

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіoeлектроніки
Факультет радіoeлектроніки та телекомунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра мікро- та нанoeлектроніки
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр
(ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження факторів, які впливають на роздільність
просвічувального електронного мікроскопа

Виконав: студент(ка) II курсу, групи РТЗ-419

Спеціальності

152 Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Метрологічне забезпечення якості продукції

Толстолюбська В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник Курбацький В.П.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Манукян О.А.
(прізвище та ініціали)

Форма № 25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет радіоелектроніки і телекомунікацій
 Кафедра мікро- та наноелектроніки
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Метрологічне забезпечення якості продукції
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МіНЕ
Погосов В.В.
 « »
20 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Толстолицької Вероніки Володимирівни
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Дослідження факторів, які впливають на роздільність просвічувального електронного мікроскопа

керівник проекту (роботи) Курбацький Валерій Петрович, к. ф.-м. наук, доцент,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «13» листопада 20 20 року №332

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 01.12.20
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Аналіз впливу аберацій магнітної системи ПЕМ на його експлуатаційні характеристики і методів усунення або зменшення цього впливу; оцінка ролі шуму, теплового і дробового; розрахунки погіршення роздільної здатності ПЕМ внаслідок шумів.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Характеристика конструкції і принципів роботи ПЕМ; шуми як випадковий процес; теплові і дробові шуми; методи розрахунку шумів в електронних пристроях; результати розрахунку розфокусування ПЕМ внаслідок шумів в корпусі приладу і граничного розділення.

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	Курбацький В.П., доцент каф. МіНЕ		
4	Севостьянов Р.В., доцент каф. ПТБД		
5	Якімцов Ю.В., доцент каф. ОПіНС		
Нормоконтроль	Коротун А.В., доцент каф. МіНЕ		

7. Дата видачі завдання « 30 » вересня 2020 року.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Пошук та підбір літературних джерел	30.09. – 10.10.	
2	Систематизація літературних даних	11.10. – 16.10.	
3	Складання і затвердження наукового завдання	17.10. – 20.10.	
4	Формування та уточнення наукового завдання	21.10. – 24.10.	
5	Знайомство з методами теоретичного описання шумів в електронних пристроях	25.10. – 30.10.	
6	Проведення розрахунків та аналіз їх результатів	31.10. – 16.11.	
7	Аналіз економічної ефективності проекту	17.11. – 20.11.	
8	Розробка заходів по охороні праці	21.11. – 24.11.	
11	Оформлення пояснювальної записки	25.11. – 30.11.	

Студент(ка)

_____ Толстолуцька В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

_____ Курбацький В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

ПЗ: 68 стор., 10 рис., 6 таблиць, 48 джерел.

Об'єкт дослідження – експлуатаційні характеристики просвічувального електронного мікроскопа (ПЕМ).

Мета роботи – дослідження факторів, які впливають на якість зображення ПЕМ, і оцінка впливу шуму на роздільну здатність приладу.

Розглянуто вплив аберацій, дробового і теплового шуму на роздільну здатність ПЕМ. Виконано розрахунки зміщення фокусу магнітної системи, спричиненого шумами в корпусі приладу, і граничної роздільної здатності для типових значень параметрів ПЕМ.

ПРОСВІЧУВАЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ МІКРОСКОП, РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ, МАГНІТНІ ЛІНЗИ, АБЕРАЦІЇ, ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ ВИСОКОГО РОЗДІЛЕННЯ, ТЕПЛОВИЙ ШУМ, ДРОБОВИЙ ШУМ, СПЕКТРАЛЬНА ГУСТИНА ФЛУКТУАЦІЙ, ГЕНЕРАТОР ФЛУКТУАЦІЙ СТРУМУ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ПРОСВІЧУВАЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ МІКРОСКОП ТА ЙОГО РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	9
1.1 Принцип роботи і будова просвічувального електронного мікроскопу.....	9
1.2 Магнітні лінзи та їх аберації.....	14
1.3 Проблема електронної мікроскопії високого розділення.....	20
2 ШУМИ В ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЯХ	24
2.1 Шуми як випадковий процес.....	24
2.2 Теплові та дробові шуми.....	37
3 РОЗРАХУНОК ГРАНИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕМ.....	31
3.1 Теоретичні основи розрахунку шумів в ПЕМ.....	31
3.2 Гранична роздільна здатність ПЕМ.....	32
4 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА.....	38
4.1 Планування розробки.....	38
4.2 Визначення витрат на розробку.....	39
4.2.1 Розрахунок основної заробітної плати.....	40
4.2.2 Розрахунок додаткової заробітної плати.....	41
4.2.3 Відрахування на єдиний соціальний внесок.....	42
4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання.....	42
4.2.5 Інші прямі витрати.....	45
4.2.6 Розрахунок накладних витрат.....	46
4.3 Розрахунок економічної ефективності НДР.....	47
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	50
5.1 Аналіз потенційних небезпек.....	50
5.2 Заходи щодо забезпечення безпеки.....	51
5.3 Заходи щодо виробничої санітарії та гігієни праці.....	54
5.4 Заходи з пожежної безпеки.....	57
5.5 Заходи з цивільної оборони.....	58

ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	64

ВСТУП

Довжина хвилі електрона з енергією 50 кеВ дорівнює 0,05 Å. Такі високоенергетичні електрони можуть проникати у тверде тіло на глибину порядку мікрметра. Якщо це тверде кристалічне тіло, то електрони дифрагуватимуть на атомних площинах усередині нього. Тобто електрони, що пройшли крізь тонкий зразок, формуватимуть електронну дифрактограму. Мікроскоп, у якому тонкі зразки освітлюються пучком високоенергетичних електронів, називають *просвічувальним (трансмісійним) електронним мікроскопом* (ПЕМ або ТЕМ) [1-3].

Просвічувальний електронний мікроскоп став основним інструментом мікроструктурного дослідження матеріалів [4,5]. На практиці в дифракційних картинах, отриманих рентгенівськими методами, міститься більше кількісної інформації, ніж в картинах електронної дифракції, але електрони мають одну важливу перевагу над рентгенівськими променями – їх легко сфокусувати. Фокусуючи електронний пучок, можна вимірювати дифракційні картини від мікроскопічних областей, і часто вдається вибрати для дифракційних вимірів відповідний монокристал. Оптику електронного мікроскопа можна використовувати для відображення електронної інтенсивності від зразка. Наприклад, зміни інтенсивності електронної дифракції при проходженні через тонкий зразок, звані «дифракційним контрастом», корисні для відображення дефектів, таких як дислокації, поверхні розділу і частинки вторинної фази.

Крім дифракційної контрастної мікроскопії, в якій вимірюють *інтенсивності* дифракційних відбиттів, в просвічувальній електронній мікроскопії високої роздільності HRTEM (або HREM) зберігається *фаза* дифрагованої електронної хвилі, яка конструктивно або деструктивно взаємодіє з фазою хвилі, що проходить. Цей метод «фазово-контрастного зображення» використовується для формування зображень стовпців атомів. Зображення високої роздільності стовпців атомів також можна сформувати за допомогою електронних нанопучків, використовуючи розсіювання електронів при великих

кутах для мінімізації взаємодії електронів між собою (метод, названий «великокутовим темнопoleвим зображенням»).

Крім дифракції та просторового зображення, високоенергетичні електрони в ПЕМ викликають збудження електронів атомів зразка. В аналітичній ПЕМ для отримання хімічної інформації від електронних збуджень використовуються наступні два методи спектromетрії:

- У енергодисперсійній рентгенівській спектromетрії EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectrometry) рентгенівський спектр збирається від малих областей зразка, освітлених сфокусованим електронним пучком, зазвичай з використанням твердотільного детектора. Характеристичне рентгенівське випромінювання від хімічних елементів використовується для визначення концентрації різних елементів в зразку.
- У спектromетрії енергетичних втрат електронів EELS (Electron Energy-Loss Spectrometry) вимірюються енергетичні втрати високоенергетичних електронів, що проходять через зразок. Інформація про локальні хімічні склади і структури отримується з параметрів спектра, викликаного збудженнями плазмонів і збудженнями електронів внутрішніх рівнів.

Якість зображення погіршується перш за все внаслідок недосконалості системи фокусування (хроматична та сферична аберації, астигматизм). Принципово неусувним фактором будь-яких наномасштабних вимірювань є зростання ролі фізичних флуктуацій і, як наслідок, – низьке відношення сигналу до шуму, висока чутливість до наведень, вібрацій і дрейфів різного походження [6]. Саме шуми конструкції та електронного обладнання визначають граничні характеристики ПЕМ.

Метою роботи є дослідження факторів, які впливають на роздільну здатність ПЕМ, оцінка розфокусування системи магнітних лінз, спричиненого шумами в корпусі приладу, і розрахунок граничної роздільної здатності для типових значень параметрів ПЕМ.

1 ПРОСВІЧУВАЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ МІКРОСКОП ТА ЙОГО РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1 Принципи роботи і будова просвічувального електронного мікроскопу

Освітлення в ПЕМ здійснюється за допомогою електронної гармати, фокусування пучка – за допомогою магнітних лінз. До решти необхідних складових належить екран (зазвичай, шар матеріалу, що світиться під дією електронів) і камера. Ці компоненти змонтовані у вертикальній колоні мікроскопа (рис. 1.1). Електрони рухаються по каналу, діаметр якого не перевищує міліметра, а решту товщини колони мікроскопа займають котушки, полюсні наконечники та трубки системи водяного охолодження.



Рис. 1.1 – Сучасний просвічувальний електронний мікроскоп

В сучасних ПЕМ передбачена можливість відображення змін дифракційної густини поперечного перерізу зразка (зображення дифракційного контрасту), зображення фазових контрастів від зразка (зображення з високою роздільною здатністю HRTEM), отримання дифракційних картин від обраних областей зразка (SAED). Можливо також проведення спектроскопічних вимірювань енергетичних втрат електронів (EELS) або енергодисперсійних рентгенівських спектрів (EDS) малим сфокусованим електронним пучком.

У сканувальній просвічувальній електронній мікроскопії STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy) вузький ($\sim 1\text{-}10 \text{ \AA}$) сфокусований пучок електронів рухається поперек зразка аналогічно телевізійної растрової картині. Синхронно з растровим скануванням збираються різні дані від зразка, такі як рентгенівські промені, що випромінюються, вторинні електрони або розсіяні (відбиті) електрони. Електрони, які проходять крізь зразок, детектуються висувним детектором в нижній частині колони мікроскопа. Режим роботи сканувальної TEM особливо корисний для спектроскопічних робіт, оскільки він дозволяє складати «хімічну карту» зразка.

Розглянемо будову сучасного ПЕМ [7,8] (рис. 1.2).

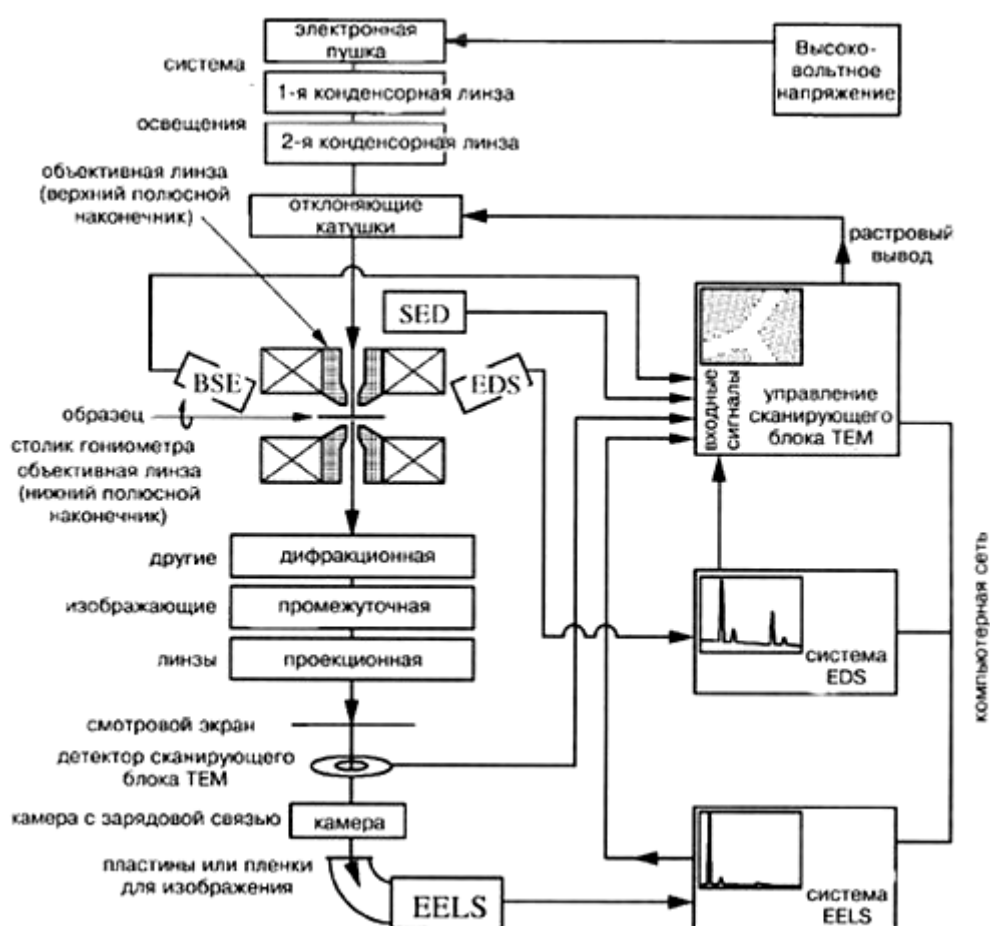


Рис. 1.2 – Блок-схема типового ПЕМ з можливістю сканування [8]

У верхній частині приладу міститься *електронна гармата*. Найчастіше ПЕМ мають термоелектронну гармату, яка дає змогу прискорювати електрони

різністю потенціалів з інтервалу 40-200 кВ. Необхідна енергія електронів залежить від роду зразка та інформації, яку ми хочемо отримати. Для деяких застосувань доцільно використовувати набагато вищі енергії електронів (кілька сотень кВ і більше). Сучасні автоемісійні гармати допомагають отримати дуже вузькі електронні пучки (порядку 1 нм на зразку), тому нині вони набувають щораз більшого поширення.

Під електронною гарматою розміщені дві чи більше *конденсорні лінзи*. Разом вони фокусують пучок, що виходить з гармати, і контролюють його діаметр, коли він падає на зразок.

Між конденсорними лінзами міститься *конденсорна апертура*, що дає змогу контролювати кут сходження пучка. Найпростіше уявляти собі конденсори як регулятори яскравості, однак насправді вони дають змогу керувати як областю зразка, яку досліджують пучком, так і типом дифракційної картини, що утворюється. Найменша площа освітлюваної ділянки зразка визначається ефективним розміром джерела в гарматі, силою конденсорних лінз і конденсорною апертурою. Ця площа обмежена знизу дифракцією на конденсорній апертурі та абераціями в системі конденсорів.

Під конденсором розміщена *камера зразків*. Дуже маленький зразок повинен бути у певній фіксованій позиції всередині об'єктивних лінз. Його можна переміщати на міліметри та нахиляти на великі кути. Крім того, Х-промені повинні мати змогу залишати цю область, якщо мікроскоп працює в аналітичному режимі.

Об'єктивна лінза дуже сильна, і зразок розміщується між її полюсними наконечниками. Роль об'єктивної лінзи полягає у формуванні першого проміжного зображення і дифрактограми (рис. 1.3). Дифракційна картина формується у задній фокальній площині лінзи. Перша *проекторна лінза* (яку часто називають *дифракційною лінзою*) може перебувати в двох різних положеннях, показаних на рис. 1.3, *а* та *б*. У режимі зображення вона сфокусована на площині зображення об'єктива (рис. 1.3, *а*). Збільшення кінцевого зображення на екрані мікроскопа визначається силою решти

проекторних лінз (рис. 1.2). У режимі дифракції проміжна лінза сфокусована на задній фокальній площині об'єктива (рис. 1.3, б).

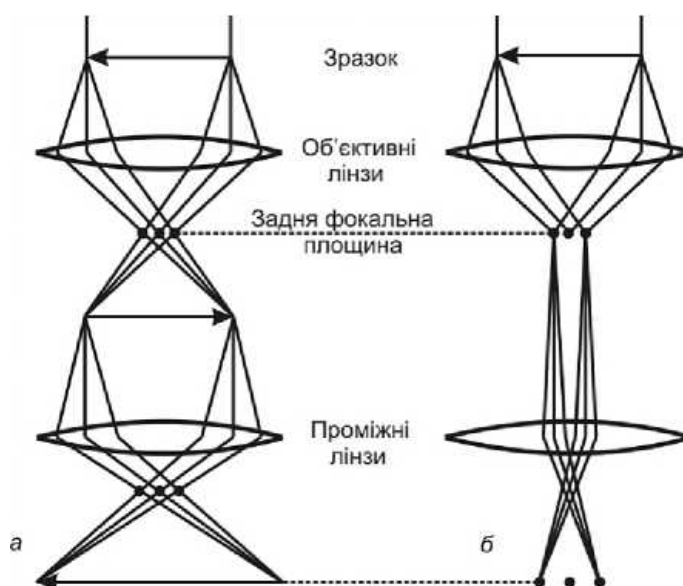


Рис. 1.3 - Об'єктивна і перша проєкторна лінзи в режимі зображення (а) та в режимі дифракції (б)

Необхідним елементом об'єктивної системи є тримач апертури, що дає змогу вставити у колону в задній фокальній площині об'єктивну апертуру, яка визначає кутовий діапазон розсіяних електронів, що можуть іти далі вниз колоною і брати участь у формуванні зображення.

Якщо апертура позиціонована так, щоб пропускати тільки електрони, що проходять (без розсіяння), формується *світлополеве* зображення BF (*Bright-Field*). Якщо апертура позиціонована так, щоб пропускати тільки певні розсіяні електрони, формується *темнополеве* зображення DF (*Dark-Field*). Фізичну причину, чому дифракційний контраст в світлополевих або темнополевих зображеннях багато краще, ніж в разі зображення без апертури, можна пояснити наступним чином. Як світлополеве, так і темнополеве зображення самі по собі демонструють сильний дифракційний контраст. Однак без об'єктивної апертури інтенсивність розсіяних променів на оглядовому екрані повторно додається з інтенсивністю променів, що проходять. Дифракційний контраст при цьому додаванні погіршується.

Часто потрібно досліджувати чи записувати дифрактограму від вибраної області зразка. Це можна зробити двома суттєво відмінними способами. У методі *дифракції від вибраної області* SAED (Selected Area Electron Diffraction) вибирають певну ділянку зразка (зазвичай, круглу), хоча освітлюють більшу область. В альтернативному методі – *дифракції від збіжного пучка* CBED (Convergent-Beam Electron Diffraction) – пучок збирається у маленьку пляму так, що дифрактограма утворюється від всієї (маленької) освітленої області.

Дифракцію від вибраної області зазвичай отримують за допомогою апертури, встановленої у площині зображення об'єктивної лінзи. Апертуру, використану з такою метою, називають *дифракційною (проміжною) апертурою*. Діаметр обраної області доцільно обмежити 1 мкм, оскільки один з ефектів сферичної аберації полягає в тому, що електрони, які проходять через зразок в околі 1-4 мкм від обраної області, роблять внесок у дифракційну картину. Ця похибка мала, коли діаметр вибраної області становить, скажімо, 50 мкм, однак стає суттєвою, якщо вибрана область має діаметр лише 1 мкм.

Єдиним способом отримати хорошу дифрактограму від області менше 1 мкм у діаметрі є використання методу дифракції від збіжного пучка CBED. У цьому випадку розмір обраної області дорівнює діаметру пучка на зразку, який формується конденсорною системою.

У найпростіших цифрових камерах використовують цифрові відеосистеми, спрямовані на фосфоресцентний екран. Є також значно складніші камери, що можуть фіксувати зображення від фосфоресцентного екрана через оптоволоконні лінії. Зі зростанням доступності та вдосконаленням технологій цифрового зображення щораз поширенішими стають матриці пристроїв зі зарядовим зв'язком (ПЗЗ). ПЗЗ матриця часто має систему охолодження для зменшення шуму, тому доступними стають великі часи експозиції.

1.2 Магнітні лінзи та їх аберації

В якості магнітних лінз в просвічувальних електронних мікроскопах використовуються короткі соленоїди [8]. Деякі подробиці щодо магнітного поля в соленоїді і поблизу нього наведені на рис. 1.4.

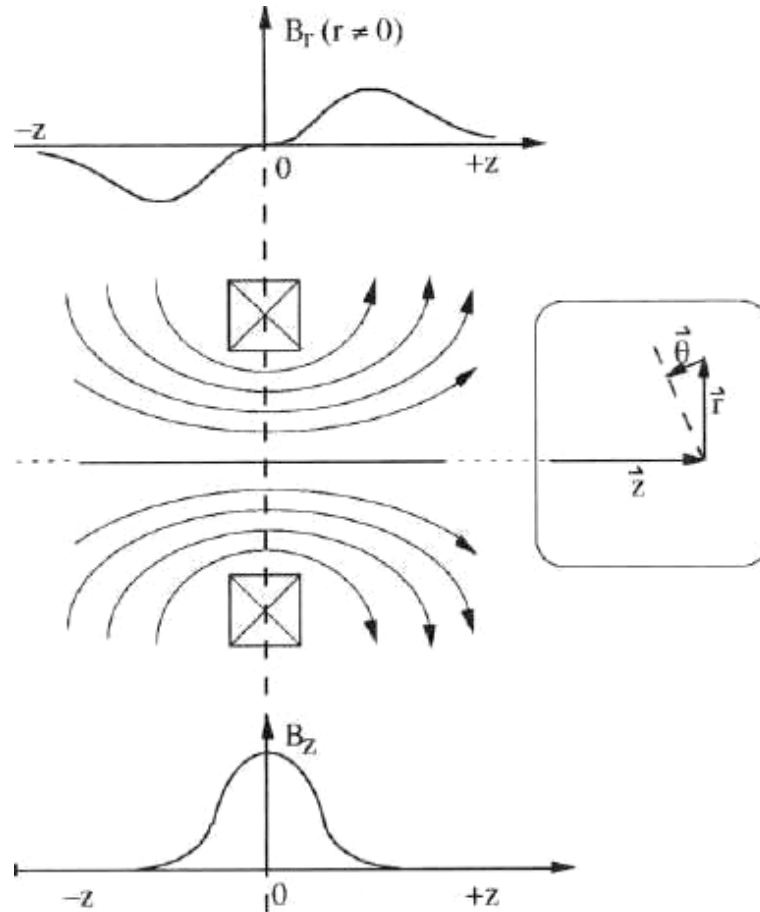


Рис. 1.4 – Магнітне поле в короткому соленоїді і навколо нього. Справа показана циліндрична система координат.

Компоненти магнітного поля уздовж координатних осей $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_z$ позначені відповідно B_r, B_θ, B_z . В силу циліндричної симетрії $B_\theta = 0$ і надалі тут не розглядається. Точну форму магнітного поля обчислити складно, оскільки в магнітних лінзах є феромагнітні сердечники, властивості яких змінюються нелінійно зі струмом лінзи, в силу чого задовільно змодельювати їх не вдається. Незважаючи на це, найбільш важливі властивості магнітного поля можна вивести із симетрії соленоїда:

B_r зникає в площині $z = 0$;

B_r антисиметрична щодо площини $z = 0$;

B_r досягає максимального значення на деякій відстані від соленоїда;

при заданому значенні r поблизу оптичної осі B_r збільшується з ростом r , оскільки $B_r = 0$ при $r = 0$;

B_z досягає максимуму при $z = 0$ і монотонно зменшується з ростом $|z|$ таким чином, який іноді можна описати функцією Гауса;

при великих значеннях $|z|$ і помірних r $B_r > B_z$.

Фокусуючу дію магнітної лінзи можна зрозуміти, розглянувши силу Лоренца, яка діє на електрон, що рухається:

$$\mathbf{F} = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (1.1)$$

У термінах компонентів швидкості електрона $\mathbf{v} = v_r \mathbf{e}_r + v_\theta \mathbf{e}_\theta + v_z \mathbf{e}_z$ і магнітного поля $\mathbf{B} = B_r \mathbf{e}_r + B_\theta \mathbf{e}_\theta + B_z \mathbf{e}_z$ компоненти сили $\mathbf{F}$, що діє на електрон, можна записати в наступному вигляді (за умови, що $B_\theta = 0$):

$$F_z = ev_\theta B_r, \quad (1.2)$$

$$F_\theta = -e(v_z B_r - v_r B_z), \quad (1.3)$$

$$F_r = -ev_\theta B_z. \quad (1.4)$$

Простежимо траєкторію електрона, який рухається в площині малюнку з віддаленої точки поблизу оптичної осі до соленоїда в напрямку осі z (рис. 1.4). Спочатку швидкість електрона спрямована під невеликим кутом до оптичної осі. До того, як електрон досягне соленоїда, він знаходиться під дією поля, яке майже повністю радіальне $B_r \gg B_z$. Векторний добуток швидкості (в даному випадку v_z) і B_r визначає силу F_θ , яка спрямована перпендикулярно до площини сторінки вгору. Ця сила забезпечує нову компоненту швидкості v_θ , через яку траєкторія електрона спіралью закручується за стрілкою годинника. Однак електрон ще уходить від оптичної осі, так що фокусування ще не відбулося.

Нова компонента швидкості v_θ дозволяє виконати фокусування. Обертаючись навколо оптичної осі зі швидкістю v_θ , з часом електрон

потрапляє в область, де істотно є B_z . Векторний добуток $v_\theta \mathbf{e}_\theta$ і $B_z \mathbf{e}_z$ забезпечує силу F_r , діючу у напрямку до оптичної осі і необхідну для фокусування.

Десь всередині соленоїда швидкість v_r стає рівною нулю. Як тільки електрон проходить вправо від цієї точки, швидкість v_θ викликає подальше фокусування, і швидкість v_r змінює знак. У той же час компонента B_r також змінює свій знак, і v_θ , досягнувши максимуму в точці, де $v_r = 0$, починає зменшуватися. Зрештою електрон проходить поблизу оптичної осі. При цьому його швидкість за величиною така ж, як у вихідній точці, але повернена на деякий кут θ і спрямована під іншим кутом до оптичної осі. Фокусування завершується.

Фокусна відстань лінзи зменшується з ростом струму лінзи, оскільки B_r і B_z стають більше, отже F_r також збільшується.

Реальна конструкція лінзи уявляє соленоїд, число ампер-витків в якому становить кілька тисяч. Соленоїд укладений в магнітний панцир з магнітом'якого матеріалу, який має кільцевої виріз для виходу магнітного поля. На рис. 1.5 показаний схематично розріз магнітної лінзи. Для зменшення

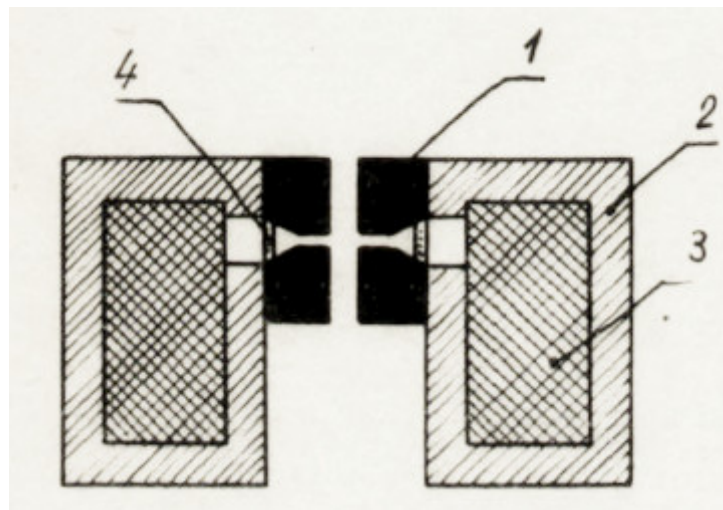


Рис. 1.5 – Схематичний розріз магнітної лінзи: 1 – полюсний наконечник;

2 – панцир; 3 – обмотка лінзи; 4 – дистанційне кільце

розмірів робочої області магнітного поля, збільшення напруженості поля і

зручності чищення і експлуатації мікроскопа в канал лінзи впритул вставляється полюсний наконечник, який є продовженням магнітного панцира лінзи. Обидва черевика полюсного наконечника виготовляються з магнітом'якого матеріалу з високою точністю і скріплюються немагнітним дистанційним кільцем. Якість виготовлення полюсного наконечника має суттєвий вплив на роздільну здатність лінзи.

Важливі експлуатаційні критерії ПЕМ – найменші просторові області, які можна розрізнити в зразку, або найменший сфокусований електронний пучок, який можна сформувати на зразку. Виявляється, що ці критерії визначаються переважно експлуатаційними характеристиками об'єктивної лінзи мікроскопа. Об'єктивна лінза ПЕМ, подібно до всіх магнітним лінз, має відхилення, які погіршують її експлуатаційні характеристики. *Роздільною здатністю (розділенням)* називається найменша відстань між двома точками зразка, які при використанні мікроскопа виглядають як два окремі об'єкти. Для того щоб забезпечити розділення мікроскопа, слід спочатку зрозуміти вплив аберацій лінзи.

Сферична аберация. Прояв сферичної аберации полягає в тому, що промені, які вийшли з точки O на оптичній осі лінзи під різними кутами α , фокусуються, тобто дають зображення точки O , в різних точках (O' і O'' для променів 1 і 2) на оптичній осі (рис. 1.6). Отже, в площині зображення P

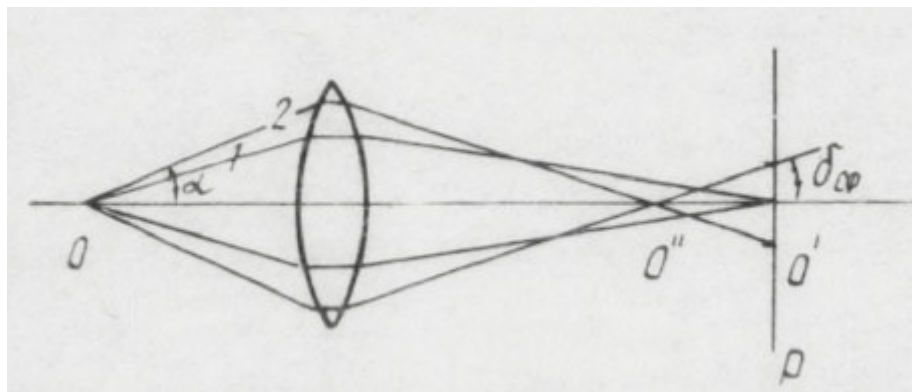


Рис. 1.6 – Хід променів у лінзі, яка має сферичну аберацию

зображення точки О буде представлене у вигляді кружка розсіювання радіуса δ_{cf} , що визначається максимальною величиною апертурного кута α .

Сферичною ця аберація названа за аналогією з відповідною аберацією оптичних лінз, що з'являється в лінзах, поверхні яких мають сферичну форму. В електронних лінзах причина сферичної аберації інша. При віддаленні від оптичної осі в магнітній лінзі зростає напруженість магнітного поля, і тому заломлююча здатність лінзи зростає при зміщенні від оптичної осі до периферії. Для досить малих апертурних кутів α справедливий наступний вираз для радіуса кружка розсіювання, викликаного сферичної аберацією:

$$\delta_{cf} = C_{cf} \alpha^3. \quad (1.5)$$

Тут C_{cf} – коефіцієнт сферичної аберації, що є характеристикою електронної лінзи. Він має розмірність довжини. У кращих лінз його величина $\cong 1$ мм. Звідси випливає, що для отримання розділення $10 \text{ \AA}$ необхідно використовувати апертурні кути $\alpha \cong 10^{-2}$. Це набагато менше, ніж в оптичній мікроскопії. З цієї причини можна використовувати тільки електрони в області біля осі лінзи. Такі електронні пучки називаються параксіальними.

Додатне значення C_{cf} є ключовою проблемою фазово-контрастної трансмісійної електронної мікроскопії високої роздільної здатності. У ТЕМ високого розділення об'єктивну лінзу зазвичай розглядають в термінах помилок в зсувах по фазі. У порівнянні з фазовими зсувами в ідеальній лінзі лінза з позитивною сферичною аберацією істотно зсуває вперед фази віддалених від осі електронних хвиль.

Хроматична аберація. Походження хроматичної аберації в електронній оптиці в загальних рисах таке ж, як і в світловій оптиці: фокусна відстань лінзи залежить від довжини хвилі λ . Електрони з різними енергіями, проходячи в лінзі однакові шляхи, потрапляють в різні фокусні точки. Розкид фокусних відстаней пропорційний розкиду енергії електронів.

Є дві основні причини подібного енергетичного розподілу. По-перше, електронна гармата генерує не монохроматичні електрони. Зазвичай менше 1 еВ розкиду енергії можна віднести на рахунок флуктуацій високовольтного живлення. Електрони, які випромінюються з розігрітої нитки розжарення, мають максвеловський розподіл швидкостей, який призводить до енергетичного розподілу з широким хвостом, що витягується до приблизно 1 еВ. При високих струмах пучка електрон-електронні взаємодії в найменшому поперечному перерізі конденсора викликають енергетичний розкид близько 1 еВ через явище, відоме під назвою «ефект Борша». Зразок сам є ще однією важливою причиною енергетичного уширення електронів. За непружного розсіювання високоенергетичних електронів плазмонними збудженнями електрони зазвичай втрачають 10-20 еВ. Розпливання зображень ТЕМ, викликане хроматичної аберацією, найменше в тонких зразках. Радіус кружка розсіювання, обумовленого хроматичної аберацією, дорівнює

$$\delta_{xp} = \alpha C_{xp} \frac{\Delta E}{E}, \quad (1.6)$$

де α – апертура лінзи, C_{xp} – коефіцієнт хроматичної аберації (приблизно 1 мм), $\Delta E/E$ – відносний розкид енергії електронів.

Астигматизм. Астигматизм спостерігається, якщо аксіальна симетрія лінзи недосконала. В циліндричній системі координат $\{r, \theta, z\}$ з напрямком z уздовж оптичної осі фокусуюча сила лінзи змінюється з кутом θ , знову призводячи до уширення фокусу і кружка найменшого розсіювання.

Практично будь-яка магнітна лінза має астигматизм. Основними причинами виникнення останнього є неточність механічної обробки полюсних наконечників і неоднорідність магнітного матеріалу. Оцінка показує, що для того, щоб астигматизм не впливав на розділення лінзи, точність обробки повинна бути порядку 0,02 мкм, що недосяжно при сучасних методах обробки.

Для усунення астигматизму в електронному мікроскопі служать спеціальні пристрої – стігматори. В якості стігматора в сучасному ПЕМ

використовується пара магнітних квадрупольних лінз, розташованих одна над іншою. Фокусуючу дію квадрупольної лінзи для електронів, що поширюються зверху перпендикулярно до площини малюнка, представлено на рис. 1.7. Сили Лоренца можуть стискати і розширювати пучок, формуючи коло, наприклад, з овалу. Якщо сила однієї з пар N-S в квадруполі більше, ніж іншої пари, відбувається відхилення пучка.

На відміну від сферичної аберації, астигматизм об'єктивної лінзи в ПЕМ можна виправити точно. Цю поправку дійсно можна виконати так добре, що подібний астигматизм стає дуже незначним фактором у розділенні зображення.

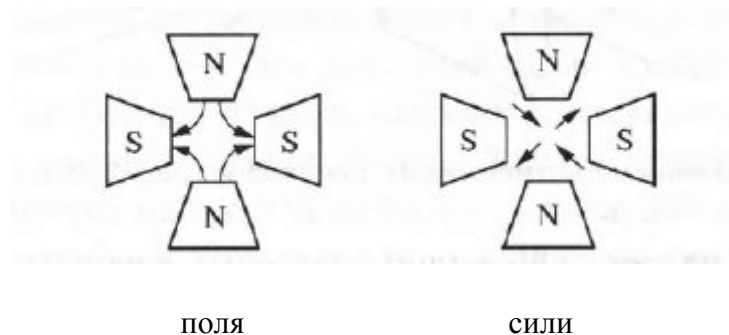


Рис. 1.7 – Магнітні поля і сили, які діють на електрон, що проходить через квадрупольну лінзу

Проте поправка на астигматизм об'єктивної лінзи – одна з найбільш важких проблем при навчанні електронної мікроскопії.

1.3 Проблема електронної мікроскопії високого розділення

Світлополеві і темнопольні методи не можна використовувати при формуванні зображення ПЕМ «високого розділення» стовпців атомів, показаних на рис. 1.8.

Хвильова функція $\psi(\Delta\mathbf{k})$ розсіяного електрона являє Фур'є-образ розподілу коефіцієнтів розсіювання матеріалу $f(\mathbf{r})$. Функція $f(\mathbf{r})$ відповідає розташуванню атомів в кристалі, $\Delta\mathbf{k}$ – дифракційний вектор. Фур'є-образ

розташування атомів реального простору в зразку $F[f(\mathbf{r})]$ можна записати в наступному вигляді:

$$\psi(\Delta\mathbf{k}) = F[f(\mathbf{r})], \quad f(\mathbf{r}) = F^{-1}[\psi(\Delta\mathbf{k})]. \quad (1.7)$$

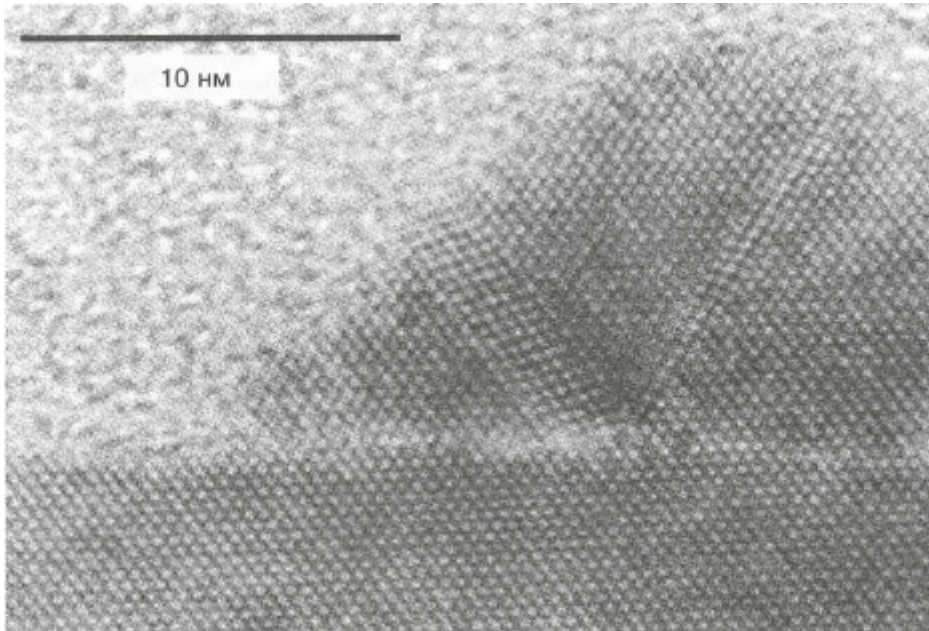


Рис. 1.8 – Острівець GaAs на кремнієвій підкладці

Точні форми прямого і зворотного перетворення Фур'є мають такий вигляд:

$$\psi(\Delta\mathbf{k}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\mathbf{r}) e^{-i\Delta\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r}, \quad (1.8)$$

$$f(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\Delta\mathbf{k}) e^{i\Delta\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} d\Delta\mathbf{k}. \quad (1.9)$$

Важливо, що як показує (1.9), всі деталі $f(\mathbf{r})$ містяться в $\psi(\Delta\mathbf{k})$, яка відповідає хвильовій функції електрона, що збуджує зразок. На жаль, для отримання всіх просторових подробиць необхідно виконати Фур'є-перетворення (1.9) в інтервалі від $-\infty$ до $+\infty$.

Інтервал $\Delta\mathbf{k}$ можна вибрати за допомогою об'єктивної апертури в задній фокальній площині об'єктивної лінзи, але подібна апертура обрізає межі Фур'є-перетворення (1.9). У зображенні, сформованому за малим інтервалом $\Delta\mathbf{k}$, можуть відобразитися тільки далекодіючі просторові характеристики. Для об'єктивної апертури, яка вибирає інтервал δk , найменші просторові характеристики в зображенні матимуть розмір δx , де:

$$\delta x \cong \frac{2\pi}{\delta k}. \quad (1.10)$$

Для розрізнення атомних періодичностей потрібна апертура, яка включає інтервал $\delta k \cong 2\pi/d$, де d - відстань між атомами. Цей інтервал δk насправді являє «вектор оберненої ґратки», або характерне розділення в k - просторі першої дифракційної плями і пучка, що проходить. У зображенні світлого поля і темного поля для збору електронів, які всі розсіяні в конкретну пляму, використовується багато менший інтервал δk . Таке обрізання в k - просторі означає, що звичайні режими світлого поля і темного поля не можуть сформувати зображення високого розділення.

Дійсно, для зображення високої роздільної здатності потрібно, щоб використовувалася об'єктивна апертура, досить велика, щоб включити як пучок, що проходить, так і щонайменше один дифрагований пучок. Пучок, що проходить (висловлюючись точніше, «розсіяний в прямому напрямку») необхідний для того, щоб забезпечити еталонну фазу хвильового фронту електрона. Насправді зображення з високою роздільною здатністю представляють собою інтерференційні картини, сформовані на основі фазових співвідношень дифрагованих пучків.

На жаль, навіть без об'єктивної апертури зображення на оглядовому екрані є не дуже хорошим. Хоч об'єктивна лінза зберігає інтенсивності дифрагованих хвиль, завжди спостерігається викривлення в їх фазових співвідношеннях, і воно збільшується з ростом Δk . Це фазове викривлення залежить від сферичної аберації об'єктивної лінзи. Ситуація гірша для тих хвиль, які далі відхилені від оптичної осі (тобто великих Δk). На практиці при формуванні зображення великі Δk не використовуються. По суті, дефекти об'єктивної лінзи обрізають використовуваний інтервал k - простору. В результаті просторова (точкова) роздільність ПЕМ протягом багатьох десятиліть обмежувалась значенням приблизно 1,5 Å. Однак успіхи в електронній оптиці та комп'ютерній обробці між 2000 і 2005 рр. дозволили

поліпшити поправку на сферичну аберацію об'єктивної лінзи [9-11]. Реальне просторове розділення, досягнуте в останнє десятиріччя, менше у 2-3 рази.

Таким чином, головним чинником, який обмежують роздільну здатність сучасного ПЕМ, є сферична аберація об'єктивної лінзи. Зображення з високим розділенням представляють картини інтерференції між дифрагованою і розсіяною в прямому напрямку хвильовими функціями. Інтерпретація таких картин включає комп'ютерне моделювання зразка і мікроскопа, а також підгонку цих моделей до експериментальних зображень. В процесі комп'ютерної обробки зменшуються викривлення, які вносяться сферичною аберацією.

У методі отримання зображення високого розділення, який називається *електронною птихографією*, взагалі обходяться без об'єктивної лінзи. Зразок освітлюється збіжним електронним пучком. Шляхом сканування, зміни апертури діафрагми або енергії електронів отримується велика кількість дифрактограм, що перекриваються. Комп'ютерна обробка цієї інформації дозволяє знайти розподіл амплітуди і фази розсіяної хвилі, розв'язати обернену задачу теорії розсіювання і побудувати вільне від викривлень якісне зображення. Таким методом роздільну здатність ПЕМ довели до $0,4 \text{ \AA}$ [12].

Інший спосіб отримання високого розділення – усунення сферичної аберації за допомогою компенсаційних магнітних полів. На такому шляху дослідникам, які працюють над проектом TEAM (Transmission Electron Aberration-Corrected Microscope), вдалось досягнути роздільної здатності $0,5 \text{ \AA}$.

Наступною метою стало досягнення розділення $0,33 \text{ \AA}$, але нова коректувальна система, на яку було витрачено великі кошти, не дала змоги покращити розділення приладу і навіть погіршила його [13]. Було з'ясовано, що причиною погіршення роздільної здатності є теплові шуми у металевому корпусі. Цей ефект, зрозуміло, був присутній і раніше, але виявився незначним.

В наступних розділах буде розглянуто шуми і оцінено їх вплив на роздільну здатність ПЕМ.

2 ШУМИ В ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЯХ

2.1 Шуми як випадковий процес

Функція перетворення $y = f(x)$ ідеального вимірювального приладу (ВП) однозначно пов'язує вихідний сигнал y тільки з однією вхідною фізичною величиною x . Функціональний зв'язок між x і y визначається взаємодією чутливого елемента ВП з об'єктом дослідження. Насправді вимірювальний сигнал залежить від дуже великої кількості неконтрольованих факторів, що характеризують сам об'єкт, навколишнє середовище і вимірювальний прилад, але не включених в ідеалізовану і спрощену функціональну залежність $y = f(x)$. В результаті спостерігається вихідний сигнал відрізняється від ідеального, описуваного функцією передачі ВП.

Шумами називаються відхилення вихідного сигналу

$$\delta y = y - f(x), \quad (2.1)$$

обумовлені фізичними впливами, які мають статистичну природу і внаслідок цього змінюються в часі випадково. В реальних умовах вимірювальний сигнал завжди доводиться виділяти на тлі шумів, а гранична чутливість ВП по відношенню до слабких сигналів часто визначається саме шумами [14, 15].

Шуми є *випадковими процесами* в часі, які описуються за допомогою статистичних характеристик. У теоретичних дослідженнях, як правило, використовуються величини, усереднені за всіма можливими реалізаціями випадкового процесу (усереднення за ансамблем) на основі заданих функцій розподілу. В експерименті завжди мають справу з усередненням за деяким часовим інтервалом, який може визначатися часом швидкодії приладу або задаватися умовами спостереження. Будемо позначати усереднення за ансамблем верхньою рисою $\bar{f}$, а усереднення за часом кутовими дужками $\langle f \rangle$.

Наш розгляд шумів обмежений випадком *стаціонарних* і *ергодичних*

випадкових процесів, коли статистичні характеристики не залежать від вибору початкового моменту часу, а усереднення за всіма можливими реалізаціями випадкового процесу дає такий же результат, як і усереднення за часом:

$$\bar{f} = \langle f \rangle. \quad (2.2)$$

Часовий інтервал усереднення повинен бути достатньо великим, щоб досліджувана система пройшла через всі можливі реалізації випадкового процесу.

Однією з найбільш важливих з практичної точки зору статистичних характеристик стаціонарного випадкового процесу $y(t)$ є *кореляційна функція другого порядку*

$$R_y(\tau) = \overline{y(t)y(t+\tau)}. \quad (2.3)$$

Для стаціонарного і ергодичного випадкового процесу кореляційна функція $R(\tau)$ не залежить від вибору моменту часу t , а усереднення за ансамблем і часом дають однакові результати. У багатьох практично важливих випадках стаціонарні і ергодичні випадкові процеси цілком характеризуються середнім значенням $\bar{y}$ випадкової величини і кореляційною функцією другого порядку.

Припустимо, що шумовий процес спостерігається в проміжку $[-T/2, T/2]$, так що зовні цього часового «вікна» можна прийняти $y = 0$. Позначимо цей східчастий процес $y_T(t)$. Оскільки $y_T(t) = 0$, коли $t \rightarrow \pm\infty$, існує фур'є - перетворення $Y_T(\omega)$ цієї функції

$$Y_T(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y_T(t) \exp(-i\omega t) dt. \quad (2.4)$$

З теореми Парсеваля випливає, що

$$\int_{-\infty}^{\infty} y_T(t) y_T(t+\tau) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |Y_T(\omega)|^2 \exp(i\omega\tau) d\omega. \quad (2.5)$$

Якщо $\tau = 0$, отримуємо

$$\int_{-\infty}^{\infty} y_T^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |Y_T(\omega)|^2 d\omega. \quad (2.6)$$

Кожна частина співвідношення (2.6) дорівнює повній енергії. Середня

потужність східчастого шумового процесу є повна енергія, поділена на T , яка при $T \rightarrow \infty$ набуває значення

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} y_T^2(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{2|Y_T(\omega)|^2}{T} d\omega. \quad (2.7)$$

Одностороння форма інтегралу у правій частині можлива тому, що оскільки функція $y_T(t)$ дійсна, підінтегральна функція – парна функція частоти. Знак $\lim$ і інтеграл у правій частині (2.7) можна поміняти місцями, якщо припустити, що спочатку проводиться усереднення за ансамблем. *Спектральна густина* (одностороння) стаціонарного процесу $y_T(t)$ визначається як середнє за ансамблем [18]:

$$\overline{S_y(\omega)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\overline{2|Y_T(\omega)|^2}}{T}, \quad (2.8)$$

так що середня потужність процесу

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} y_T^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \overline{S_y(\omega)} d\omega. \quad (2.9)$$

Спектральна густина стаціонарного процесу однозначно пов'язана з кореляційною функцією цього процесу. Співвідношення знаходимо з (2.5), поділяючи обидві частини на T , усереднюючи за ансамблем і записуючи при $T \rightarrow \infty$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{y_T(t)y_T(t+\tau)} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\overline{2|Y_T(\omega)|^2}}{T} \cos \omega \tau d\omega, \quad (2.10)$$

де для інтегралу у правій частині можливий запис в односторонній формі, тому що $|Y_T(\omega)|^2$ – парна функція частоти. Ліва частина (2.10) – це кореляційна функція $\overline{R_y(\tau)}$ процесу. Міняючи місцями $\lim$ і інтегрування у правій частині і враховуючи визначення (2.8), отримуємо

$$\overline{R_y(\tau)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \overline{S_y(\omega)} \cos \omega \tau d\omega. \quad (2.11)$$

Це співвідношення називають *теоремою Вінера-Хінчина*.

Вимірюваний енергетичний спектр залежить не тільки від фізичної

природи шуму, але і від характеристик вимірювального приладу. Для лінійних систем спектральна компонента $Y(\omega)$ вихідної величини описується формулою:

$$Y(\omega) = K(\omega)Y_{\text{вх}}(\omega), \quad (2.12)$$

де $Y_{\text{вх}}(\omega)$ – спектральна компонента вхідної величини і $K(\omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі вимірювального приладу. Середній квадрат флуктуацій випадкової величини на виході приладу дорівнює

$$\overline{y^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty |K(\omega)|^2 \overline{S_y(\omega)} d\omega. \quad (2.13)$$

Таким чином, вимірювані флуктуації будь-якої фізичної величини відрізняються від флуктуацій самої фізичної величини.

2.2 Теплові та дробові шуми

Як уже зазначалося, джерела шумів існують в об'єкті дослідження, вимірювальному приладі і навколишньому середовищі. Вони можуть мати різну фізичну природу. Досвід показує, що в електричних колах найбільш істотну роль віграють такі шуми [16]:

- 1) *тепловий шум*, пов'язаний з хаотичним тепловим рухом заряджених частинок речовини і електромагнітного поля;
- 2) *дробовий шум*, обумовлений дискретністю носіїв інформації у вигляді електронів і фотонів, а також випадковим характером процесу їх появи або зникнення;
- 3) *магнітний шум*, який викликається мікроскопічними особливостями процесу перемагнічування феромагнетиків, що мають доменну структуру;
- 4) шум, викликаний випадковими макроскопічними процесами в системах, які складаються з великої кількості елементів (*флікер-шум*);
- 5) *технічні шуми*, які визначаються нерегулярними впливами зовнішнього середовища, включаючи фізичні поля, а також нестабільністю джерел живлення вимірювальних приладів;
- 6) *завади*, однорідні за фізичною природою з вимірювальним сигналом, які

виникають внаслідок термоелектричних ефектів, струмів втрати, через недосконалість електричної ізоляції, ємнісних і індуктивних наводок.

Можливо, що двома різновидами шумів, які найбільш часто зустрічаються, є теплової і дробовий. *Тепловий шум* виникає внаслідок випадкових флуктуацій швидкості носіїв заряду (електронів і / або дірок) в резистивному матеріалі. Він присутній в системі, коли резистивний елемент знаходиться в тепловій рівновазі з навколишнім середовищем.

Нехай електричне коло має комплексний імпеданс $Z(\omega) = R + iX(\omega)$, де R – активний опір, X – уявна частина імпедансу. За відсутності джерела ЕРС хаотичний тепловий рух носіїв електричного заряду призведе до появи локальних струмів і напруг, які випадково змінюються в часі і є стаціонарними ергодичними процесами. Припустимо, що до резистору приєднаний ідеальний вольтметр з обмеженою частотною смугою пропускання:

$$|K(v)| = \begin{cases} 1, v_0 - \frac{\Delta v}{2} < v < v_0 + \frac{\Delta v}{2}; \\ 0, v < v_0 - \frac{\Delta v}{2}, v > v_0 + \frac{\Delta v}{2}, \end{cases} \quad (2.14)$$

де $K(v)$ – комплексний коефіцієнт пропускання вольтметра, Δv – ширина смуги пропускання вольтметра з центром на частоті v_0 .

Згідно з результатами Найквіста при температурі T резистора усереднені за часом покази вольтметра описуються формулами

$$\langle V_T \rangle = 0, \quad \langle V_T^2 \rangle = 4R \langle \varepsilon(v_0, T) \rangle \Delta v, \quad (2.15)$$

де

$$\langle \varepsilon(v_0, T) \rangle = \frac{h v_0}{e^{h v_0 / k T} - 1} + \frac{h v_0}{2}$$

– середня енергія гармонічного осцилятора з частотою власних коливань v_0 , який знаходиться в стані теплової рівноваги при температурі T , $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К – стала Больцмана, $h v_0 / 2$ – енергія осцилятора в

основному стані (енергія нульових коливань), $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка. Вираз (2.15) називається *формулою Найквіста*.

Набір гармонічних осциляторів в (2.15) описує флуктуаційне теплове електромагнітне поле, що виникає в результаті порушення локальної електричної нейтральності провідника завдяки хаотичному руху вільних електронів. Таким чином, формула Найквіста виражає середню потужність теплових електричних шумів через середню енергію теплового випромінювання, що припадає на частотну смугу пропускання вольтметра.

У класичній межі, коли $kT \gg h\nu_0$, $\langle \varepsilon(\nu_0, T) \rangle \approx kT$, формула Найквіста спрощується і набуває вигляду

$$\langle V_T^2 \rangle = 4RkT\Delta\nu. \quad (2.16)$$

Дробовий шум виникає в тому випадку, коли реалізується випадковий процес генерації або поглинання дискретних носіїв. Розглянемо термоелектричний струм, що протікає через вакуумний діод з підігрівом катоду. Виліт електронів з поверхні катоду внаслідок термоелектронної емісії є стаціонарним і ергодичним випадковим процесом, якщо температура і емісійні властивості поверхні катода не змінюються в часі.

Прийmemo, що ймовірність p виліту одного термоелектрона з поверхні катоду за досить малий проміжок часу Δt описується формулою

$$p = \alpha \Delta t, \quad (2.17)$$

де $\alpha > 0$ – стала, яка залежить від температури T катоду і його матеріалу. У разі досить малої величини Δt вилітом двох і більше термоелектронів можна знехтувати. Якщо виліти окремих термоелектронів вважати незалежними випадковими подіями, то ймовірність $P(m, \tau)$ появи m електронів за проміжок часу $\tau = N\Delta t$ визначається формулою Бернуллі. Коли $\Delta t \rightarrow 0$, $N \rightarrow \infty$, $N\Delta t = \tau = \text{const}$, розподіл Бернуллі переходить у розподіл Пуассона

$$P_{\Pi}(m, \tau) = \frac{\langle m \rangle^m}{m!} e^{-\langle m \rangle} \quad (2.18)$$

з дисперсією

$$D(m) = \langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2 = \langle m \rangle, \quad (2.19)$$

де $\langle m \rangle = \alpha \tau$ – середнє число термоелектронів, які з’являються за час τ .

Нехай за час τ через поперечний переріз провідника електричного кола постійного струму проходить N_τ електронів, які переносять заряд $Q_\tau = eN_\tau$. У разі дробового ефекту з (2.19) випливає, що

$$D(N_\tau) = \langle N_\tau \rangle, \quad D(Q_\tau) = e^2 \langle N_\tau \rangle = e \langle Q_\tau \rangle \quad (2.20)$$

Оскільки $I_\tau = Q_\tau / \tau$, то

$$D(I_\tau) = \frac{e \langle I_\tau \rangle}{\tau}. \quad (2.21)$$

При вимірі флуктуацій струму амперметром з частотною смугою пропускання $\Delta \nu$ незалежно від положення центральної частоти цієї смуги дисперсія струму

$$D(I) = 2e \langle I \rangle \Delta \nu, \quad (2.22)$$

де середній струм дорівнює $\langle I \rangle = e \langle m \rangle / \tau$. Спектральна густина флуктуацій струму $\delta I = I - \langle I \rangle$ має вигляд

$$\overline{S_I(\omega)} = 2e \langle I \rangle \quad (2.23)$$

і не залежить від частоти. Шум, спектральна густина якого не залежить від частоти, по аналогії з білим світлом називається білим шумом. Таким чином, дробовий шум відноситься до білого шуму.

Дробовий шум струму у колі, що містить вакуумну лампу з підігрівним катодом, вперше досліджував У. Шотткі в 1918 р. Такі ж дробові шуми спостерігаються у випадках зовнішнього і внутрішнього фотоефекту, в процесах рекомбінації електронів і дірок в напівпровідниках, а також при лазерній генерації світла, якщо інтенсивність випромінювання вимірюється за допомогою фотонних лічильників.

3 РОЗРАХУНОК ГРАНИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕМ

3.1 Теоретичні основи розрахунку шумів в ПЕМ

У попередньому розділі було обговорено фізичну природу шумів в та їх статистичні характеристики. Перейдемо до розгляду методів розрахунку параметрів шуму в електронних пристроях, зокрема, шумових характеристик ПЕМ.

Електронна схема з власним шумом (активна або пасивна) може бути представлена як безшумова схема із зовнішніми генераторами шуму [17]. Маючи на увазі подальше застосування до елементів і вузлів самого мікроскопу (без допоміжної електроніки), обмежимося розглядом пасивних лінійних двополіусників, що шумлять.

На рис. 3.1, *а* зображений двополіусник, що шумить. Імпеданс двополіусника $Z(\omega) = R(\omega) + iX(\omega)$, величина $v(t)$ (флуктуації напруги розімкненого кола між клемми А-В) утворюється від одного або більше джерел струму. Для розрахунку *теплого шуму* цього пристрою використовується еквівалентна схема, зображена на рис. 2.1, *б*, яка складається

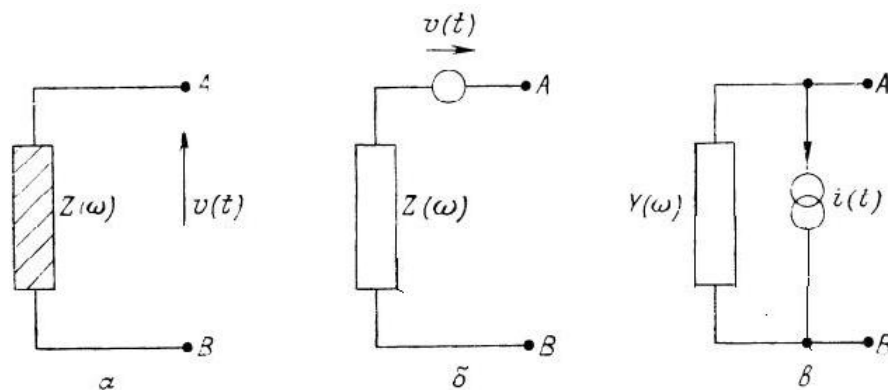


Рисунок 3.1 – Двополіусник із шумом (*а*), його еквівалентна схема (*б*)

та інший різновид цієї схеми (*в*)

с безшумової схеми з імпедансом $Z(\omega)$, з'єднаної послідовно з генератором флуктуацій напруги $v(t)$. Спектральну густину $v(t)$ можна представити у вигляді

$$\overline{S_v(\omega)} = 4kTR. \quad (3.1)$$

На рис. 3.1, в показаний інший варіант еквівалентної схеми. В цьому представленні двополюсник з власним шумом показаний у вигляді безшумової схеми з повною провідністю $Y(\omega) = 1/Z(\omega) = G(\omega) + iB(\omega)$, з'єднаною паралельно з генератором флуктуацій струму $i(t)$. Спектральну густину $i(t)$ можна записати у вигляді

$$\overline{S_i(\omega)} = 4kTG, \quad (3.2)$$

де $G(\omega) = R/(R^2 + X^2)$.

Дробовий шум у ПЕМ, тобто флуктуації струму електронного пучка внаслідок випадкового характеру емісії з катоду, моделюється ідеальним генератором струму. В загальному випадку спектральна густина флуктуацій струму дорівнює

$$\overline{S_i(\omega)} = 2e\xi I, \quad (3.3)$$

де I – середній струм, ξ – коефіцієнт подавляння. Очевидно, що коефіцієнт подавляння повного дробового шуму дорівнює одиниці, але при значних згладжуючих ефектах, наприклад, внаслідок просторового заряду або явища захвату, ξ стає менше одиниці.

3.2 Гранична роздільна здатність ПЕМ

Сучасні просвічувальні електронні мікроскопи (ПЕМ) мають роздільну здатність менше одного ангстрема. Подальше її поліпшення стикається з принциповими труднощами. Можливості збільшення роздільності за рахунок вдосконалення системи магнітних лінз майже вичерпано. Головним фактором, який її обмежує, стають шуми.

Нашою метою є дослідження впливу шумів конструкції ПЕМ на його на роздільну здатність, розрахунок розфокусування системи магнітних лінз,

спричиненого шумами в корпусі приладу, і оцінка граничної роздільної здатності для типових значень параметрів ПЕМ.

Нагадаємо, що роздільною здатністю називається найменша відстань між двома точками зразка, зображення яких виглядає як два окремі об'єкти. В принципі, межа розділення ПЕМ визначається дифракцією електронів на лінзах та апертурах і дорівнює за порядком величини довжині хвилі електронів, яка становить кілька сотих ангстрема. В дійсності шуми приладу встановлюють межу розділення на значно нижчому рівні. Розглянемо спочатку дробовий шум.

Дробовий шум впливає на роздільну здатність ПЕМ, зменшуючи відношення сигнал/шум. Джерелом шуму є флуктуації емісії з катоду. Оцінимо величину відношення сигнал/шум на люмінесцентному екрані ПЕМ. Використовуючи формулу (3.3), знаходимо середній квадрат флуктуацій струму ($\xi = 1$):

$$\overline{\delta I^2} = \overline{S_i(\omega)} \Delta \nu = 2e I \Delta \nu. \quad (3.4)$$

Смугу частот можна оцінити за тривалістю післясвітіння люмінофору τ :

$$\Delta \nu \approx 1/\tau. \quad (3.5)$$

В результаті отримуємо:

$$\text{Сигнал/шум} = I / \sqrt{\overline{\delta I^2}} = \sqrt{I \tau / 2e}. \quad (3.6)$$

Для типових значень $I = 1$ нА, $\tau = 1$ с знаходимо, що сигнал/шум $\approx 6 \cdot 10^4$. Оскільки звичайно екран фотографують з великим часом експозиції або використовують інші засоби накопичення інформації, смуга частот $\Delta \nu$ є набагато вужчою, а відношення сигнал/шум набагато більшим. Таким чином, навіть при малих струмах впливом дробового шуму на розділення ПЕМ можна знехтувати.

Як вже було сказано (розділ 1.3), дослідникам, працюючим за проектом ТЕАМ над створенням ПЕМ з розділенням $0,33 \text{ \AA}$, не вдалося досягнути мети внаслідок втручання несподіваного джерела шуму [13]. Причину з'ясували, коли знайшли, що такий же самий ефект погіршення роздільної здатності

спостерігається, якщо замість корегувальної системи поставити звичайну металеву трубу, схожу на ту, в якій система вміщувалась. Таким чином, стало зрозуміло, що джерелом шуму, який призводить до розмивання зображення, є теплові флуктуації швидкості електронів у металевих стінках труби, які збурюють своїми полями рух електронів пучка.

Оцінимо величину флуктуацій поля у районі магнітних лінз ПЕМ, обумовлених тепловим шумом в корпусі пристрою, і погіршення роздільної здатності, яке виникає з цієї причини.

Прийmemo, що корпус уявляє собою циліндричну трубу середнього діаметру D і висоти h . Температура пристрою T . Розглядаємо корпус як послідовно з'єднані індуктивність L і опір R , замкнені на генератор флуктуацій струму (рис. 3.2).

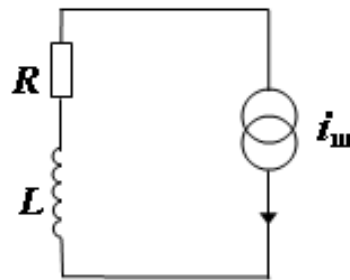


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема для розрахунку шумів у корпусі ПЕМ

Спектральна густина флуктуацій струму визначається за формулою (3.2):

$$\overline{S_i(\omega)} = 4kT \operatorname{Re} \left(\frac{1}{Z(\omega)} \right) = 4kT \operatorname{Re} \left(\frac{1}{R + i\omega L} \right) = \frac{4kTR}{R^2 + \omega^2 L^2}. \quad (3.7)$$

Середній квадрат теплових флуктуацій струму в стінці труби дорівнює

$$\overline{\delta I^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \overline{S_i(\omega)} d\omega = \frac{2kT}{\pi R} \int_0^\infty \frac{d\omega}{1 + \omega^2 L^2 / R^2} = \frac{kT}{L} \quad (3.8)$$

(див. формулу (2.9)).

Флуктуації струму спричиняють флуктуації магнітного поля в районі магнітних лінз мікроскопу, середня величина яких дорівнює

$$\delta B = L\sqrt{\delta I^2} / A = \sqrt{kTL} / A, \quad (3.9)$$

де $A = \pi D^2 / 4$ – площа перетину труби. Користуючись для індуктивності труби формулою $L = \mu_0 A / h$, де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, в результаті маємо

$$\delta B = \frac{2}{D} \sqrt{\frac{\mu_0 kT}{\pi h}}. \quad (3.10)$$

Для $D = 20$ см, $h = 1$ м, $T = 300$ К отримуємо $\delta B = 4 \cdot 10^{-13}$ Тл. Для порівняння: максимальна припустима величина стороннього змінного магнітного поля в районі магнітних лінз (за інструкцією з експлуатації) становить 10^{-7} Тл, поле магнітної лінзи за порядком величини дорівнює 10^{-3} Тл.

Точний розрахунок погіршення Δ роздільної здатності ПЕМ, обумовленого тепловими флуктуаціями в корпусі приладу, неможливий за відсутності відомостей про деталі конструкції системи лінз. Для оцінок скористуємось формулою для фокусної відстані f :

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8mE} \int_0^h B^2(z) dz = \frac{eh}{8mE} \langle B^2 \rangle \quad (3.11)$$

де m – маса електронів, E – їх енергія (в електрон-вольтах), B – аксіальна компонента магнітного поля. Кутові дужки означають усереднення вздовж осі приладу (за довжиною труби). Будемо вважати, що Δ приблизно дорівнює середньому зміщенню фокуса δf через флуктуації поля δB . Зробивши у формулі (3.11) заміни $f \rightarrow f - \delta f$, $B \rightarrow B + \delta B$, отримуємо

$$\Delta \approx \delta f \approx 2f \frac{\delta B}{\langle B \rangle} \quad (3.12)$$

Для $f = 10$ см, $\langle B \rangle = 10^{-3}$ Тл маємо $\Delta \cong 0.1$ Å. Такий результат узгоджується з висновком автора роботи [13], що визначальним чинником для граничної роздільної здатності ПЕМ є теплові флуктуації у корпусі приладу.

Формулу (3.10) можна записати у вигляді

$$\delta B = \sqrt{\frac{\mu_0 k T}{V}}, \quad (3.13)$$

де V – внутрішній об'єм труби. Таким чином, середньоквадратична величина флуктуацій поля всередині труби визначається, окрім температури, тільки

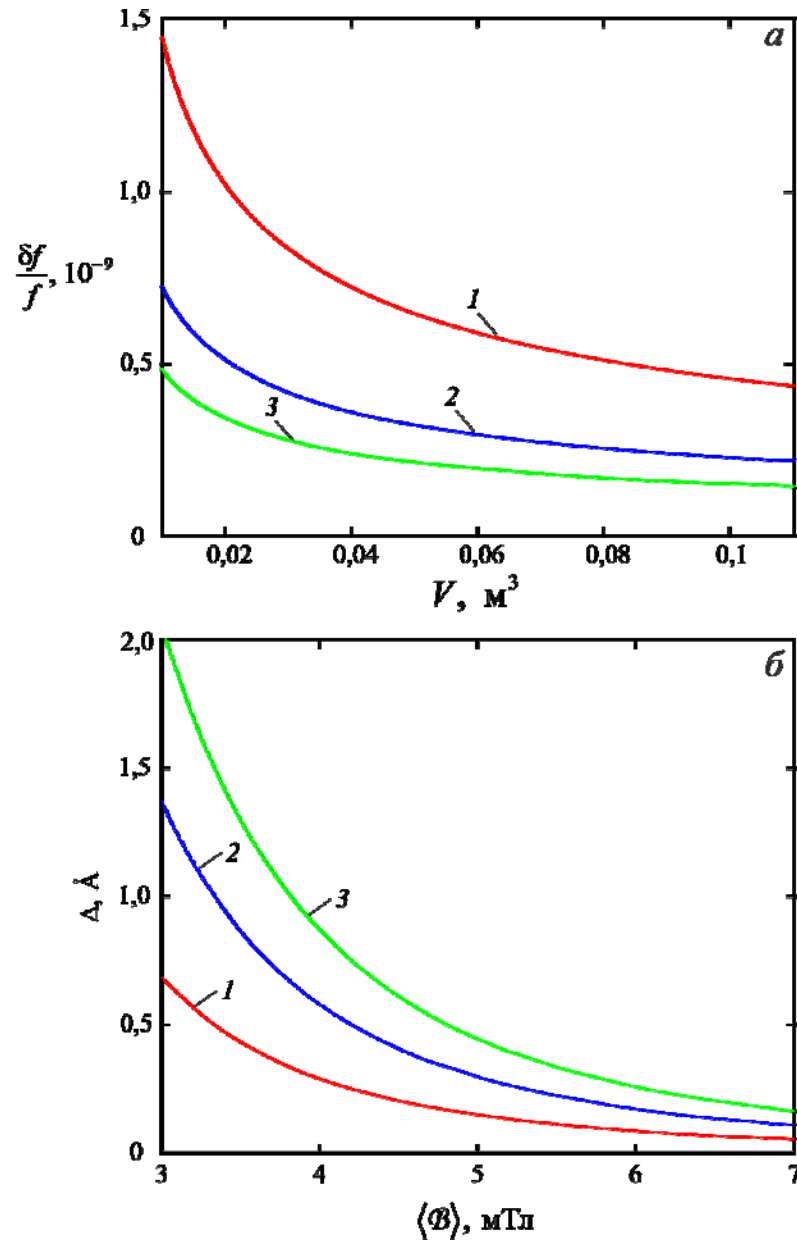


Рис. 3.3 – Залежність відносного зміщення фокусу магнітної системи ПЕМ від внутрішнього об'єму пристрою за різних значень середнього поля $\langle B \rangle = 1, 2, 3$ мТл (а) та роздільної здатності ПЕМ від середнього поля магнітної системи за різних значень енергії електронів $E = 50, 100, 150$ кеВ (б)

об'ємом. Цей результат має ясний фізичний зміст. Середня енергія теплових флуктуацій колового струму у стінках труби $\frac{1}{2}kT$ дорівнює енергії флуктуацій аксіальної компоненти поля, які при умові достатньої величини відношення h/D локалізовані всередині труби:

$$\frac{\delta B^2}{2\mu_0}V = \frac{1}{2}kT. \quad (3.14)$$

Звідси випливає формула (3.13). Рис. 3.3, *а* ілюструє результати розрахунку за формулами (3.12) і (3.13) відносного зміщення $\delta f/f$ фокусу системи в залежності від об'єму пристрою.

На рис. 3.3, *б* наведені результати розрахунку роздільної здатності ПЕМ для типових значень середнього поля магнітної системи і енергії електронів пучка. Очевидно, що за значення поля $\langle B \rangle > 7$ мТл ми виходимо на межу роздільності, яка дорівнює кільком десятим ангстрема.

4 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

4.1 Планування розробки

Таблиця 4.1 - Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Розробка приладу-трансмісійного електронного мікроскопу	1.Наукові дослідження	Дозволяє отримувати зображення об'єктів з максимальним збільшенням до 10 ⁶ разів, чим перевищує дозвіл традиційного оптичного мікроскопу.
	2.Біологія та біологічні науки	
	3.Промисловість	

Весь комплекс розробки можна розділити на етапи. Для кожного етапу вказується трудомісткість, кількість виконавців і тривалість робіт. У розробці беруть участь магістр в перебігу протягом 1 місяця і консультант протягом 6 днів. Розробка розпочинається 1 жовтня і повинна бути виконана до 31 жовтня 2018 року. Тривалість робіт визначають за формулою:

$$T_{\text{ц}} = \frac{Q}{R}, \quad (4.1)$$

де $T_{\text{ц}}$ – тривалість циклу, днів;

Q – трудомісткість, людино-днів;

R – кількість виконавців, чел.

Отримана інформація зведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Завдання та обов'язки по розробці

Назва роботи	Трудомісткість		Виконавці	Тривалість, днів
	люд.- дні	% до підсумку		
1. Технічна пропозиція	2	5,55	Магістр Консультант	1
2. Технічне завдання	2	5,55	Магістр Консультант	1
3. Аналіз предметної області	6	16,6	Магістр Консультант	3
4. Визначення вимог до розробки	4	8,33	Магістр	4
5. Розробка схеми експерименту	10	41,66	Магістр	10
6. Експеримент	4	11,1	Магістр Консультант	2
7. Складання документації	1	11,1	Магістр Консультант	1
Разом	29	100		22

За даними табл. 6.1 складається зведений стрічковий графік планування розробки, який представляє собою таблицю, в першому стовпці якої розміщені в порядку збільшення термінів початку виконання всі види роботи, а навпаки - календарний період їх виконання. Даний графік наведено в табл. 4.2.

4.2 Визначення витрат на розробку

Для визначення витрат на розробку складається калькуляція кошторисної вартості робіт, яка включає наступні статті:

- основна заробітна плата;
- додаткова заробітна плата;

- відрахування на єдиний соціальний внесок;
- витрати на спеціальне обладнання;
- матеріали і комплектуючі вироби;
- накладні витрати;
- податки.

4.2.1 Розрахунок основної заробітної плати

Витрати за цією статтею складаються з планового фонду зарплати всіх категорій працівників, зайнятих у розробці. Розрахунок зарплати ведеться на підставі даних про трудомісткість, представлених в табл. 4.3.

Таблиця 4.2 – Зведений стрічковий графік планування розробки

Найменування робіт					
	1.10	9.10	16.10	23.10	30.10
1. Технічна пропозиція					
2. Технічне завдання					
3. Аналіз предметної області					
4. Визначення вимог до розробки					
5. Розробка схеми					

експерименту							
6. Експеримент							
7. Складання документації							



–консультант



– магістр

Таблиця 4.3 – Розрахунок основної заробітної плати

Посада виконавця	Чисельність, чол.	Місячний оклад, грн.	Кількість місяців	Сума ЗП, грн
Магістр	1	5000	1	5000
Консультант	1	5600	0,3	1680
Підсумок	2			6680

4.2.2 Розрахунок додаткової заробітної плати

Додаткову заробітну плату приймають рівною 10% від основної заробітної плати працівника. Розраховують за формулою:

$$ЗП_{\text{дод}} = ЗП_{\text{осн}} \cdot 0,1 \quad (4.2)$$

Підставивши величину основної заробітної плати в дану формулу, отримаємо:

$$ЗП_{\text{дод}} = 46000 \cdot 0,1 = 4600 \text{ грн.}$$

4.2.3 Відрахування на єдиний соціальний внесок

Відрахування на єдиний соціальний внесок становлять 22% і беруться від основної та додаткової заробітної плати. Вони розраховуються за формулою:

$$ВД = ЗП_{осн} \cdot 0,22 \quad (4.3)$$

або

$$ВД = 53520 \cdot 0,22 = 11774,40 \text{ грн.}$$

4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання

В цю статтю входять витрати на придбання, транспортування, монтаж і налагодження нестандартного обладнання.

Практично, в даному випадку, в цій статті враховуються витрати на оплату машинного часу ЕОМ для виконання чисельних розрахунків. Для чого необхідно скласти кошторис «витрат на утримання і експлуатацію устаткування» виходячи з якої визначиться вартість одного машино-год. роботи ПК, після множення якої на машинний час пішло на розрахунки отримаємо витрати на оплату машинного часу.

Амортизаційні відрахування визначають за формулою 4.4:

$$A = \Phi_{\phi} \cdot \frac{H_a}{100} \quad (4.4)$$

де Φ_{ϕ} – балансова вартість обчислювальної техніки, грн.;

H_a – норма амортизаційних відрахувань на повне відновлення обчислювальної техніки, %.

Балансова вартість обчислювальної техніки становить 10000 грн.
Отримуємо:

$$A = 10000 \cdot 0,25 = 2500 \text{ грн}$$

Статтю «експлуатація обладнання» розраховують підсумовуванням витрат на електроенергію і допоміжні матеріали і розраховується по формулі.

$$C_e = N_n \cdot \Phi_{ef} \cdot K_{зч} \cdot K_{зн} \cdot C_e \quad (4.5)$$

де N_n – номінальна потужність ЕОМ, кВт;

Φ_{ef} – річний ефективний фонд часу роботи ЕОМ, машино–год.;

$K_{зч}$ – середній коефіцієнт завантаження за часом;

$K_{зн}$ – коефіцієнт завантаження по потужності;

C_e — ціна одного кВт·ч електроенергії, грн./ (кВт·ч).

Номінальна потужність ЕОМ – 0,2 кВт. Річний ефективний фонд часу роботи ЕОМ становить 1800 годин. Середні коефіцієнти завантаження за часом і за потужністю рівні відповідно 0,9 і 0,6. Ціна однієї кіловат–години електроенергії становить 2,11 грн.

Отримаємо:

$$C_e = 0,2 \cdot 1800 \cdot 0,9 \cdot 0,6 \cdot 2,11 = 410,18 \text{ грн}$$

Зарплата обслуговуючого персоналу розраховується по формулі 4.6:

$$ЗП_{обсл} = \Phi ЗП_p \cdot (1 + K_{відр}) \cdot \frac{t_{обсл}}{\Phi_{ef.обсл}} \quad (4.6)$$

$\Phi ЗП_p$ – річний фонд заробітної плати (основної і додаткової) обслуговуючих робітників, грн.;

$K_{відр}$ – коефіцієнт, який враховує відрахування на соціальне страхування і в інші фонди;

$t_{обсл}$ – час впродовж року, який необхідний на технічне обслуговування ЕОМ, год./рік;

$\Phi_{эф.обсл}$ – річний ефективний фонд часу обслуговуючого персоналу, год./рік.

Місячна заробітна плата обслуговуючого персоналу складає 3723 грн., а річний фонд заробітної плати складає 44676 грн. Річний ефективний фонд робочого часу обслуговуючого ПК робітника 1750 год./рік. На обслуговування одного ПК потрібно по 1 годині в місяць, що в рік складає 12 годин.

Отримаємо:

$$ЗП_{обсл} = 44676 \cdot (1 + 0,22) \cdot \frac{12}{1750} = 373,75 \text{ грн.}$$

Стаття «Поточний ремонт обладнання» приймається рівною 3% від балансової вартості обладнання і становить 300 грн.

Розраховані статті витрат на утримання і експлуатацію устаткування внесені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Кошторис витрат на утримання і експлуатацію обладнання

Найменування статей витрат	Сума, грн.
Амортизація обладнання	2500
Експлуатація обладнання	410,18
Обслуговуючий персонал	373,75
Поточний ремонт обладнання	300
Разом	3583,93

Витрати на оплату машинного часу ЕОМ для написання і налагодження програмних засобів визначаються за формулою

$$C_{mo} = B_{екс} \cdot t_{mo}, \quad (4.7)$$

де C_{mo} – витрати на оплату машинного часу, грн.;

$B_{екс}$ – експлуатаційні витрати на одну годину машинного часу цієї цифрової ЕОМ, грн./машино–год.;

t_{mo} – машинний час цифрової ЕОМ для розрахунків, машино–год.

Експлуатаційні витрати на одну машино–год. використовуваної ЕОМ розраховують діленням суми витрат за кошторисом «Витрати на утримання і експлуатацію устаткування (ЕОМ)» на річний ефективний фонд часу роботи ЕОМ. Річний ефективний фонд часу роботи ЕОМ дорівнює 1800 годин. В результаті експлуатаційні витрати на одну машино–год. рівні:

$$B_{екс} = 3583,93 / 1800 = 1,99 \text{ грн./машино–год.}$$

ЕОМ експлуатується 120 днів в одну зміну, що становить в сумі 960 годин. Таким чином, витрати на оплату машинного часу складуть:

$$C_{mo} = 1,99 \cdot 960 = 1911,43 \text{ грн.}$$

4.2.5 Інші прямі витрати

В інші прямі витрати включаються витрати на програмне забезпечення, яке використовується при роботі:

- дольове ПЗ що використовується постійно при роботі ПК (Mathcad 15) – 1200 грн. без НДС;

– цільове ПЗ, купується для даного конкретного завдання (Mathcad 15) – 3000 грн. без НДС;

$$S_{\text{дол.ПЗ}} = \frac{C_{\text{ПЗ Windows}} \cdot T_{\text{КТС}}}{\Phi_{\text{еф.КТС}} \cdot T_{\text{с.ПО}}} \quad (4.8)$$

$$S_{\text{ціль.ПЗ}} = C_{\text{ПЗ MC}} \quad (4.9)$$

де $S_{\text{дол.ПЗ}}$ – витрати на дольове ПЗ при розрахунковій роботі, грн;

$S_{\text{ціль.ПЗ}}$ – витрати на цільове ПЗ, яке потрібно виключно для розрахунків, грн;

$C_{\text{ПЗ Windows}}$ – ціна ПЗ Windows 10 (без НДС), грн;

$T_{\text{с.ПО}}$ – ціна ПЗ Mathcad 15 (без НДС), грн;

$T_{\text{КТС}}$ – машинний час КТС, необхідний користувачу для роботи, машино–час/год;

$\Phi_{\text{еф.КТС}}$ – річний ефективний фонд часу роботи КТС, машино–час/год;

$T_{\text{с.ПО}}$ – термін служби дольового ПО, років.

$$S_{\text{дол.ПЗ}} = \frac{1200 \cdot 944}{1800 \cdot 5} = 125,87 \text{ грн.}$$

$$S_{\text{ціль.ПЗ}} = 3000 \text{ грн.}$$

$$S_{\Sigma} = 125,87 + 3000 = 3125,87 \text{ грн.}$$

4.2.6 Розрахунок накладних витрат

До накладних витрат відносяться витрати на загальне управління і загальногосподарські потреби (заробітна плата апарату управління, канцелярські витрати і т.д.), утримання та експлуатацію будівель.

Накладні витрати включаються до вартості розрахункової роботи непрямым шляхом – у відсотках до основної заробітної плати інженера–дослідника. В даному випадку накладні витрати складають 40% до основної заробітної плати інженера–дослідника, становить 18400 грн.

Результати визначення витрат на виконання чисельних розрахунків у вигляді калькуляції кошторисної вартості робіт наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Калькуляція кошторисної вартості робіт

№	Найменування статей витрат	сума, грн.	Питома вага до підсумку, %
1	Основна заробітна плата	46000	53,60
2	Додаткова заробітна плата	4600	5,36
3	Відрахування єдиного соціального внеску	11774,40	13,72
4	Витрати на експлуатацію обладнання	1911,43	2,23
5	Інші прямі витрати	3125,87	3,64
6	Накладні витрати	18400	21,44
7	Всього	85811,70	100

4.3 Розрахунок економічної ефективності НДР

Ефективність прикладних НДР визначається, як зіставлення річного економічного ефекту від застосування результатів розрахункових досліджень в умовах виробництва та використаних капіталовкладень для здійснення досліджень та втілення їх у виробництво.

$$E_{\text{фак}} = \frac{\text{Економ.ефект}}{\text{Капіталовкладення}}. \quad (4.9)$$

Зіставляючи фактичну економічну ефективність з нормативною ($E_n=0,10\dots0,15$), робиться висновок про доцільність досліджень. Якщо $E_{\text{фак}} >$ або $=E_n$ то дослідження визнаються економічно ефективними. У зворотному випадку дослідження не слід виконувати, тому що економічний зиск від таких досліджень малий. Економічну ефективність досліджень можливо оцінити по строку окупності витрат на їхнє проведення та втілення.

$$T_{\text{ок}}^{\text{фак}} = \frac{\text{Капіталовкладення}}{\text{Економ.ефект}}. \quad (4.10)$$

Фактичний строк окупності капіталовкладень зіставляється з нормативним строком окупності капіталовкладень, прийнятий для промисловості (приблизно 6 років), і на основі порівняння робиться висновок про доцільність досліджень.

Для теоретичних досліджень у більшості випадків важко чи навіть неможливо розрахувати економічний ефект, тому доцільно визначити їхню техніко-економічну ефективність з урахуванням наступних показників:

- важливість дослідження;
- складності розробки;
- результативності й можливості використання.

Важливість теоретичного дослідження оцінюють по його призначенню:

- рішення проблемних питань;
- задоволення вимог спеціальної техніки; пошук принципово нових конструктивних і технологічних рішень і т.п.

Складність виконання роботи визначають порівнянням отриманих результатів даного дослідження з результатами відомих аналогічних досліджень з обліком грошових і трудових витрат на їхнє проведення.

Результативність НДР можна визначити по повноті рішень поставленого завдання: отриманий результат відповідає плановому, задовільний (часткове рішення) чи негативний.

Аналіз залежності між цими показниками й витратами на їхнє досягнення дає можливість кількісної оцінки техніко-економічної ефективності теоретичних НДР по формулі:

$$K_{\text{НДР}} = \frac{J^n \cdot R \cdot T}{B_{\text{НДР}} \cdot t_{\text{НДР}}}, \quad (4.11)$$

де $K_{\text{НДР}}$ – рівень ефективності дослідження (коефіцієнт техніко-економічної ефективності НДР);

$J = 2$ – важливість роботи;

$R = 1$ – результативність роботи;

$T = 3$ – технічна складність виконання НДР;

$B_{\text{НДР}} = 19,677$ тис. грн.. – витрати на проведення НДР;

$t_{\text{НДР}} = 0,088$ (22 дні) – час проведення НДР;

$n = 3$ – показник використання результатів НДР

Отже, розрахуємо $K_{\text{НДР}}$:

$$K_{\text{НДР}} = (2^3 \cdot 1 \cdot 3) / (19,677 \cdot 0,88) = 1,39$$

Після розрахунку (4.11) отримаємо рівень ефективності дослідження $K_{\text{НДР}} = 1,39$. Це більше нормативного, тому робимо висновок, що дана дослідницька робота є ефективною.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СІТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз потенційних небезпек

Оскільки тема дипломного проекту «Дослідження факторів, які впливають на роздільність просвічувального електронного мікроскопа» передбачає проведення робіт в приміщенні лабораторії, тому необхідно розглянути робоче місце інженера-метролога небезпечні і шкідливі виробничі фактори:

1. Ураження електричним струмом – може виникнути в разі пошкодження ізоляції та порушень правил техніки безпеки, наслідком чого може буде отримання електричного удару;

2. Негативний вплив ЕМП на людини – обумовлений тим, що робота користувача персонального комп'ютера проходить навпроти наелектризованого монітора та у приміщенні з різноманітною електронною технікою, такий вплив викликає захворювання загального характеру та зниження імунітету людини;

3. Фізичні перевантаження - обумовлені неергономічністю робочого місця (робота користувача вимагає тривалого статичного напруження м'язів шиї, спини, рук, ніг), монотонністю роботи, що призводить до втоми і кістково-м'язових порушень;

4. Нервовопсихічні перевантаження – викликані порушеннями, пов'язаними зі стресовими ситуаціями та нервовоемоційними перевантаженнями, що призводить до захворювань загальноневротичного характеру у вигляді головного болю, відчуття важкості в голові, поганого сну, підвищеної втоми;

5. Механічні травми – виникають через нераціональну організованість робочого місця, захащеність приміщення;

6. Недостатня освітленість робочого місця – обумовлена нераціональним освітленням, світлотехнічної специфікою робочих місць з ПК, виходом з ладу освітлювальних пристроїв та недотриманням режиму праці, що може призвести до порушення зору;

7. Незадовільні параметри мікроклімату робочого місця – визвані нерациональними температурою та вологістю повітря, недостатньою чи надмірною швидкістю руху повітря, інтенсивністю теплового опромінення, все це може викликати захворювання загального характеру;

8. Можливість виникнення пожежу - виникає внаслідок порушення правил пожежної безпеки та коротких замикань, що можуть бути обумовлені дуже щільною упаковкою електронних схем у сучасних ПК, що веде, в свою чергу, до їх перегріву, який може призвести до оплавлення ізоляції та її оголення;

9. Неправильні дії персоналу в умовах надзвичайної ситуації.

5.2 Заходи по забезпеченню безпеки

Для забезпечення електробезпеки устаткування, вибір технічних засобів захисту здійснюється відповідно до вимог, за ДСТУ 7237:2011 («Система стандартів безпеки праці. Електробезпека»)

Електроустаткування відповідно до умов, у яких воно експлуатується, відповідає вимогам ПУЕ та ДСТУ 7223:2011 («Система стандартів безпеки праці. Вироби електротехнічні. Загальні вимоги щодо безпеки»). Експлуатація електроустановок і електроустаткування проводиться відповідно до «Правил технічної експлуатації електроустановок» (ПТЕ) і «Правилами технічної безпеки при експлуатації електроустановок споживачів» (ПТБ) з доповненнями й змінами.

Для забезпечення електробезпеки всі дроти, що перебувають під напругою, надійно обгороджені або розташовані на висоті (більше двох метрів), що виключає можливість випадкового дотику до них.

Заземлення електроустановок виконане відповідно до вимог ПУЕ і становить 4 Ом.

У схемі електричних кіл обладнання передбачений пристрій централізованого відключення від живильної мережі всіх електричних кіл,

згідно ДСТУ7223:2011 («Система стандартів безпеки праці. Вироби електротехнічні. Загальні вимоги щодо безпеки»)

Для попередження виникнення електронебезпеки усі працівники повинні мати досконалі знання з техніки безпеки при роботі з електрообладнанням та пройти інструктаж по електробезпеці з атестацією на групу допуску (друга група).

В лабораторії джерелом електромагнітного випромінювання є монітор комп'ютера. Рівні електромагнітних випромінювань моніторів, що вважаються безпечними для здоров'я, регламентуються нормами MPR II 1990:10 та ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», які встановлюють вимоги до обладнання, організації робочих місць, режимів праці та відпочинку. Відповідно стандартам MPR II напруженість електромагнітного поля на відстані 50 см по електричній складовій повинна бути не більше:

- у діапазоні частот 5 Гц - 2 кГц; 25 В/м;
- у діапазоні частот 2 - 400 кГц 2,5 В/м.

Щільність магнітного потоку повинна бути не більше:

- у діапазоні частот 5 Гц - 2 кГц; 250 нТл;
- у діапазоні частот 2 - 400 кГц. 25 нТл.

Виходячи з вище сказаного, вибрали монітор, який відповідає зазначеним нормативним документам.

Характер праці приводить до обмеженої рухової активності, що супроводжується малими м'язовими зусиллями (гіподинамією). При деяких видах праці (введення і редагування інформації) мається значне, але одноманітне і спрощене навантаження на невеликі групи м'язів рук (гіпокінезія). Для усунення шкідливого впливу гіподинамії і гіпокінезії вводяться паузи для виконання комплексу вправ, спрямованих на збільшення витрат енергії на м'язову роботу і на усунення змін, викликаних локальним характером м'язових дій.

Для основних видів робіт, виконуваних за відео терміналом, вводяться офіційно передбачені перерви (5 хвилин на годину).

Спеціальні вправи для очей, що сприяють посиленню кровообігу, збалансуванню тонуусу очних м'язів, профілактиці стомлення, виконуються на початку регламентованих перерв, протягом 2-3 хвилин, сидячи на робочому місці.

У випадку виникнення надмірної зорової напруги, що супроводжується погіршенням самопочуття, незважаючи на гарну ергономічну організацію роботи і дотримання режимних моментів, необхідний індивідуальний підхід в обмеженні часу роботи, корекція тривалості перерв для відпочинку чи зміна діяльності інший, не зв'язаної з використання ЕОМ.

Нервова перенапруга обумовлена напругою уваги. Часта й тривала перенапруга може служити джерелом ряду захворювань серцево-судинної, нервової, зорової й іншої систем організму.

Розумова перенапруга. Розумова діяльність - це діяльність, насамперед, центральної нервової системи, її вищого відділу кори головного мозку. При розумовій роботі відбувається звуження судин кінцівок і розширення судин внутрішніх органів.

Низький рівень загального обміну при розумовій діяльності не є показником малої інтенсивності обмінних процесів, навпаки, споживання кисню збільшується в 15-20 разів у порівнянні з фізичною роботою. Можливі значні зміни кров'яного тиску, пульсу, підвищення цукру в крові. Тривала розумова робота може привести до серцево-судинних захворювань.

Для запобігання розумової та нервової перенапруги під час роботи рекомендована зміна уваги, зміна роду діяльності, перерви (10-15 хв. 2-3 рази за робочу зміну).

Механічні травми виникають внаслідок нерациональної організації робочих місць, розташування офісного обладнання та недотримання робітниками правил техніки безпеки на робочому місці.

Для запобігання механічних травм необхідно забезпечити виконання робітниками правил техніки безпеки на робочому місці. Потрібно слідкувати за тим, щоб проходи не були захаращені, а робочі місця були організовані раціонально.

5.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

У лабораторії застосовується змішане освітлення. При цьому додаткове штучне освітлення застосовується не тільки в темний, але й у світлий час доби. Розрахунок штучного освітлення у лабораторії розміром $15 \times 12 \times 3$ м матиме вигляд, приведений нижче.

Вихідні данні для розрахунку загального освітлення:

$$A = 15 \text{ м}$$

$$B = 12 \text{ м}$$

$$H = 3 \text{ м}$$

Для лабораторії з розрядом зорових робіт III збирається система загального освітлення.

Нормована освітленість для даного розряду зорової роботи буде становити $E_n = 300$ лк.

Для лабораторії, приміщення якої висотою 3 м, доцільно обрати лампу люмінесцентну. Тип світильника ЛСП02-2×40-04-06, тип лампи ЛБ40, з габаритними розмірами $1234 \times 280 \times 159$ мм, $F_{\text{л}} = 3200$ лм, для якого $[L/h] = 1,3$.

Висота розміщення світильників над робочою поверхнею

$$h = H - h_c - h_p = 3 - 0,8 = 2,2 \text{ м}$$

де H – висота приміщення, м;

h_c – відстань від світильника до перекриття

h_p – висота робочої поверхні над підлогою, м (висота умовної робочої поверхні приймається 0,8 м).

Чисельне значення індексу приміщення визначають із співвідношення

$$in = \frac{A * B}{h(A + B)} = \frac{15 \times 12}{2,2 \times (15 + 12)} = 3.03$$

,

де А; В довжина і ширина приміщення, м ;

h – висота розміщення світильників над робочою поверхнею, м.

Для світлих приміщень відбиття поверхонь у приміщенні складає:

- відбиття від стелі $\rho_{ст} = 50\%$;
- відбиття від стін $\rho_c = 50\%$;
- відбиття від підлоги $\rho_{п} = 10\%$

Для даних умов значення коефіцієнта використання світлового потоку:

$\eta \cong 84 \%$.

Коефіцієнт нерівномірності освітленості $Z = 1,1$

Коефіцієнта запасу $K_3 = 1,4$

Визначимо відстань між рядами світильників. Згідно для світильників, які мають КСС типу Д - 2 $L/h \cong 1,3$

$$L_{max} = [L/h] \times h$$

Кількість рядів світильників

$$N_p = \frac{B}{L_{max}} = 2,88 \approx 3$$

Приймаємо для установки 3 ряди світильників.

Визначимо світловий потік одного ряду світильників.

$$Fp = \frac{E_n \cdot \kappa_z \cdot S \cdot z}{Np \cdot \eta} = \frac{300 \times 1,4 \times 1,1 \times 15 \times 12}{3 \times 0,84} = 33000 \text{ лм}$$

де E_n – нормоване значення освітленості, лк;

κ_z – коефіцієнт запасу;

S – площа освітлюваної поверхні, м^2 ;

z – коефіцієнт нерівномірності освітленості;

N_n – загальна кількість ламп у складі освітлювальної установки;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Необхідна кількість світильників в 1 ряду

$$N_{\text{св}} = \frac{F_R}{nF_n} = \frac{33000}{2 \cdot 3200} = 5.$$

Приміщення з ПК, його розміри (площа, об'єм) повинні в першу чергу відповідати кількості людей, що знаходяться в ньому. В ньому передбачені відповідні параметри температури, освітлення, чистоти повітря та ін.

Відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» встановлено санітарно-гігієнічні вимоги до параметрів виробничого середовища приміщень з КТ. Площа приміщення на одне робоче місце користувача повинна становити 6 м^2 , а об'єм не менше ніж 20 м^3 .

У виробничих приміщеннях на робочих місцях з КТ мають забезпечуватись оптимальні значення параметрів мікроклімату: температура $22 \dots 24^\circ\text{C}$, відносна вологість повітря 40...60%, швидкість руху повітря 0,1...0,2 м/с (ДБН В.2.5-67:2013, СН 4088-8Є, ДСН 3.3.6.042-99), рівень позитивних і негативних іонів у повітрі 1,5...3 тис./ см^3 та 3...5 тис./ см^3 . Підтримувати оптимальний рівень легких позитивних і негативних аерофонів у

повітрі на робочих місцях рекомендується за допомогою біполярних коронних аероіонізаторів. У приміщеннях з КТ має бути забезпечений трикратний обмін повітря за годину. Для забезпечення постійних параметрів мікроклімату (температури, вологості, швидкості руху і чистоти повітря) у приміщенні встановлен побутовий кондиціонер.

Раціональне колірне оформлення приміщення спрямоване на поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці, підвищення його продуктивності і безпеки.

5.4 Заходи з пожежної безпеки

Пожежна профілактика – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження її поширення, а так само на створення умов для успішного гасіння пожежі.

В офісному приміщенні знаходиться дерев'яні меблі, електронна апаратура, паперові носії інформації. Клас пожежі у офісному приміщенні (згідно із ДБН В.1.1.7-2016 «Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги.») – пожежі твердих речовин, переважно органічного походження, горіння яких супроводжується тлінням (деревина, пластмаси, папір) визначається як клас А. Категорія приміщення (згідно із НАПБ Б.03.002-2007 «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою») – визначається як категорії Д. Визначення типу та розрахунок кількості первинних засобів пожежегасіння (згідно із ДБН В.1.1.7-2002 «Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва») – для адміністративного приміщення площею 20,91 м² слід застосовувати два вуглекислотних ВВ – 5 і порошкових ВП-5 вогнегасника (ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою». ДБН В.1.1.7-2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва»).

Крім цього адміністративні приміщення повинні бути обладнані автоматичними пожежнимисповіщувачами, що реагують на підвищення температури, дим, полум'я. Наприклад, сповіщувачі моделей ДТЛ, ІТМ.

Однією з найбільш важливих задач пожежної профілактики є захист будівельних конструкцій від руйнування і забезпечення їхньої достатньої міцності в умовах впливу високих температур при пожежі. У залежності від меж вогнестійкості будівельних конструкцій ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» для ОЦ і частин будинків іншого призначення, у яких передбачене розміщення ЕОМ, запроектований II ступень вогнестійкості.

Обладнання лабораторії ОЦ відповідає вимогам Правил пожежної безпеки в Україні, оскільки виконано відповідно до ПУЕ та ДСТУ 7237:2011 «Електробезпека. Терміни та визначення».

Для виявлення загоряння і пожеж у приміщенні встановлена система автоматичної пожежної сигналізації з димовими пожежними сповіщувачами у двох місцях, оскільки площа приміщення становить приблизно 180 м².

У будинку ОЦ пожежні крани запроектовані в коридорах, на площадках сходових кліток, біля входів (у нішах на висоті 1,35 м.).

В приміщенні ОЦ встановлено 2 ручних вуглекислотних вогнегасника ВВ-5 на відстані 5 метрів один від одного.

5.5 Заходи з цивільної оборони

Захист ЕОМ від впливу електромагнітних імпульсів ядерного вибуху

Вплив ЕМІ може призвести до згорання чутливих електронних і електричних елементів, пов'язаних з великими антенами або відкритими проводами, а також до серйозних порушень в цифрових і контрольних пристроях, зазвичай без необоротних змін.

Особливістю ЕМІ як вражаючого фактора є його здатність поширюватися на десятки і сотні кілометрів в навколишньому середовищі і по різних комунікацій. Тому ЕМІ може вплинути там, де ударна хвиля, світлове

випромінювання і проникаюча радіація втрачають своє значення як вражаючі фактори.

Ступінь ушкодження залежить в основному від амплітуди наведеного імпульсу напруги або струму та електричної міцності обладнання.

Головне завдання захисних пристроїв від ЕМІ - виключити доступ наведених струмів до чутливих вузлів і елементів устаткування, що захищається. Проблема захисту від ЕМІ ускладнюється тим, що імпульс протікає приблизно в 50 разів швидше, ніж, наприклад, розряд блискавки, і тому прості газові розрядники в даному випадку є малоефективними.

У кожному конкретному випадку повинні бути знайдені найбільш ефективні та економічно доцільні методи захисту електронної апаратури і великих розгалужених електротехнічних систем. Розглянемо основні методи захисту :

- Екрани й захисні пристрої.

Металеві екрани відображають електромагнітні хвилі і гасять високочастотну енергію. Через систему заземлення струм, наведений ЕМІ, стікає в землю, не завдаючи шкоди електронній апаратурі, що знаходиться усередині металевих шаф або коробів.

- Захист кабелів.

Сполучні кабелі для захисту прокладають в земляних траншеях під цементним або бетонованим підлогою будівель або укладають в сталеві коробки, які заземлюють. Можна розміщувати кабелю та на поверхні поля, закривши їх заземленими швелерами.

Надійність підвищується, якщо кабель розгалужується і підводиться до декількох шаф з розділовими трансформаторами. У цьому випадку ізольовані ділянки мережі мають великим опором ізоляції й малої ємністю проводів відносно землі. Також доцільно застосовувати фільтри від високочастотних перешкод.

- Захисні розрядники і плавкі запобіжники.

Основні функції захисного розрядника - розімкнути лінію або відвести енергію для запобігання пошкодження в захистному обладнанні. Встановлюється на входи і виходи апаратури.

Для захисту апаратури можуть бути рекомендовані плавкі запобіжники та захисні вхідні пристосування, які являють собою різні релейні або електронні пристрої, що реагують на перевищення струму або напруги в ланцюзі.

- Грозозахисні пристрою.

Забезпечують "стікання" великого розряду в землю без пошкодження ізоляційних елементів ліній.

- Використання симетричних двопровідних ліній.

- Захист периферійних пристроїв.

Зазначені способи і засоби захисту повинні впроваджуватися в усі види електротехнічної та радіоелектронної апаратури з урахуванням характеру вражаючої дії електромагнітних випромінювань ядерного вибуху для забезпечення надійності роботи підприємств.

Таким чином в розділі було розглянуто, що під час виконання робіт в приміщенні лабораторії, робоче місце інженера-метролога небезпечні і шкідливі виробничі фактори і зроблені такі висновки:

1 Для попередження поразки електричним струмом необхідні:

а) ізоляція струмоведучих частин ДСТУ 7223:2011(ССБП. Вироби електротехнічні. Загальні вимоги щодо безпеки);

б) захисне відключення частин ДСТУ 7223:2011(ССБП. Вироби електротехнічні. Загальні вимоги щодо безпеки);

в) захисне заземлення, виконане згідно ПУЕ і становить 4 Ом;

г) досконале знання робітниками техніки безпеки при роботі з електрообладнанням та проходження інструктажу по електробезпеці з атестацією на групу допуску.

2 Для попередження негативного впливу ЕМП та ЕМВ використовується монітор з рівнем ЕМВ безпечним для здоров'я людини відповідно нормам МРК II 1990:10 Шведського національного комітету по вимірах і випробовуваннях, ДНАОП 0.00-1.31-99 та ДСанПіН 3.3.2.007-98;

3 Для запобігання появи фізичних перевантажень та нервових перевантажень вводяться паузи для виконання комплексу вправ, у конструкцію устаткування робочого місця входять сидіння, що враховує індивідуальні антропометричні характеристики людини відповідно до вимог ДСТУ ISO 9241-5:2004 «Робоче місце при виконанні робіт сидячи».

4 Для попередження появи механічних травм усе офісне обладнання розташоване доцільно, робочі місця організовані раціонально. Здійснюється контроль за зашарашеністю коридорів та за виконанням робітниками техніки безпеки на робочому місці.

5 Для створення необхідної освітленості у приміщенні застосовується змішане освітлення, відповідно до норм ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення» для приміщення площею 180 м² та висотою 3 м, встановлюємо 24 люмінесцентних ламп типу ЛБ40 та світильника ЛСП02-2×40-04-06.

6 Тип світильника ЛСП02-2×40-04-06, Для створення сприятливих умов мікроклімату у приміщенні забезпечуються оптимальні значення таких параметрів, як:

- температура $\square 22 \dots \square 24^{\circ}\text{C}$;
- відносна вологість повітря 40...60%;
- швидкість руху повітря 0,1...0,2 м/с (ДБН В.2.5-67:2013 , СН 4088-8Є, ДСН 3.3.6.042-99);
- рівень позитивних і негативних іонів у повітрі 1,5...3 тис./см³ та 3...5 тис./см³;

Для забезпечення постійних параметрів мікроклімату (температури, вологості, швидкості руху і чистоти повітря) у приміщенні встановлений побутовий кондиціонер.

Для попередження загорянь лабораторія обладнана відповідно до ДСТУ Б

В.2.2-29:2011 «Будівлі підприємств. Параметри» та ДБН В.1.1-7:2016 «протипожежні норми». Для виявлення загорання і пожеж у приміщенні встановлена система автоматичної пожежної сигналізації з димовими пожежними оповіщувачами у двох місцях, оскільки площа приміщення становить 180 м². У будинку лабораторії розташовані пожежні крани. В приміщенні лабораторії встановлено ручні вуглекислотних вогнегасника;

7 Для захисту радіоелектронної апаратури від електромагнітного імпульсу використовуються металеві екрани, струмопровідні сітки, чи плівкові покриття для вікон, стільникові металеві конструкції для повітря забірників і вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, розташовувані по периметру дверей і люків. Також для захисту від електромагнітного імпульсу використовуються розрядники, які встановлені на входах і виходах апаратури, у повітряні і підземні лінії зв'язку і електропостачання.

ВИСНОВКИ

Проблемою у просвічувальній мікроскопії високого розділення є сферична аберація об'єктивної лінзи. Її вирішують шляхом комп'ютерної обробки дифрактограм, яка включає моделювання зразка і мікроскопа, а також застосуванням корегувальних магнітних систем.

З'ясовано, що визначальним чинником, обмежуючим роздільну здатність сучасного ПЕМ, є теплові шуми у корпусі приладу. Вони є джерелом флуктуацій поля, які призводять до розфокусування магнітної системи. Результат проведеного розрахунку узгоджується з висновком експериментаторів, що погіршення розділення ПЕМ внаслідок теплових шумів у корпусі складає кілька десятих ангстрема і залежить, перш за все, від температури і внутрішнього об'єму приладу, а також від величини поля і розташування магнітних лінз.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. **Руска, Э.** Развитие электронного микроскопа и электронной микроскопии (Нобелевская лекция)/ Э. Руска // УФН. – 1988. – Т.154, вып.2. – С.243.
2. **Shindo, D.** High-Resolution Electron Microscopy for Materials Science [Text] / D. Shindo, K. Hiraga. – Tokyo: Springer-Verlag, 1998. – 190 p.
3. **Синдо, Д.** Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия [Текст] / Д. Синдо, Т. Оикава. – М.: Техносфера, 2006. – 249 с.
4. Нанотехнологии в электронике [Текст] / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
5. **Заблоцкий, А.В.** Электронная микроскопия в нанодиагностике [Текст] / А.В. Заблоцкий, А.А. Тимофеев, Е.В. Коростылев, А.А. Кузьмин. – М.: Издательство МФТИ, 2011. – 144 с.
6. **Ван дер Зил, А.** Шумы при измерениях [Текст] / А. Ван дер Зил. – М.: Мир, 1979. – 312 с.
7. **Тузяк, О.Я.** Основы електронної та зондової мікроскопії [Текст] / О.Я. Тузяк, В.Ю. Курляк. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. – 296 с.
8. **Фульц Б.** Просвечивающая электронная микроскопия и дифрактометрия материалов [Текст] / Б. Фульц, Дж. М. Хау. – М.: Техносфера, 2011. – 904 с.
9. Progress in Transmission Electron Microscopy – 1 (Concepts and Technologies) [Text] / Eds. Feng Zhang, Ze Zhang. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 367 p.
10. Progress in Transmission Electron Microscopy – 2 (Applications in Materials Science) [Text] / Eds. Feng Zhang, Ze Zhang. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 309p.
11. **Williams, D.B.** Transmission Electron Microscopy. A textbook for materials science [Text] / D.B. Williams, C.B. Carter. – Springer, 2009. – 780 p.
12. **Jiang, Y.** Electron ptychography of 2D materials to deep sub-ångström

resolution/ Y. Jiang et al.// Nature. – 2018. – № 559. – p. 343-349.

13. **Reich, E.S.** Imaging hits noise barrier: Physical limits mean that electron microscopy may be nearing highest possible resolution / E.S. Reich // Nature. – 2013. – № 499. – p. 135-136.

14. **Колоколов, А.А.** Физические основы измерений и эталоны: конспект лекций [Текст] / А.А. Колоколов. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2013. – 150 с.

15. **Робинсон, Ф.Н.Х.** Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях [Текст] / Ф.Н.Х. Робинсон. – М.: Атомиздат, 1980. – 380 с.

16. **Якимов, А.В.** Физика шумов и флуктуаций параметров: электронное учебное пособие / А.В. Якимов. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 85 с.

17. **Букингем, М.** Шумы в электронных приборах и системах [Текст] / М. Букингем. – М.: Мир, 1986. – 399 с.

18. Бойчик І.М. Економіка підприємств : навч посібник / І. М. Бойчик, П. С. Харів, М. І. Хопчан. – Львів: В-во «Сполом». – 2009. – 212 с.

19. Вовчак О. Д. Інвестування : навч. посіб. / О. Д. Вовчак. - Л. : Новий Світ-2000, 2008. -544 с.

20. Економіка підприємства: підручник: /За ред. С.Ф. Покропивного. – Вид. 2-ге, – К.: КНЕУ, 2013. – 528 с.

21. Єрмошенко М. М. Аналіз і оцінка інвестиційних проектів: навч. посіб. / М. М. Єрмошенко, І. О. Плужніков. - К. : Нац. акад. управл., 2006. - 156 с.

22. Кириченко О. А. Інвестування : підручник / О. А. Кириченко, С. А. Єрохін. – К. : Знання, 2009. – 573 с.

23. Малюк Л.П. Організація виробництва на підприємствах : навч. посібник / Л.П. Малюк, Т.П. Кононенко. – Полтава : ПУСКУ, 2009. – 254 с.

24. Онищенко В. О. Організація виробництва : навч. посібник / В. О. Онищенко, О. В. Редкін. – К.: Лібра, 2012. – 672 с.

25. Покропивний С.Ф. Економіка підприємства. Збірник практичних задач і конкретних ситуацій: навчальний посібник / С. Ф. Покропивний, Г. О.

Швиданенко, О. С. Федонін. – К. : КНЕУ, 2009. – 328 с.

26. Семернікова І. О. Економіка підприємства : навч. посібник / І. О. Семернікова. – Херсон : ОЛДУ-плюс, 2003. – 312 с.

27. Цигилик І. І. Економіка й організація виробництва : навч. посібник / І. І. Цигилик, О. І. Мозіль, Н. В. Кірдякіна. – К. : Центр навчальної літератури, 2009. – 176 с.

28. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник вид. 5-те, доп. К. : Знання, 2014. 373 с. + 1 эл. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-617-07-0134-3

29. ГОСТ 12.0.003-74* Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. [Введ. 1976-01-01]. М. : Госстандарт СССР, 1974. 4 с. (Межгосударственный стандарт)

30. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21]. К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

31. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [На заміну глав 5.4 5.5 7.1 7.2 7.3 7.4 7.6 Правил устройства электроустановок, затв. Міненерго СРСР 06.07.1984 р. ; чинний від 2002-01-01]. К. : Мінпраці України, 2001. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01/card2#Card>.

32. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Державний Стандарт України)

33. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [На заміну НАОП 1.1.10-1.01-85 ; чинний з 1997-10-06]. К. : Держнагляд охорони праці, 1997. 97 с. (Нормативно-правовий акт охорони праці)

34. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [На заміну ДНАОП 0.00.1.21-84 ; чинний з 1998-01-09]. К. : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Нормативно-правовий акт охорони праці)

35. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з

екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с. Режим доступу: <http://docs.pravo.ru/document/view/32704903/>. (Директива)

36. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям. [На заміну НПАОП 0.00-1.28-10 ; чинний від 2018-05-18]. К. : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18>. (Нормативно-правовий акт охорони праці)

37. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. [Чинний від 1998-12-10]. К. : МОЗ України, 1998. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445>. (Державні санітарні правила та норми)

38. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01]. К. : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Державні будівельні норми України)

39. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. К. : МОЗ України, 1999. 106 с. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>. (Державні санітарні норми)

40. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартів безпеки труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [На заміну ГОСТ 12.1.005-76 ; чинний з 1989-01-01]. М. : МОЗ СРСР, 1988. 50 с. (Міждержавний стандарт)

41. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [На заміну СНиП 2.04.05-91 ; крім розділу 5 та додатка 22. ; чинний від 2014-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Державні будівельні норми України)

42. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30]. К. : МВС України, 2014. 91 с. (Нормативний акт пожежної безпеки)

43. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [На заміну ГОСТ 27331-87 ; чинний з 01.01.2016]. К. :

Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Державний Стандарт України)

44. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Державний Стандарт України)

45. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01]. К. : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Державні будівельні норми)

46. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [На заміну ДБН В.2.5-56:2010 ; СНиП 2.04.05-91 (розділи 5 та 22) ; чинний від 2015-07-01]. К. : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Державні будівельні норми)

47. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [На заміну НАПБ Б.03.001-2004 ; чинний від 2018-02-23]. К. : МВС України, 2018. 23 с. (Правила)

48. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI. Редакція від: 03.07.2020. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>. (Закон України)