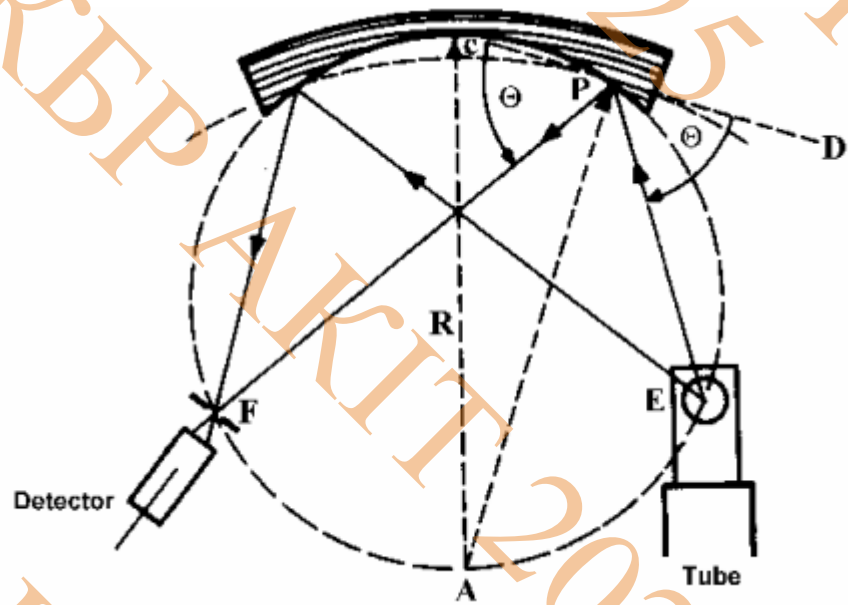


Рис. 6.5 - Вигин за Йогансоном

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

7 ОПИС РОБОТИ ПРИЛАДУ

Розглянемо опис роботи приладу на прикладі комбінованої структурної схеми (КБР.АКІТ. 9469654.01.000 С1).

Прилад складається з джерела рентгенівського випромінювання на базі рентгенівської трубки потужністю 3кВт при максимальній високій напрузі 60 кВ, що надходить до трубки з джерела високої напруги, та струмі 100 мА. У якості стандартного матеріалу анода використовується родій, оскільки характеристичне випромінювання цього елемента одночасно підходить як для збудження важких так і легких елементів. За рахунок ефективного пропускання характеристичного родієвого L-випромінювання крізь берилове віконце трубки товщиною 125 мкм, можуть бути ефективно збуджені легкі елементи від берилію до хлору. Характеристичне родієве K-випромінювання збуджує елементи періодичної системи до молібдену. Елементи періодичної системи, що розташовані за родієм, збуджуються високоенергетичним ділянкою гальмівного випромінювання. Наступним елементом оптичної схеми є фільтри початкового випромінювання на основі поглинаючих плівок з алюмінію або міді різної товщини, які встановлені на “каруселі”, що обертається, з декількома можливими її положеннями. Фільтр знаходиться між рентгенівської трубкою та пробую і призначений для фільтрації небажаних або заважаючих компонентів рентгенівського випромінювання, а також для покращення співвідношення величини сигнал/шум. Далі рентгенівське випромінювання потрапляє на пробу, яка встановлена на багатофункціональному пристрої зміни проб з можливістю автоматичного лінійного переміщення проб у двох перпендикулярних напрямках за рахунок крокових двигунів. Після розсіяння рентгенівського випромінювання на пробі, воно проходить крізь коліматорну маску, для додаткової фільтрації випромінювання. Далі випромінювання проходить крізь коліматор, що складається з паралельних пластинок і призначений для виділення паралельного пучка випромінювання, що проходить від проби до кристалу. З метою оптимізації вимірювальних параметрів можуть бути використані інші коліматори, за рахунок їх переміщення за допомогою крокового двигуна. Після цього випромінювання потрапляє на моторизований пристрій зміни кристалів, які комплектуються індивідуально у відповідності до

									Арк.
									57
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ				

потреб вимірювання. За допомогою кристалу випромінювання розкладається у спектр і реєструється сцинтиляційним лічильником, що знаходиться за межами вакуумної камери. Кутовий діапазон сцинтиляційного лічильника складає від 4° до 110°. Електричні імпульси, що утворюються у сцинтиляційному детекторі за рахунок рентгенівського випромінювання, подаються на попередній підсилювач, проходять крізь дискримінатор для покращення співвідношення сигнал/шум, формуються у ТТЛ імпульси і подаються до мікроконтролера. Мікроконтролер керує всією роботою приладу, підраховує імпульси з лічильника і передає корисну інформацію до персонального комп'ютера.

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						58
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8 РОЗРАХУНКИ БЛОКУ ОБРОБКИ ТА ЖИВЛЕННЯ

8.1 Вибір мікроконтролера

У цій роботі для реалізації проекту було обрано мікроконтролер ATmega328P (рис. 8.1). Основним чинником вибору даного мікроконтролера стали технічні характеристики.

ATmega328P - це малопотужний 8-розрядний CMOS-мікроконтролер на базі розширеної RISC-архітектури AVR. Виконуючи інструкції за один такт, пристрої досягають пропускної здатності процесора, що наближається до мільйона інструкцій в секунду (MIPS) на мегагерц, що дозволяє розробнику системи оптимізувати енергоспоживання в порівнянні зі швидкістю обробки даних.

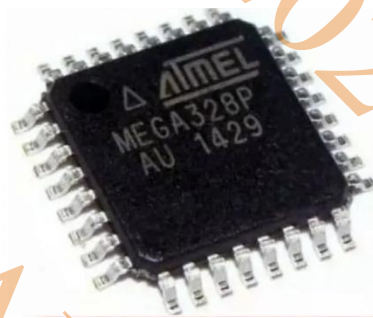


Рис. 8.1 – Зовнішній вигляд МК ATmega328P

Основні характеристики:

Сімейство ATMEGA

Напруга живлення 1.8...5.5В

Об'єм Flash-пам'яті 32кБ

Об'єм пам'яті EEPROM 1кБ

Об'єм пам'яті SRAM 2кБ

Тактова частота 20 МГц

Інтерфейс debugWIRE, I2C, SPI x2, UART

Особливості, периферія watchdog, вбудований датчик температури, резонатор 32кГц для RTC

Кіл-ть таймерів 8бит 2

Кіл-ть таймерів 16біт 1

Кіл-ть компараторів 1

Кіл-ть перетворювачів A/D 10біт8

Кіл-ть каналів input capture 1

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						59
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кіл-ть каналів output compare	6
Кіл-ть зовнішніх переривань	24
Кіл-ть каналів ШІМ	6
Кіл-ть ємнісних каналів	16

8.2 Вибір мікросхеми та її характеристики

Мікросхема ШІМ-контролера серії UC3845 (рис. 8.2) має всі необхідні функціональні можливості для створення схем управління мережевими імпульсними блоками живлення з зворотнім зв'язком по струму і постійній частоті перетворення. Вбудовані структурні елементи мікросхеми забезпечують її відключення при недопустимо низькій вхідній напрузі і пусковому струмі менше 1мА. ШІМ компаратор контролює обмеження по струму, а квазікомплементарний вихідний каскад розрахований на значні скачки струму. Вихідний каскад забезпечує роботу на навантаження типу n-канального польового транзистора з ізольованим затвором.



Рис. 8.2 – Зовнішній вигляд ШІМ-контролера UC3845B

Електричні параметри мікросхеми UC3845.

Весь прилад:

Пусковий струм – 0,5мА ;

Робочий струм від джерела живлення – 11мА ;

Пороговий рівень запуску – 8,4В ;

Мінімальний рівень робочої напруги після вмикання – 7В ;

Максимальне значення робочого циклу – 50%.

Підсилювач помилки:

Вхідна напруга – 2,5В ;

Вхідний струм – 0,3мкА ;

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Коефіцієнт підсилення по напрузі – 90 дБ.

Компаратор контролю струму:

Коефіцієнт підсилення – 3 ;

Максимальний вхідний сигнал – 1В.

8.3 Технічні вимоги

Вхідна напруга: $220\text{V}_{-15\%}^{+10\%}$, $50 \pm 1\text{Гц}$.

Вихідна напруга: перший канал-5В, другий канал-12В.

Струм навантаження: перший канал - 1,5А, другий канал - 1А.

При побудові імпульсних блоків живлення спочатку необхідно вибрати топологію. Її можна вибрати в залежності від вихідної потужності, в нашому випадку підходить зворотньоходовий імпульсний блок живлення (Рис. 8.3).

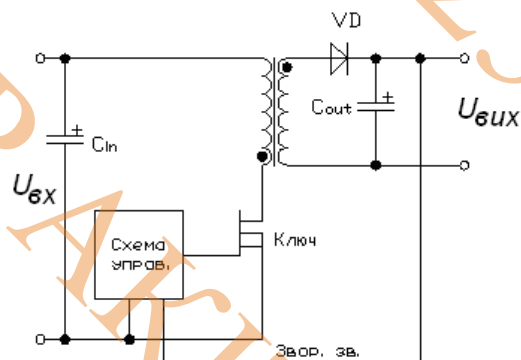


Рис. 8.3 - Зворотньоходовий перетворювач

8.4 Розрахунок трансформатора

Трансформатор містить одну первинну обмотку на яку подається напруга U_1 і три вторинні, з яких знімаються напруги U_2 , U_3 і U_4 (Рис. 8.4). Частота струму вибирається з врахуванням характеристик компонентної бази, і вона становить 50 кГц.

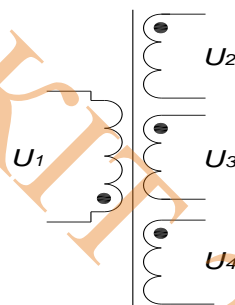


Рис 8.4 - Принципова схема трансформатора

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						61
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Напруга U_1 на первинній обмотці визначається вхідною напругою джерела живлення. При вхідній напрузі 220 В однофазного струму, випрямленої діодним мостом і фільтруємої ємнісним фільтром, на первинну обмотку подається напруга, яка визначається за наступною формулою:

$$U_1 = U_{\text{вх}} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} - U_D = 220 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} - 3 = 195 \text{ В}, \quad [8.1]$$

де $U_{\text{вх}}$ – напруга мережі, U_D – спад напруги на двох прямозміщених діодах.

Напруги на другій і третій обмотках вказані з врахуванням падіння напруги на діодах вихідних випрямлячів: $U_2 = 5,5 \text{ В}$; $U_3 = 12,5 \text{ В}$, $U_4 = 10 \text{ В}$.

Струми другої і третьої обмоток: $I_2 = 1,5 \text{ А}$; $I_3 = 1 \text{ А}$, $I_4 = 10 \text{ мА}$.

Послідовність розрахунку

Вихідна потужність трансформатора:

$$P_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 + U_4 I_4 = 5,5 \cdot 1,5 + 12,5 \cdot 1 + 10 \cdot 0,01 = 20,9 \text{ Вт}, \quad [8.2]$$

Прийmemo ККД трансформатора на базі статистичних даних $\eta = 0,99$. Тоді вхідна потужність трансформатора:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{20,9}{0,99} = 21,1 \text{ Вт}, \quad [8.3]$$

Вхідний струм трансформатора:

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{21,1}{195} = 0,1 \text{ А}, \quad [8.4]$$

Округлимо значення вхідного струму: $I_1 = 0,15 \text{ А}$.

По значенням вхідної потужності $P_1 = 21,1 \text{ Вт}$ і частоті $f = 50 \text{ кГц}$ вибираємо типорозмір магнітопроводу Ш7*7 марки М2000НМ1-14.

Площа поперечного перерізу вибраного магнітопроводу:

$$Q = (8 \cdot 8) = 0,49 \text{ см}^2.$$

Площа поперечного перерізу проводу обмотки визначається допустимою густиною струму Δ :

$$q = \frac{I}{\Delta}, \quad [8.5]$$

Для вибраного магнітопроводу допустима густина $\Delta \leq 5,5 \text{ А/мм}^2$.

Для першої обмотки приймаємо $\Delta_1 = 3 \text{ А/мм}^2$. Тоді переріз дроту першої обмотки:

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						62
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$q_1 = \frac{I_1}{\Delta_1} = \frac{0,15}{3} = 0,05 \text{ мм}^2$$

В якості обмоточного дроту вибираємо провід марки ПЭТВ – 2. Для збільшення коефіцієнта заповнення вікна магнітопроводу і зниження втрат потужності беремо два проводи з діаметрами за міддю $d_{m1} = 0,18 \text{ мм}$ (переріз $0,02545 \text{ мм}^2$) і за ізоляцією $d_{i31} = 0,22 \text{ мм}$.

Для другої обмотки приймемо $\Delta_2 = 3 \text{ А/мм}^2$. Тоді переріз проводу другої обмотки :

$$q_2 = \frac{I_2}{\Delta_2} = \frac{1,5}{3} = 0,5 \text{ мм}^2.$$

Для другої обмотки вибираємо дріт з діаметром за міддю $d_{m2} = 0,8 \text{ мм}$ (переріз $0,50265 \text{ мм}^2$) і за ізоляцією $d_{i32} = 0,88 \text{ мм}$.

Для третьої обмотки $\Delta_3 = 3 \text{ А/мм}^2$. Тоді переріз проводу третьої обмотки:

$$q_3 = \frac{I_3}{\Delta_3} = \frac{1}{3} = 0,33 \text{ мм}^2.$$

Цьому значенню відповідає дріт з діаметром за міддю $d_{m3} = 0,71 \text{ мм}$ (переріз $0,39572 \text{ мм}^2$) і за ізоляцією $d_{i33} = 0,79 \text{ мм}$.

Для четвертої обмотки $\Delta_4 = 3 \text{ А/мм}^2$. Тоді переріз проводу третьої обмотки:

$$q_4 = \frac{I_4}{\Delta_4} = \frac{0,01}{3} = 0,003 \text{ мм}^2.$$

Цьому значенню відповідає провід з діаметром за міддю $d_{m4} = 0,1 \text{ мм}$ (переріз $0,00785 \text{ мм}^2$) і за ізоляцією $d_{i34} = 0,128 \text{ мм}$.

Число витків першої обмотки:

$$n_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4 \cdot k_\phi \cdot f \cdot B \cdot Q}, \quad [8.6]$$

де k_ϕ – коефіцієнт форми трансформованої напруги ($k_\phi = 1$).

Згідно з довідниковими даними індукція в вибраному магнітопроводі при частоті 50 кГц не повинна перевищувати 0,19 Тл. Приймаємо значення індукції менше допустимого приблизно на 30%: $B = 0,133 \text{ Тл}$.

Тоді число витків:

$$n_1 = \frac{195 \cdot 10^4}{4 \cdot 1 \cdot 50000 \cdot 0,133 \cdot 0,620} = 118,2$$

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						63
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для зручності розташування виводів первинної обмотки приймаємо $n_1 = 120$ витків.

Значення напруги, яка припадає на один виток первинної обмотки:

$$e_1 = \frac{U_1}{n_1} = \frac{195}{120} = 1,625 \text{ В/виток.}$$

Число витків другої обмотки:

$$n_2 = \frac{U_2 \cdot m_2}{e_1} = \frac{5,5 \cdot 1,05}{1,625} = 3,6, \quad [8.7]$$

де m_2 – коефіцієнт, який враховує падіння напруги на другій обмотці.

Для вибраного магнітопроводу падіння напруги $\Delta U \leq 6 \%$, приймаємо $\Delta U_2 = 6 \%$.

Заокруглюємо отримане значення $n_2 = 4$ витка.

Число витків третьої обмотки:

$$n_3 = \frac{U_3 \cdot m_3}{e_1} = \frac{12 \cdot 1,05}{1,625} = 7,8,$$

$n_3 = 8$ витків.

Число витків четвертої обмотки:

$$n_4 = \frac{U_4 \cdot m_4}{e_1} = \frac{10 \cdot 1,05}{1,625} = 6,5,$$

$n_4 = 7$ витків.

Число витків, які розміщуються в одному ряді. Обмотки розміщені на ізолюючому каркасі.

В первинній обмотці:

$$b_1 = \frac{L_n k_{y1}}{d_{i31}}, \quad [8.8]$$

де $L_n = 16$ мм для даного розміру магнітопроводу, k_{y1} – коефіцієнт укладки дроту першої обмотки.

Для діаметру проводу $d_{i31} = 0,18$ мм, $k_{y1} = 0,83$. Тоді

$$b_1 = \frac{16 \cdot 0,83}{0,18} = 73,7$$

Число витків заокруглюємо в меншу сторону: $b_1 = 73$ витків.

В другій обмотці для діаметру дроту $d_{i32} = 0,8$ мм, $k_{y2} = 0,95$. Тоді

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						64
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$b_2 = \frac{16 \cdot 0,95}{0,8} = 19$$

Отже $b_2 = 19$ витків.

В третій обмотці $k_{y3} = 0,95$, тоді

$$b_3 = \frac{16 \cdot 0,95}{0,71} = 21$$

Отже $b_3 = 21$ витків.

В четвертій обмотці $k_{y3} = 0,83$, тоді

$$b_4 = \frac{16 \cdot 0,83}{0,71} = 18,7$$

Отже $b_4 = 18$ витків.

Число шарів в обмотках.

В першій обмотці число шарів:

$$N_1 = \frac{n_1 k_{np}}{b_1}, \quad [8.9]$$

Коефіцієнт k_{np} — враховує кількість паралельних дротів, які використовуються при виготовленні обмотки.

Маємо $k_{np} = 2$. Тоді

$$N_1 = \frac{120 \cdot 2}{73} = 3,3$$

Приймаємо $N_1 = 4$ шари.

В другій обмотці:

$$N_2 = \frac{4 \cdot 1}{19} = 0,2 \approx 1$$

В третій обмотці:

$$N_3 = \frac{8 \cdot 1}{21} = 0,38$$

Приймаємо $N_3 = 1$ шар.

В четвертій обмотці:

$$N_4 = \frac{7 \cdot 1}{18} = 0,38$$

Приймаємо $N_4 = 1$ шар.

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						65
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розміри обмоток по висоті намотки.

Висота i – i обмотки:

$$h_i = [N_i d_{\text{изл}} + (N_i - 1) \delta_i] k_{pi}, \quad [8.10]$$

де k_p – коефіцієнт розбухання обмотки, δ – товщина ізоляції між шарами.

Для першої обмотки

$$h_1 = [4 \cdot 0,22 + (4 - 1)0,05] \cdot 1,1 = 1,133 \text{ мм.}$$

$\delta_1 = 0,05$ мм для електроізоляційного намоточного паперу марки ЄН-50.

Для другої обмотки

$$h_2 = [1 \cdot 0,88 + (1 - 1) \cdot 0,12] \cdot 1,15 = 1,01 \text{ мм.}$$

Для третьої обмотки

$$h_3 = [1 \cdot 0,79 + (1 - 1) \cdot 0,022] \cdot 1,15 = 0,9 \text{ мм.}$$

Для четвертої обмотки

$$h_4 = [1 \cdot 0,128 + (1 - 1) \cdot 0,022] \cdot 1,1 = 0,14 \text{ мм.}$$

Ізолюючі зазори в конструкції котушки.

Повітряний зазор між магнітопроводом і каркасом становить 0,5 мм.

Товщина каркаса визначається розмірами магнітопроводу і становить $h_k = 0,8$ мм.

Між каркасом і першою обмоткою розміщені два шари ізоляційного паперу марки К-120 (товщина якого 0,12 мм) і один шар плівки марки ПЄТ-Є товщиною 0,012 мм. Також виконана ізоляція між першою і другою обмотками і зовнішня ізоляція. Крім цього, ззовні розміщується шар плівки із паперу К-120.

Таким чином, сумарна товщина ізоляції h_{k-1} між каркасом і першою обмоткою рівна 0,252 мм. Така ж товщина ізоляції $h_{1-2} = 0,252$ мм між першою і другою обмотками. Товщина зовнішньої ізоляції $h_{\text{зов}} = 0,252 + 0,12 = 0,372$ мм.

Товщина котушки, включаючи в себе обмотки, каркас і електроізоляційні зазори

$$h_{\Sigma} = 0,5 + 0,8 + 0,24 + 0,12 + 1,133 + 0,24 + 0,012 + 1,01 + 0,24 + 0,012 + 0,9 + 0,24 + 0,14 + 0,012 = 5,36 \text{ мм.}$$

Отримане значення h_{Σ} менше мінімального розміру вікна магнітопроводу $h_0 = 6$ мм, що забезпечує розміщення котушки у вікні.

						Арк.
						66
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	

Довжини середніх витків обмоток.

Довжина середнього витка першої обмотки:

$$L_{cp1} = 2a + 2c + 2\pi \left(r_k + h_{k-1} + \frac{h_1}{2} \right) = 2 \cdot 8 + 2 \cdot 8,5 + 2\pi \left(1,2 + 0,252 + \frac{1,133}{2} \right) = 45,7 \text{ мм}, \quad [8.11]$$

Довжина середнього витка другої обмотки:

$$\begin{aligned} L_{cp2} &= 2a + 2c + 2\pi \left(r_k + h_{k-1} + h_1 + h_{1-2} + \frac{h_2}{2} \right) = \\ &= 2 \cdot 8 + 2 \cdot 8,5 + 2\pi \left(1,2 + 0,252 + 1,133 + 0,252 + \frac{1,01}{2} \right) = 54 \end{aligned}, \quad [8.12]$$

Довжина середнього витка третьої обмотки:

$$L_{cp3} = L_{cp2} \approx 54 \text{ мм.}$$

Довжина середнього витка четвертої обмотки:

$$L_{cp4} = L_{cp2} \approx 54 \text{ мм.}$$

Опір обмоток постійному струму.

Опір першої обмотки:

$$R_1 = \frac{\rho L_{cp1} 2n_1}{q_1}, \quad [8.13]$$

де ρ – питомий електричний опір мідного дроту, рівний $0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; q_1 – переріз дроту першої обмотки (два дроти по $0,06 \text{ мм}^2$).

$$R_1 = \frac{0,0175 \cdot 45,7 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 120}{0,02545} = 7,5 \text{ Ом.}$$

Опір другої обмотки:

$$R_2 = \frac{\rho L_{cp2} 2n_2}{q_2} = \frac{0,0175 \cdot 54 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 4}{0,50265} = 0,015 \text{ Ом.}$$

Опір третьої обмотки:

$$R_3 = \frac{\rho L_{cp3} 2n_3}{q_3} = \frac{0,0175 \cdot 54 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 8}{0,39572} = 0,038 \text{ Ом.}$$

Опір четвертої обмотки:

$$R_3 = \frac{\rho L_{cp3} 2n_3}{q_3} = \frac{0,0175 \cdot 54 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 7}{0,00785} = 1,685 \text{ Ом.}$$

Опір обмоток змінному струму:

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						67
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{змі} = k_{змі} R_i, \quad [8.14]$$

де $k_{змі}$ - коефіцієнт збільшення активного опору від частоти f .

Опір першої обмотки:

$$R_{змі1} = 0,6 \cdot 7,5 = 4,5 \text{ Ом.}$$

Опір другої обмотки:

$$R_{змі2} = 0,6 \cdot 0,015 = 0,009 \text{ Ом.}$$

Опір третьої обмотки:

$$R_{змі3} = 0,6 \cdot 0,038 = 0,023 \text{ Ом.}$$

Опір четвертої обмотки:

$$R_{змі4} = 0,6 \cdot 1,685 = 1,011 \text{ Ом.}$$

Втрати в міді обмоток:

$$P_{мі} = k_{\theta} I_i^2 R_{змі}, \quad [8.15]$$

де k_{θ} - температурний коефіцієнт опору, $k_{\theta} = 1,28$.

$$P_{мі1} = 1,28 \cdot 0,15^2 \cdot 4,5 = 0,129 \text{ Вт}$$

$$P_{мі2} = 1,28 \cdot 1,5^2 \cdot 0,009 = 0,026 \text{ Вт}$$

$$P_{мі3} = 1,28 \cdot 1^2 \cdot 0,023 = 0,029 \text{ Вт}$$

$$P_{мі4} = 1,28 \cdot 10^{-6} \cdot 1,011 = 1,29 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

Сумарні втрати в міді:

$$P_{мі} = P_{мі1} + P_{мі2} + P_{мі3} + P_{мі4} = 0,129 + 0,026 + 0,029 + 0,0000013 = 0,184 \text{ Вт}$$

Втрати в фериті магнітопроводу:

$$P_{\phi} = P_{\gamma\phi} G_{\phi}, \quad [8.16]$$

$G_{\phi} = 0,04 \text{ кг}$ – маса магнітопроводу.

$$P_{\gamma\phi} = P_0 \left(\frac{f}{f^*} \right)^{\alpha} \left(\frac{B_m}{B_m^*} \right)^{\beta}, \quad [8.17]$$

де $f^* = 1 \text{ кГц}$ – базове значення частоти; $B_m^* = 1 \text{ Тл}$ - базове значення індукції.

Для фериту марки М2000НМ1: $P_0 = 68 \text{ Вт/кг}$; $\alpha = 1,2$; $\beta = 2,8$.

Значення робочої частоти $f = 50 \text{ кГц}$, значення індукції $B_m = 0,133 \text{ Тл}$. Таким

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						68
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чином:

$$P_{y\phi} = 68 \left(\frac{50}{1} \right)^{1,2} \left(\frac{0,133}{1} \right)^{2,8} = 26,185 \text{ Вт/кг};$$

$$P_{\phi} = 26,185 \cdot 0,04 = 1,04 \text{ Вт}$$

Втрати в трансформаторі.

$$P_{mp} = P_m + P_{\phi} = 0,184 + 1,04 = 1,224 \text{ Вт}$$

Перегрів обмоток трансформатора.

$$\Delta Q = P_{mp} \xi_Q, \quad [8.18]$$

де $\xi_Q = 19,1^{\circ} \text{ C/Вт}$ – температурний коефіцієнт потужності.

$$\Delta Q = 1,224 \cdot 19,1 = 23,37^{\circ} \text{ C}$$

Тобто трансформатор може працювати при температурі навколишнього середовища не більше 65° C , тоді нагрів його обмоток складатиме 89° C .

8.5 Розрахунок конденсаторів

Вихідний фільтр

Для визначення ємності конденсатора вихідного фільтру користуються формулою:

$$C_{out(min)} = \frac{I_{out} \cdot (1 - \partial_{(min)})}{f \cdot V_{ripple}}, \quad [8.19]$$

де I_{out} - номінальний вихідний струм, $\partial_{(min)}$ - найменший оціночний робочий цикл (хороша оцінка 0,3), V_{ripple} - бажана величина розмаху напруги пульсації на виході, прийmemo $V_{ripple} = 100 \text{ мВ}$.

$$C_{out(min)1} = \frac{1,5 \cdot (1 - 0,3)}{50 \cdot 10^3 \cdot 150 \cdot 10^{-3}} = 140 \cdot 10^{-6} (\Phi)$$

Використовуємо конденсатори С7 і С9 (КБР.ПБ 910775.01.000 Э3) по 100 мкФ, 35 В.

$$C_{out(min)2} = \frac{1 \cdot (1 - 0,3)}{50 \cdot 10^3 \cdot 150 \cdot 10^{-3}} = 93 \cdot 10^{-6} (\Phi)$$

Використовуємо конденсатор С8 100 мкФ, 35 В.

Схема запуску

Фільтруючий конденсатор С3 в схемі живлення мікросхеми DA1 (КБР.АКІТ.9469654.01.000 Э3) необхідний для зберігання енергії, достатньої для

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						69
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримки її роботи під час зворотного ходу трансформатора. Для цього ємність конденсатора повинна бути більшою або рівною 10 мкФ.

Розрахунок RC фільтра для гасіння викидів ключа

Згідно з рекомендаціями виробника мікросхеми стала часу RC фільтру має становити декілька сотень наносекунд, вибираємо $\tau = 200$ нс.

$$R7 \cdot C6 = \tau, \quad [8.20]$$

Виберемо для даного фільтру керамічний конденсатор C6 на 470 пФ, 50 В.

Тоді

$$R7 = \frac{\tau}{C} = \frac{200 \cdot 10^{-9}}{470 \cdot 10^{-12}} = 422 \text{ Ом.}$$

Вибір конденсаторів і резистора для схеми компенсації зворотного зв'язку по напрузі

Для оптимальної швидкості реагування підсилювача помилки на зміну вихідного сигналу для даної схеми рекомендовані наступні параметри елементів R3 – 270 кОм, 0,25 Вт; C4 – 82 пФ, 50 В; C5 – 0,015 мкФ, 50 В, які забезпечують максимальну швидкодію (при якій не виникають небажані коливні процеси).

Розрахунок вхідного фільтра

Розрахунок проводимо за формулою:

$$C = \frac{0,3 \cdot P_{in}}{f_{in} \cdot U_{in} \cdot \Delta U_n}, \quad [8.21]$$

де P_{in} - вхідна потужність ІБЖ, f_{in} - частота напруги після випрямляча, U_{in} - напруга після випрямляча, ΔU_n - величина пульсацій після фільтру.

$$C1 = \frac{0,3 \cdot 21,1}{100 \cdot 195 \cdot 5} = 64 \text{ мкФ.}$$

Вибираємо ємність конденсатора C1 рівною 100 мкФ.

Визначення параметрів генератора

Частото задаючий конденсатор C2 заряджається від виходу 8 мікросхеми DA1 через частото задаючий резистор R3, а розряджається внутрішнім джерелом струму.

Першим кроком при виборі компонентів генератора необхідно визначити потрібну величину «мертвого» часу. Виробник мікросхеми пропонує залежність «мертвого» часу від близьких до стандартних значень ємності C2. Наступним

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк. 70
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кроком, за допомогою інтерполяції, отримують відповідне значення R_3 , використовуючи в якості параметрів частоту генератора і ємність C_2 . Величина частото задаючого резистора може бути визначена з формули:

$$f = \frac{1,72}{R_3 \cdot C_2}, \quad [8.22]$$

Мікросхема UC3845 має вбудований лічильний тригер, який служить для отримання максимального робочого циклу генератора, рівного 50%.

Тому генератор необхідно встановити на частоту перемикання вдвічі вище бажаної.

8.6 Розрахунок високочастотного фільтру

Використаємо фільтр синфазних перешкод другого порядку. Основне призначення фільтру електромагнітних перешкод — фільтрація комутаційних перешкод і їх гармонік із вхідної лінії електроживлення. Почнемо з оцінки величини затухання, необхідної на заданій частоті перемикання.

$$f_c = f_{sw} 10^{\left(\frac{Att}{40}\right)}, \quad [8.23]$$

де Att – необхідне затухання при заданій частоті перемикань.

$$f_c = 50 \cdot 10^3 \cdot 10^{\left(\frac{-24}{40}\right)} = 12,5 \text{ кГц.}$$

Прийmemo, що коефіцієнт затухання ζ , рівний 0,707 або більше, в цьому випадку добре підходить, оскільки забезпечує — 3 дБ затухання на частоті зламу характеристики і не чинить перешкод внаслідок дзвону. Приймемо також, що імпеданс вхідної лінії складає 50 Ом. Розрахуємо значення, необхідне для синфазного індуктора:

$$L = \frac{R_l \cdot \zeta}{\pi \cdot f_c} = \frac{50 \cdot 0,707}{\pi \cdot 12,5 \cdot 10^3} = 900 \text{ мкГн;}$$

Визначена індуктивність забезпечується дроселем намотаним на двох склеєних разом кільцевих осердях типорозміру K20*12*6 із фериту марки 2000НМ. Обмотки 1 і 2 містять по 45 витків проводу ПЄВ-2 діаметром 0,6 мм.

									Арк.
									71
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ				

ВИСНОВКИ

В бакалаврській роботі було визначено принципи роботи рентгенофлуоресцентного спектрометра та розроблено комбіновану структурну схему приладу, визначено методи вимірювання масової долі елементів Pb, Zn, Cu, Na, K, Ni, Mn, V, Cl в пробі, створено оптичну принципову схему ПВП, розраховано блок живлення системи керування та збору інформації.

Отримано наступні характеристики первинного вимірювального перетворювача:

Діапазон вимірювання масової долі елемента (X):

- для Pb, Zn, Cu, Na, K 10 - 1000 ppm ;
- для Ni, Mn, V, Cl 20 – 500 ppm.

Час встановлення показів не перевищує 1хв.

Умови роботи первинного вимірювального перетворювача:

- температура оточуючого середовища 10-35⁰С;
- відносна вологість до 80%.

Характеристики блоку живлення :

- вхідна напруга: 220В ± 10%, 50 ± 1Гц;
- вихідна напруга: перший канал – 5В, другий канал – 12В;
- струм навантаження: перший канал – 1,5А, другий канал – 1А

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						72
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Вступ до РФА [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://sites.fem.unicamp.br/~liqcqits/facilities/xrf/\[Bruker_2006\]%20Introduction%20to%20X-ray%20Fluorescence%20\(XRF\).pdf](https://sites.fem.unicamp.br/~liqcqits/facilities/xrf/[Bruker_2006]%20Introduction%20to%20X-ray%20Fluorescence%20(XRF).pdf)
2. Основи РФА [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.amptek.com/resources/xrf>
3. Портативний EDXRF спектрометр [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1006>
4. Аналізатор ProSpector 3 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://elvatech.com/uk/products-3/prospector-3/>
5. Аналізатор ElvaX RoHS [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://elvatech.com/uk/products-3/elvax-rohs/>
6. Номенклатура характеристичних рентгенів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://xdb.lbl.gov/Section1/Periodic_Table/X-ray_Elements.html
- 7 ATmega328P [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://imrad.com.ua/ua/atmega328-au-4?srsltid=AfmBOooLpgRPXzQa3tu_EI5NEA77wmlue7Pz9rMkGrPrTHsLjNNqycGJ
- 8 UC3845B [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://radio-audio.com.ua/p1997961657-mikroshema-uc3845-uc3845b.html>
- 9 ElvaX Pro [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://elvatech.com/uk/products-3/elvax-pro/>
- 10 Mini X-Ray tube [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.amptek.com/products/mini-x2-x-ray-tube>

					КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ	Арк.
						73
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

КБР.АКІТ.2025

									Арк.
									74
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ.9469654.01.000 ПЗ				