

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

ЄГОРОВ ВАДИМ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 543.423.1

ПІДВИЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ ТА СИСТЕМ АТОМНО-ЕМІСІЙНОГО  
СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України

**Науковий керівник:**

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Луценко Владислав Іванович**,  
Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків,  
завідувач лабораторії моніторингу і  
спектроскопії середовищ відділу радіофізичної  
інтроскопії.

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Алексеев Євгеній Анатолійович**,  
Радіоастрономічний Інститут Національної  
академії наук України, м. Харків,  
провідний науковий співробітник відділу  
мікрохвильової радіоспектрометрії;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Чурюмов Геннадій Іванович**  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки МОН України, м. Харків,  
професор кафедри фізичних основ електронної  
техніки.

Захист відбудеться « 11 » травня 2021 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: Україна, 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3–9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: Україна, 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий « 08 » квітня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор фіз.-мат. наук, професор

Юрій АРКУША

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Технічний прогрес в металургії, металообробці, а також в геології й екологічних службах з кожним роком підвищує вимоги до точності та чутливості елементного аналізу. Разом з тим, досягнення в дослідженнях плазми, оптиці, електроніці та обчислювальній техніці відкривають нові можливості вдосконалення апаратури та методів спектрального аналізу речовини.

Атомно-емісійний спектральний аналіз (АЕСА) – це сукупність методів елементного аналізу, заснованих на вивченні спектрів випромінювання вільних атомів і іонів у газовій фазі. Для проведення атомно-емісійного спектрального аналізу речовини, необхідно виконати наступний ланцюжок послідовних операцій: здійснити пробовідбір необхідної кількості зразка, розігріти його до переходу в стан плазми, здійснити спектральний аналіз випромінювання плазмового утворення та виміряти аналітичні параметри спектра.

За результатами вимірювань аналітичних параметрів, використовуючи калібрувальні апріорні дані, робиться висновок про елементний склад досліджуваного зразка. Для забезпечення повторюваності та однорідності вимірювань на всіх етапах аналізу необхідно здійснювати контроль і керування режимами роботи всіх ланок ланцюжка блоків. Для цього необхідно встановити вид функціональної залежності між вхідними керівними сигналами та вихідними параметрами кожного блоку, якщо вони існують. Такі функції можуть бути багатопараметричними та неоднозначними, мати гістерезисні властивості та залежати від тривалості впливу різних чинників.

Плазмові утворення, що аналізуються, як правило нестаціонарні в часі та неоднорідні в просторі. Тому керівні та стабілізуючі зворотні зв'язки повинні формуватися досить швидкодіючими логічними та електричними контурами керування. Крім того, всі блоки можуть бути чутливими до неконтрольованих зовнішніх впливів і внутрішніх шумів, які спотворюють результати вимірювань. З цих причин в багатопараметричному просторі результатів вимірювань, будемо мати не точку, а розмиту пляму, розміри якої збільшуються зі зменшенням точності аналізу. Для мінімізації загальної помилки вимірювань необхідно мінімізувати кожну її компоненту вдосконаленням всіх блоків апаратури окремо (генератора плазми, оптики, електронних блоків) і оптимізувати їх взаємодію в цілому. Сучасна елементна база електронних приладів, комп'ютерна техніка та програмне забезпечення дозволяють розв'язувати в режимі реального часу задачу мінімізації помилки аналізу з керуванням по всій сукупності параметрів.

Ці міркування лягли в основу досліджень з фізики та техніки АЕСА на засадах яких автором було, розроблено декілька комплектів приладів, що складаються з генераторів плазми, оптичних блоків аналізаторів спектра та спектральних реєструючих камер, а також методів їх удосконалення та застосування, на яких базується апаратура атомно-емісійного спектрального аналізу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дана робота виконана у відділі радіофізичної інтроскопії Інституту радіофізики та

електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України в рамках досліджень, що проводилися при виконанні держбюджетних НДР: «Розвиток нових методів та засобів радіоінтроскопії в середовищі з дисипативними та диспергуючими властивостями» (шифр «Стриж-4») 2003 р. (номер держ. реєстрації № ГР 0100U006571); «Розвиток методів и засобів радіофізичної інтроскопії» (шифр «Стриж-5») 2006 р. (номер держ. реєстрації № ГР 0103U002265); «Методи та засоби радіофізичної інтроскопії оптично непрозорих середовищ» (шифр «Омега») 2007 р. (номер держ. реєстрації № ГР 0107U001083); «Розвиток методів та вдосконалення засобів радіофізичної інтроскопії оптично непрозорих середовищ природного та штучного походження» (Шифр «Омега-2») 2012 р. (номер держ. Реєстрації № ГР0111U010474); «Розвиток методів та засобів радіофізичної інтроскопії оптично непрозорих середовищ природного та штучного походження» (шифр «Омега-3») 2017 р. (номер держ. реєстрації № ГР 0117U004035); «Розробка нових методів і засобів отримання інформації про фізичні характеристики природних середовищ, їх структурних неоднорідностей, поверхонь розподілу та окремих об'єктів за даними дистанційного зондування і радіолокації» (шифр «Сенсорика-2») 2018 р. (номер держ. Реєстрації 0118U003035). Автор був одним з відповідальних виконавців цих НДР і його науковий внесок в них відображено в дисертації. Паралельно з цими роботами автор був відповідальним виконавцем таких науково-технічних проєктів по спектроскопічним дослідженням плазми: два проєкти Українського Науково-Технологічного Центру – «Створення портативного квантометра» (№143) і «Спектрогеліограф для оперативної реєстрації активності Сонця (СОРАС) в різних лініях спектра» (№Uzb-54 (J)), а також інноваційного проєкту Президії НАН України «Організація малосерійного виробництва автоматизованого спектрометра для емісійного спектрального аналізу» (шифр «Спектрометр») 2006 р. (номер держ. реєстрації № ГР 0106U009670).

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є виявлення фізичних закономірностей процесів збудження, аналізу та реєстрації спектрів плазмових утворень в апаратурі АЕСА, та використання цих закономірностей для удосконалення метрологічних і експлуатаційних характеристик аналітичної апаратури. Для досягнення цієї мети треба було розв'язати наступні задачі:

1. Розробити способи формування та ініціації розрядного струму дугового генератора з програмним керуванням параметрами розряду для контролю режимів пробовідбору та збудження плазми.

2. Дослідити шляхи удосконалення оптичних спектральних блоків багатоканальних спектрометрів для роботи в ближньому інфрачервоному, видимому та ультрафіолетовому діапазонах.

3. Дослідити можливості використання багатоканальних фотоприймачів для реєстрації спектрів. Розробити та виготовити камери реєстрації спектрів з можливістю безрозривної реєстрації заданої ділянки спектру у широкому спектральному діапазоні (без пропусків), та з програмним керуванням температурою фотоприймачів.

4. Розробити технічні засоби та способи підвищення роздільної здатності багатоелементних фотоприймачів.

5. Виконати роботи по дослідженню динамічного діапазону багатоканальних фотодетекторів та розробити способи його розширення.

6. Дослідити можливість реєстрації гіперспектральних зображень плазмових утворень.

7. Розробити алгоритм оптимальної фільтрації результатів спектральних вимірювань.

8. Провести тестування розробленої апаратури та методик у лабораторних умовах і реальних умовах промислового виробництва.

*Об'єкт дослідження* – процес атомно-емісійного аналізу елементного складу речовини та способи підвищення його апаратної й аналітичної точності.

*Предмет дослідження* – розробка та впровадження удосконалених методів і апаратури генерації плазми та реєстрації атомно-емісійних спектрів.

**Методи дослідження.** Дослідження, наведені у дисертаційній роботі, базуються на загальній теорії атомно-емісійного спектрального аналізу. Розроблені елементи спектральних приладів базуються на теоретичних основах побудови імпульсних джерел живлення, стійкості систем зі зворотним зв'язком, принципах побудови електронних приладів, теоретичних методах розрахунку та комп'ютерному й експериментальному моделюванні оптичних приладів. Визначення температури напівпровідникових сенсорів базується на дослідженні статистичних характеристиках вихідного сигналу. Способи визначення лінійності фоточутливих сенсорів з застосуванням принципу взаємозамінності, що базуються на законах Бунзена-Роско та Шварцшильда, з використанням методів найменших квадратів і максимальної правдоподібності для обробки результатів й розширення динамічного діапазону при вимірюванні аналітичних параметрів спектральних ліній.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше розроблено спосіб підвищення роздільної здатності багатоелементних фотоприймачів для спектральних досліджень із застосуванням зміщення спектру на частину пікселя, що дозволяє підвищити її аж до оптичної роздільної здатності спектрометра – незалежно від розмірів пікселів фотоприймача, експериментально отримана роздільна здатність 7 мкм, що у два рази менше ніж розмір пікселя фотоприймача – 14 мкм.

2. Вперше розроблена і впроваджена методика вимірювання темного струму багатоканальних фотодетекторів, яка заснована на вимірюванні параметрів вихідного сигналу фотоприймача без застосування допоміжних сенсорів температури, що дозволяє суттєво зменшити вплив температури на точність фотометрування, експериментально отримана точність визначення температури фотоприймача краще ніж 1°C.

3. Вперше запропонована лінеаризація передавальної світлосигнальної функції фоточутливих приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ), що не мають антиблумінгу, із застосуванням одночасної реєстрації на два сенсори з протилежними напрямками транспортування зарядів у зсувних регістрах, що дозволило більш ніж у десять разів збільшити динамічний діапазон фотоприймачів.

4. Удосконалено схемотехніку формування розрядного струму

дугового генератора збудження спектру з підвищеною стабільністю та швидкодією, що дає змогу розширити діапазон енергій збуджуваних спектральних ліній, і отримати точність вимірювань що перевищує точність серійного генератора УГЭ-4, в три рази.

5. Отримали подальший розвиток методи контролю нелінійностей трактів накопичення та перенесення заряду фотоприймачів щодо виконання принципу взаємозамінності яскравості ліній і тривалості експозиції, що дозволило знайти пояснення порушенню закону взаємозамінності для малих рівнів експозиції ПЗЗ.

6. На основі спроектованої оптичної схеми виготовлено спектрогеліограф для спостереження Сонця одночасно у двох лініях спектра, що дозволяє отримувати одночасно два зображення сонячної фотосфери на різних її глибинах.

**Практичне значення отриманих результатів.** Проведені дослідження та впроваджені методики удосконалення метрологічних та експлуатаційних характеристик стали базою розробки ряду спектральних приладів, що не поступаються кращим світовим зразкам і були успішно впроваджені на ряді підприємств металургійної та металообробної галузі України.

Розроблено, спроектовано і виготовлено кілька варіантів спектроскопічних камер які використовуються разом з серійними спектрографами ИСП-30, ИСП-28, ДФС-452, ДФС-8, ИСП-51, що дозволило замінити на цьому обладнанні фотографічну реєстрацію спектрів на фотоелектричну. Це дало змогу значно, з 30 хвилин до 1–2 хвилин, скоротити терміни виконання аналізів, виключити процес обробки фотоматеріалів і комп'ютеризувати процес виконання досліджень. Збільшити точність і експресність виконання робіт. Апаратура реєстрації спектрів впроваджена більш ніж на 20 підприємствах України.

Розроблені методики визначення температури сенсорів, використані в програмному забезпеченні спектрального аналізу, що значно зменшило вплив температури на результати аналізу.

Розроблений і виготовлений дуговий генератор «ЦУГ-2» впроваджено на декількох підприємствах України, що дозволило в порівнянні з серійним генератором «УГЭ-4» скоротити енергоспоживання на 60%, збільшити точність аналізів в середньому у 3 рази, і розширило діапазон вимірюваних концентрацій.

Автор був відповідальним виконавцем таких госпрозрахункових та науково-технічних договорів: НДОКР «Модернізація стилоскопа «Спектр» (шифр «Бона»), Приватне підприємство фірма «БОНА» (дог. № 02/07, 2007 р.); НДР «Модернізація блоку генерації плазми» (шифр «ХЕЛЗ»), ПАТ Харківський електротехнічний завод «ХЕЛЗ Укрелектромаш» (дог. № 9/10, 2010 р.); НТП «Розробка системи керування генератора плазми і модернізація електродного вузла спектрографа ИСП-28» (шифр «Жовтень»), ПАТ завод «Червоний Жовтень», м. Харків (дог. №20/11, 2011 р.); «Створення електронної системи реєстрації атомно-емісійних спектрів для спектрографа ИСП-30» ДП «Завод ім. В. О. Малишева» Укроборонпром, м. Харків (дог. №11/14–1102дп, 2015 р.). Розроблена і виготовлена автором апаратура і

методики використовуються на цих підприємствах для контролю вхідної сировини, технологічних процесів виробництва, готової продукції, а також в дослідній практиці.

**Особистий внесок здобувача.** Автор безпосередньо брав участь у розробці методів дослідження, створення та налаштування вимірювальних методик, проектуванні, розробці, виготовленні та модернізації апаратури та програмно-апаратних засобів. Він особисто брав участь у проведенні експериментів, поясненні отриманих експериментальних результатів і їх фізичній інтерпретації.

У дисертаційній роботі представлені узагальнені результати теоретичних і експериментальних досліджень з розробки наукових засад та вдосконалення апаратури та методів атомно-емісійного аналізу речовини.

Дослідження проводилися в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України протягом ряду років особисто здобувачем і в співавторстві.

При опублікуванні наукових праць здобувач брав участь у постановці задач, розробці, проектуванні та виготовленні апаратури реєстрації спектрів [1, 2, 3, 4, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21], оптичних спектральних приладів [3, 8, 9, 10, 17], дугового генератора плазми [6]. Експериментальних дослідженнях температурних властивостей ПЗЗ сенсорів [7, 11, 13, 14, 19, 21], дослідженнях амплітудних характеристик багатоелементних фотоприймачів [4, 7, 14, 21], в обробці й інтерпретації результатів вимірювань, в розробці методики проведення вимірювань і написанні окремих розділів статей і тез [3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22], результати дисертації опубліковані в 7 статтях у фахових виданнях і додатково в 7 не фахових виданнях, а також були представлені у 8 матеріалах та тезах доповідей на конференціях.

**Апробація результатів дисертації.** Наукові результати та основні положення роботи доповідалися й обговорювалися на семінарах ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України, а також на міжнародних конференціях:

- міжнародна конференція «Солнце и космическая погода», Кримська астрофізична обсерваторія, Крим, 2003 р.;
- міжнародна конференція «Физика звездных атмосфер: химический состав, магнетизм и поверхностные неоднородности», Кримська астрофізична обсерваторія, Крим, 2007 р.;
- 3 міжнародна науково-технічна конференція «Функціональні і конструкційні матеріали», НТЦ «Реактивелектрон» НАНУ, Донецьк, 2013 р.;
- VIII Всероссийские Армандовские чтения. МИ ВлГУ, «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов радиолокации, связи и акустике», Муром, 2018 г.;
- Всероссийские Армандовские чтения. МИ ВлГУ, «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн», Муром, 2019 г.

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано у 22 наукових працях, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України; 1 стаття у

зарубіжному спеціалізованому виданні, що входить до наукометричних баз даних Scopus і Web of Science; 8 наукових працях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації, та 7 статей, що додатково відображають наукові результати дисертації.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Обсяг основного тексту 146 сторінок, повний обсяг становить 197 сторінок. Дисертація містить 70 рисунків і 6 таблиць. Список використаних джерел містить 204 найменування.

### **ЗМІСТ РОБОТИ**

У **розділі 1** дисертації приведено перелік основних компонентів апаратури та аналіз робіт, присвячених приладам АЕСА.

– Для джерел збудження спектру підкреслюється, що поява нових джерел збудження спектру, таких як ВЧ і НВЧ плазмотрони, лазери, джерела тліючого розряду не скоротила кількість аналізів, що виконуються за допомогою дуги й іскри. Іскрові та дугові генератори залишаються найпоширенішими у виробничій і лабораторній практиці. Проаналізовано існуючі схеми генераторів іскри та дуги. Розглянуто принципи роботи й схемотехніку «класичних» генераторів, генераторів низьковольтної іскри та сучасних імпульсних генераторів плазми.

– Для оптичної апаратури АЕСА, сформульовано основні вимоги до оптичних спектральних приладів АЕСА, розглянуто існуючі оптичні схеми дифракційних спектрометрів їх переваги та недоліки.

– Для систем реєстрації спектрів основна увага приділена багатоканальним напівпровідниковим детекторам оптичного випромінювання які використовуються в АЕСА. Розглянуто принципи роботи та порівняльні характеристики ПЗЗ, ПЗІ та КМОН сенсорів.

Сформульовано перспективні напрямки удосконалення апаратури АЕСА та задачі, які потрібно вирішити в дисертаційній роботі.

У **розділі 2** відзначається, що джерела збудження спектру є ключовим елементом апаратури АЕСА. Вони мають визначальний вплив на точність вимірювань і можливість отримання спектрів елементів, що аналізуються. Стандартні генератори іскри й дуги, які використовуються в лабораторній практиці, мають суттєві недоліки. Підкреслюється необхідність гнучкого керування параметрами розряду для отримання оптимальних параметрів збуджуваної плазми в залежності від типу зразка та умов проведення аналізу. Можливості корегування потребують як амплітуда, профіль, тривалість, швидкість наростання та спаду імпульсу, так і загальна кількість імпульсів і характер зміни параметрів імпульсів впродовж вимірювання.

Виконана розробка і виготовлення дугового генератора плазми ЦУГ-2, що працює за принципом активного керованого джерела струму. Це забезпечує повний цифровий контроль за формою струму в плазмовому утворенні, що підвищує стабільність вимірювань і відкриває широкі можливості по керуванню параметрами розряду. Генератор формує малопотужні імпульси пробною розрядного проміжку амплітудою до 12 кВ, дугові імпульси основного розряду в



діапазоні 1 – 47 А з накладанням загострюючих імпульсів амплітудою до 150 А. Максимальна частота імпульсів становить 1 кГц. Потужність розряду до 1,2 кВт.

Спроектовано блок керування генератором, що базується на мікропроцесорному контролері. Блок формування розрядного струму складається з інверторного джерела напруги й модульного джерела струму з цифровим керуванням. Джерело струму побудоване на принципі цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) і складається з вісьмох джерел на потужних польових транзисторах. Таке схемне рішення дозволяє формувати вихідний струм зі швидкістю наростання не менше 30 А/мкс. При цьому забезпечується розподіл потужності, що розсіюється на кількох силових транзисторах, чим забезпечується безпечний режим їх роботи. Розглянуто декілька схем побудови джерел розрядного струму на біполярних і польових транзисторах, а також комбінована схема на польовому транзисторі з біполярним струмовимірвальним транзистором малої потужності в колі затвору. Проаналізовано статичні, динамічні й температурні характеристики кожного із джерел. В результаті запропоновано оригінальну схему джерела струму, що дозволило збільшити швидкість наростання струму в розряді з 2,6 до 31 А/мкс.

Розглянуто кілька варіантів вузлів пробою розрядного проміжку, а саме – триелектродну, паралельну та послідовну. В результаті експериментальних досліджень обрано послідовну схему ініціації як таку, що не потребує періодичного обслуговування, вносить мінімальну індуктивність в розрядний контур і можлива до реалізації на напівпровідниковій елементній базі без використання газових розрядників.

В склад генератора включено блок формування початкового імпульсу розрядного струму, який служить для розширення діапазону режимів іонізації плазми, контролю процесів пробовідбору і підвищення стабільності горіння розряду. Блок формує на початковій фазі розряду короткий  $\sim 10 - 30$  мкс імпульс струму амплітудою до 150 А.

До складу генератора входить блок газової автоматики, що забезпечує створення і підтримку контрольованої газової атмосфери в розрядному штативі під час розряду, а також в проміжках між вимірюваннями.

Випробування генератора ЦУГ-2 полягали в порівняльних дослідженнях з використанням джерел випромінювання різних типів – промислових генераторів іскри/дуги, спектральних ламп з порожнистим катодом та напівпровідникових світлодіодів. Випробування в реальних заводських умовах відбувалися з використанням як стандарту одного з кращих генераторів серійного виробництва – УГЭ-4. На великій кількості експериментальних даних (більш ніж 500 вимірів), встановлено, що симетрія та ексцес даних, отриманих за допомогою генератора ЦУГ-2, ближче до нормального розподілу, ніж даних отриманих з використанням промислового генератора УГЭ-4 (Рис. 1, 2). В результаті середньоквадратичне відхилення вимірювань спектрів плазми генератора ЦУГ-2 у 3 рази менше ніж у генератора УГЭ-4.

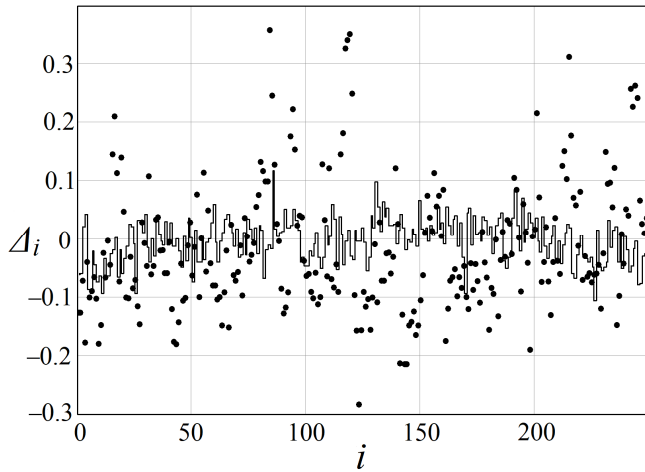


Рис. 1 – Результати вимірювань розкиду одиничних вимірювань спектральної лінії Fe – 324,4 нм, одержані за допомогою генераторів УГЭ-4 (точки) і ЦУГ-2 (суцільна лінія),  $i$  – порядковий номер вимірювання

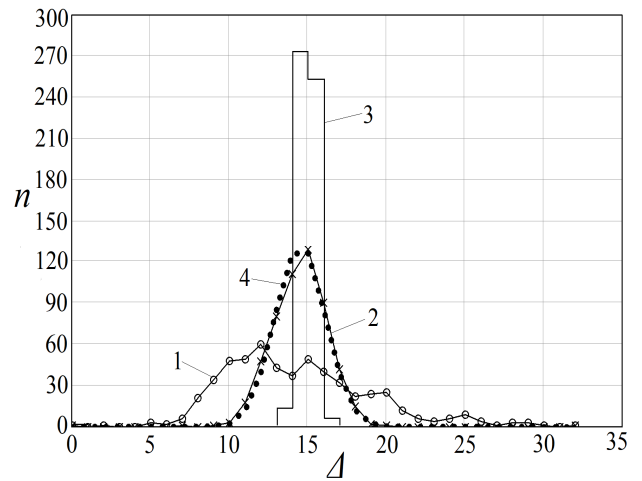


Рис. 2 – Гістограми розподілів даних вимірювань  $\Delta$  для генераторів УГЭ-4 (лінія 1), ЦУГ-2 (лінія 2), світлодіодного джерела (лінія 3) і нормального розподілу (лінія 4). Дані масштабовані по площі під кривою розподілу.

У розділі 3 приведена конструкція та розрахунок оптичної схеми з увігнутою дифракційною ґраткою. Наголошено на важливості мінімізації кількості віддзеркалень в спектрографі в ультрафіолетовій ділянці спектра. В результаті комп'ютерного моделювання оптичної схеми зроблено висновок, що класичні увігнуті дифракційні ґратки можуть забезпечити прийнятну якість відтворення спектра тільки при фокусній відстані близько 1 м і світлосилі 1/20, що суттєво збільшує габарити й зменшує ефективність оптичного приладу. Для подолання цих недоліків запропоновано розрахувати й виготовити неklasичну дифракційну ґратку з криволінійною нерівномірною нарізкою штрихів. Наведені розрахунки показують, що така ґратка забезпечує прийнятну якість зображень спектрів при фокусній відстані 0.5 м і світлосилі  $\sim 1/10$ . На базі такої ґратки, в рамках науково-технічного проекту НАН України, спроектовано і виготовлено настільний спектрометр. Зазначено, що основною проблемою приладів з увігнутою дифракційною ґраткою є велика протяжність спектру, що потребує залучення великої кількості ( $\sim 10$  шт.) лінійних сенсорів для реєстрації спектра. Як альтернативний варіант розглянута схема зі схрещеною дисперсією, що дозволяє використовувати двовимірний матричний детектор. Виконані розрахунки, комп'ютерне моделювання та експериментальне дослідження кількох схем зі схрещеною дисперсією та зроблено висновок про перспективність цієї схеми, в поєднанні з сучасними матричними фотоприймачами, для портативних і настільних приладів.

В цьому ж розділі представлені результати розрахунків оптичних схем інструменту для побудови монохроматичних двовимірних зображень об'єктів. Ці роботи виконувались у рамках проекту Українського науково – технологічного центру по створенню спектрогеліографу для дослідження Сонця.

В результаті роботи запропоновано оригінальну оптичну схему (Рис.3), виконані розрахунки, комп'ютерне моделювання і практичне виготовлення приладу.

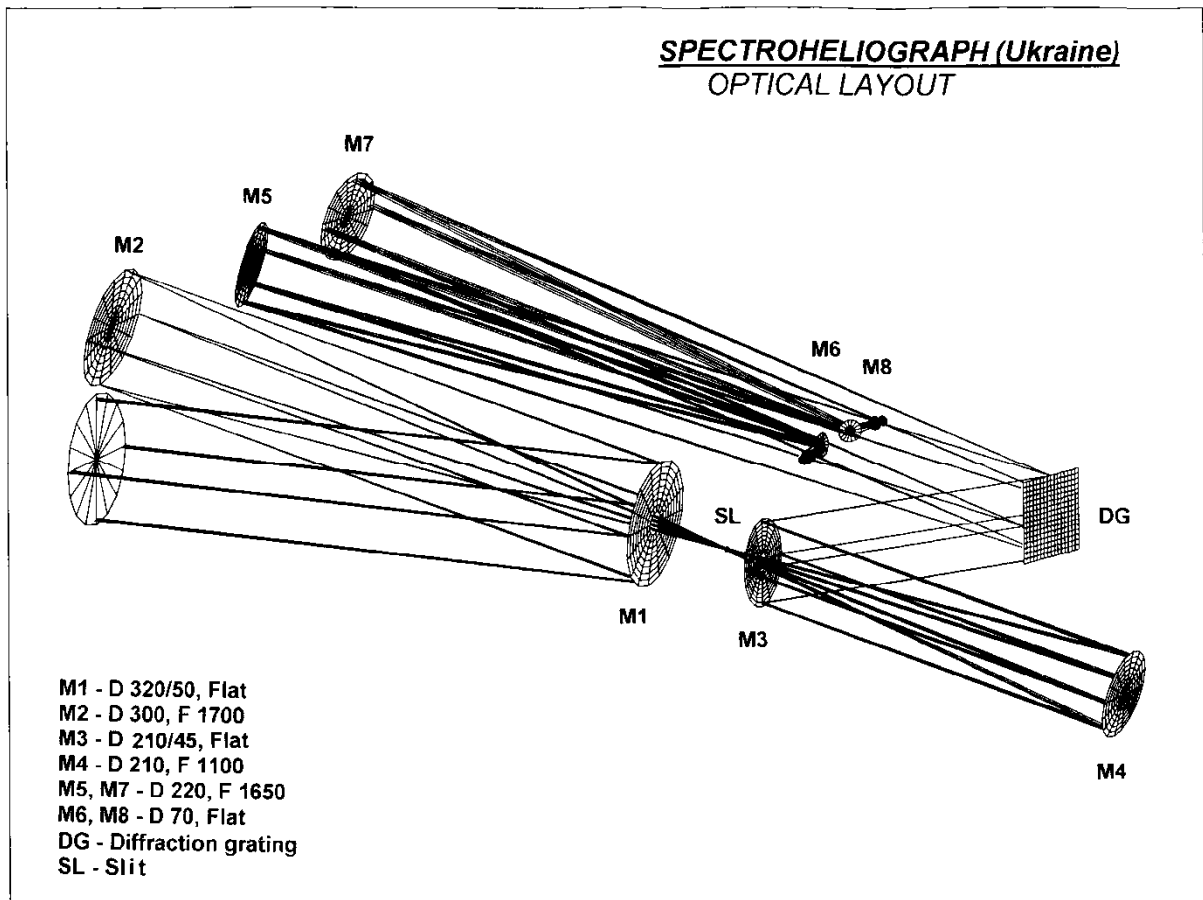


Рис. 3 Оптична схема спектрогеліографа. M1 – коригувальна пластина, M2 – об’єктив телескопа, M3, M4 – дзеркала коліматора, M5, M7 – дзеркала камери, M6, M8 – діагональні плоскі дзеркала, DG – дифракційна ґратка, SL – вхідна щілина спектрографа [137]

Телескоп представлений двома дзеркалами M1 і M2, в площині вхідної щілини спектрографа SL формується зображення Сонця. В процесі роботи поворотом дзеркала M1 зображення Сонця може переміщуватися по щілині.

Схему телескопа можна класифікувати як дзеркальний варіант камери Райта. Світловий потік від Сонця спрямовується на коригувальну пластину M1, що має дзеркальну оптичну поверхню четвертого порядку. Відбите від неї світло направляється на сплюснутий сфероїд M2, який створює зображення Сонця через отвір в корегувальній пластині за межами труби телескопа.

Така оптична схема, по-перше, позбавлена хроматизму і, по-друге, не має діагонального дзеркала всередині труби телескопа. Обидва дзеркала мають великі розміри, обумовлені апертурою, і знаходяться на кінцях труби телескопа. Таке розташування дзеркал дозволяє організувати їх охолодження застосуванням витяжної вентиляції, що має важливе значення при спостереженнях Сонця. Фокальна площина, де розташовується вхідна щілина спектрографа SL, також має зручне для охолодження розташування. Подвійний спектрограф складається з коліматора, що містить дзеркала M4, M3 та

дифракційну ґратку DG і двох камер, що складаються з дзеркал M5, M6, M7, M8.

Наприкінці розділу розглянуто удосконалення, що дозволяють збільшити роздільну здатність при реєстрації спектрів. Проаналізовані можливості розв'язання цієї задачі в спектральному і координатному вимірі. Запропоновано удосконалення спектральних приладів, що дозволяє виконувати зсув зображення спектра відносно детектора на частину пікселя. Це дає змогу реалізувати повну оптичну здатність спектрометра незалежно від розмірів пікселів. Запропоновано алгоритм обробки даних при реалізації субпіксельної роздільної здатності детектора. Для розв'язання цієї спектрометричної задачі був застосований алгоритм, суть якого зрозуміла з наступного спрощеного розгляду. Нехай послідовно реєструються два масиви даних, отриманих при зміщенні фотодіодної лінійки на половину ширини пікселя. Завдання полягає в знаходженні масиву подвоєної довжини, відповідного подвоєній роздільній здатності лінійки, що зводиться до розв'язання системи лінійних рівнянь типу:

$$M \cdot X = B, \quad (1)$$

де:  $X$  – шуканий вектор,  $B$  – вектор результатів вимірювань, а

$$M = \begin{pmatrix} 110 & \dots & 000 \\ 011 & \dots & 000 \\ \dots & \dots & \dots \\ 000 & \dots & 110 \\ 000 & \dots & 011 \end{pmatrix}.$$

У векторі  $B$  парні й непарні компоненти відносяться до двох експозицій, отриманих при зміщенні спектра на половину ширини пікселя.

Слід зазначити, що система (1) є необумовленою навіть за відсутності шумів, у зв'язку з тим, що кількість невідомих, завжди на одиницю більше, ніж кількість рівнянь. Але ці складнощі можна подолати завдяки апріорним даним, які супроводжують спектральні вимірювання. Ця обставина дозволяє написати додаткові рівняння й отримати коректне розв'язання системи. При надлишковій кількості рівнянь розв'язок доцільно шукати методом найменших квадратів. У цьому випадку завдання зводиться до розв'язання системи:

$$M^T \cdot M \cdot X = M^T \cdot B, \quad (2)$$

де верхнім індексом  $T$  відзначено транспонування матриці  $M$ . Якщо ввести позначення:  $b = M^T \cdot B$  то компонентами вектора  $b$  будуть суми двох сусідніх компонент вектора  $B$ :  $b_i = B_i + B_{i+1}$ . У цих позначеннях рішення системи (2) можна представити в такому вигляді:

$$X = \frac{1}{|M^T \cdot M|} \cdot K \cdot b,$$

де матриця коефіцієнтів  $K$ , які можна назвати ваговими, створюється методом математичної індукції без будь-яких обчислювальних процедур, виходячи з кількості відліків ділянки спектра, що обробляється.

Виконана експериментальна перевірка запропонованого удосконалення й

алгоритму обробки даних, результати яких відображені на Рис. 4.

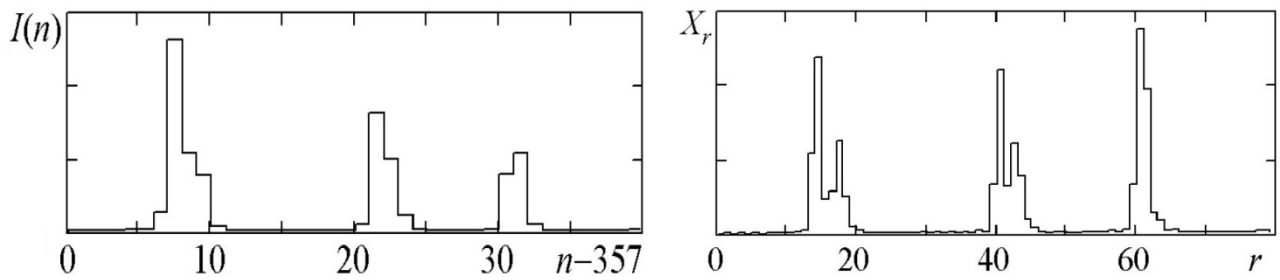


Рис. 4 – Ділянка спектру до обробки запропонованим алгоритмом (ліворуч), і після обробки (праворуч)

Розглянутий алгоритм підвищення роздільної здатності послідовним застосуванням дозволяє, в принципі, збільшити роздільну здатність системи реєстрації до повного оптичного розділення оптики спектрографа, при довільних розмірах пікселя фотоприймача. Межі застосування цього способу підвищення роздільної здатності вирішальною мірою залежать від поведінки співвідношення сигнал/шум при збільшенні просторової частоти сигналу.

У **розділі 4** сформульовані основні вимоги до багатоканальних напівпровідникових сенсорів для АЕСА, наводиться перелік найбільш розповсюджених лінійних сенсорів які використовуються для реєстрації спектрів. Викладені методи розширення спектрального діапазону чутливості ПЗЗ фотоприймачів. Обґрунтована необхідність використання багатосенсорних камер для реєстрації спектрів АЕСА. Розглянуті такі схеми узгодження мультисенсорних камер з оптикою спектрометрів: шахова схема установки сенсорів, схема з дзеркальними відбивачами під кутом  $45^\circ$  через один, і шахова схема з дзеркальними відбивачами. Запропонована оригінальна оптична схема з рефрактивними лінзовими елементами для узгодження мультисенсорної камери з оптичним трактом. Наведена структурна схема (Рис. 5) і конструкція мультисенсорної камери авторської розробки (Рис. 6).

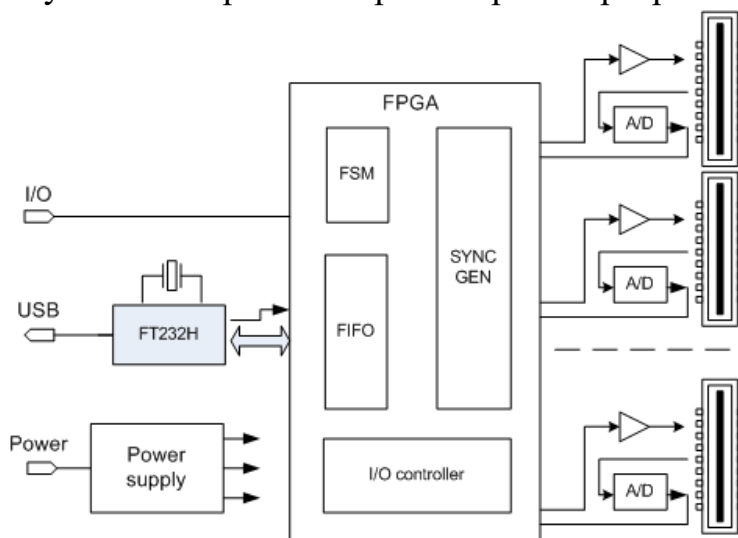


Рис. 5 Структурна схема мультисенсорної камери



Рис. 6 Зовнішній вигляд мультисенсорної камери

Камера складається з плати керування і двох мультисенсорних плат розташованих одна над одною зі зсувом на величину фоточутливої зони одного фотоприймача. Плата керування побудована на основі програмованої логічної матриці EP3C10E144 компанії Altera (Intel). Зв'язок з комп'ютером здійснюється за допомогою інтерфейсу USB, контролер якого виконаний на мікросхемі FT232N компанії FTDI Chips. До плати можна під'єднати дві мультисенсорні плати по 5 фотоприймачів на кожній (10 сенсорів) або до 15 плат з окремими сенсорами через додатковий концентратор. На мультисенсорній платі розміщуються від 1 до 5 лінійних ПЗЗ сенсорів, буферні формувачі сигналів, АЦП, схеми посилення й узгодження рівнів. Також на платі встановлюються елементи кріплення 45°-х дзеркальних відбивачів. Дві плати згвинчуються в пакет, утворюючи єдиний блок з 2 – 10 лінійних сенсорів TCD1304 з відбивачами в шаховому порядку, який встановлюється в спектральну камеру.

Далі в розділі розглянуто вплив темного струму на динамічний діапазон фотоприймачів. Наведена конструкція мультисенсорної камери з термоелектричним охолодженням фотодетекторів. Здійснене експериментальне дослідження темного струму фотоприймачів TCD1304AP і різних опосередкованих способів його визначення. Для цього використовувались наступні електричні параметри сенсорів:

1) Усереднена за багатьма відліками різниця між сигналом сенсора без засвічення й апаратним нулем (Рис. 7).

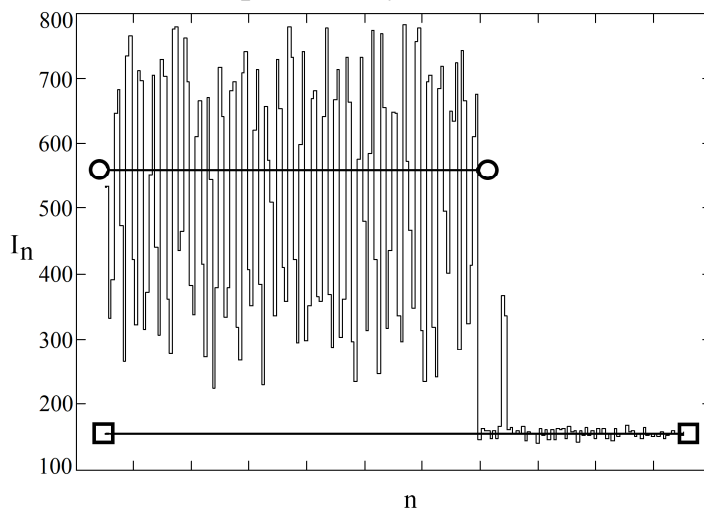


Рис. 7 – Порівняння з апаратним нулем. Рівень сигналу без засвічення  $\circ-\circ$  (лінія зверху), рівень апаратного нуля  $\square-\square$  (знизу) рівні, по параметрах вихідного сигналу, температурних датчиків.

Далі в розділі представлені результати дослідження світлосигнальної передавальної функції сенсора. Відзначається асиметричний характер перевантаження ПЗЗ структур фотоприймача (блумінг), що значно ускладнює інтерпретацію спектральних даних (Рис 8).

2) Амплітуди періодичної структури в сигналі сенсорів.

3) Шумів отриманих при відніманні двох сигналів (для виключення періодичної структури й постійної складової темного струму). Середньоквадратична помилка в діапазоні від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$  для першого випадку складає  $\sim 0,2^{\circ}\text{C}$ , для другого випадку  $\sim 1^{\circ}\text{C}$ , і для третього може доходити до  $5^{\circ}\text{C}$ .

Запропонований підхід дозволяє розв'язати проблему визначення температури фотоприймачів на програмному без застосування допоміжних

Запропоновано використання закону взаємозамінності яскравості й витримки для визначення динамічного діапазону сенсорів. Відзначається порушення закону взаємозамінності як для великих, так і для малих витримок (Рис. 9). Надається пояснення цього явища для малих витримок. Це пов'язано з тим, що при зменшенні часу експозиції (витримки) величина сигналу зменшується до нуля. В такому випадку, при відніманні темнового струму, можна отримати знакозмінний результат. Результат усереднення цієї різниці зі зменшенням витримки буде наближатися до нуля, що ми й спостерігаємо експериментально.

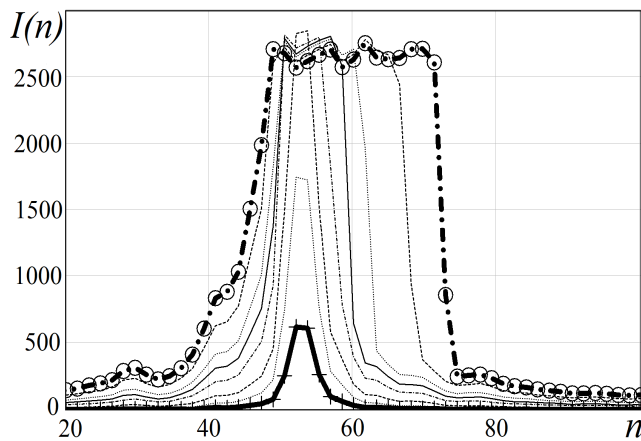


Рис. 8 – Результати реєстрації спектральної лінії з витримками від 0.1 до 4 с

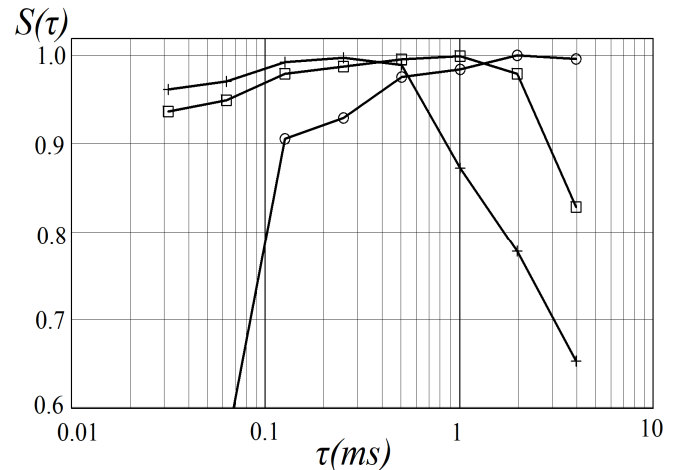


Рис. 9 – Графіки закону взаємозамінності для спектральних ліній амплітудою 11, 115 і 560

Наприкінці розділу, з застосуванням закону взаємозамінності, здійснено порівняльне оцінювання сенсора TCD1304, що не має вбудованих засобів антиблумінгу з сенсорами TCD1205 і ILX511 в яких вони є. Встановлено, що незважаючи на розтікання зарядів уздовж ПЗЗ регістра, сенсори без антиблумінгу зберігають лінійність в більш широкому діапазоні, ніж сенсори, що мають антиблумінг.

У розділі 5 розглянуто задачу обробки результатів спектральних вимірювань в загальній спектрометричній постановці. Указано на специфіку реєстрації спектрів багатоелементними фотоелектричними детекторами регулярної структури в порівнянні з фотографічними носіями. Коли ширина пікселя наближається до ширини зображення спектральної лінії, виникають складнощі при коректній обробці фотометричних даних обумовлені невизначеністю позиції, або зсувом, спектральних ліній відносно регулярної структури пікселів. Розглянуто особливості прямокутного вікна згладжування, що часто застосовується. Наголошується, що спрощене розв'язання задачі аналізу спектральних даних з використанням прямокутного ядра згладжування тягне за собою ризик помилки обчислювального характеру. У деяких випадках пов'язана з цим компонента відносного стандартного відхилення може досягати половини амплітуди. Збільшенням ширини прямокутного ядра згладжування вона може бути зменшена до прийнятних величин, але зробити це можна або за рахунок втрати роздільної здатності, або за рахунок зменшення спектрального

діапазону приладу. Відзначається важливість оптимального вибору аналітичного параметра. Для коректного розв'язання задачі визначення амплітуди спектральної лінії необхідно залучати дані про її положення щодо пікселів і її напівширину. Представлено опис методу максимальної правдоподібності стосовно розв'язання даної задачі.

Відповідно до цього методу знаходимо найбільш вірогідні величини параметрів – амплітуду, положення та характеристики форми спектральних ліній. Для цього мінімізуємо суми квадратів різниць між апіорними даними й результатами вимірювань. В цьому випадку логарифмічна функція

правдоподібності має вигляд:

$$L(x, p_\alpha) = \text{const} - \frac{1}{2 \cdot \sigma^2} \cdot \sum_{i=1}^n [f(x_i, p_\alpha) - f_i]^2,$$

де  $\sigma^2$  – дисперсія вимірювання сигналу,  $f(x_i, p_\alpha)$  – апаратна функція спектрометра,  $x_i$  – координата  $i$ -го пікселя вздовж дисперсії,  $p_\alpha$  – параметри з порядковим номером  $\alpha$ ,  $f_i$  – результати вимірювання сигналу  $i$ -го пікселя.

Для визначення набору параметрів, що мінімізують функцію правдоподібності прирівнюємо нулю похідні функції правдоподібності по всім параметрам. В результаті одержимо таку систему рівнянь для всіх  $p_\alpha$ :

$$\sum_{i=1}^n [f(x_i, p_\alpha) - f_i] \cdot \frac{\partial f(x_i, p_\alpha)}{\partial p_\alpha} = 0.$$

Розв'язання цієї системи дає набір найбільш вірогідних величин параметрів. Представлена залежність точності визначення таких параметрів як фаза й амплітуда від форми спектральної лінії та співвідношення сигнал/шум в результатах вимірювань. Показано, що процедура згладжування експериментальних даних згорткою зі стаціонарним ядром, яке описує форму спектральної лінії, призводить до того ж результату, що і застосування методу максимальної правдоподібності. В останньому підрозділі пропонується оригінальний метод лінеаризації передавальної світлосигнальної функції при великих сигналах. Для цього необхідно організувати паралельну реєстрацію зображення спектру на два сенсори з протилежним напрямком транспортування зарядів в ПЗЗ регістрах (Рис. 10). На цьому рисунку зображена одна і та ж лінія з двома витримками при транспортуванні заряду в протилежних напрямках. Якщо ці два рисунки уможливно розрізати симетрично щодо спектральної лінії зареєстрованої на лінійній ділянці світлосигнальної характеристики (зображена пунктиром), а потім скласти по лінії розрізу, то з отриманих двох графіків можна скласти один, представлений на Рис. 11. Якщо для виконання цієї процедури використовувати інструменти методу найменших квадратів, то можна сподіватися на її достатню коректність. «Відрізану» частину теж не слід викидати – її доцільно використовувати для оцінки амплітудного параметра. Таким чином, для оцінки площі під спектральною кривою наявність блумінга можна перетворити з недоліку в перевагу. В цьому випадку можливе відтворення спектральних даних навіть за умови значного перевантаження сенсора з асиметричним характером блумінгу. При цьому суттєво, більш ніж в 10 разів, збільшується динамічний діапазон фотореєструючої камери.



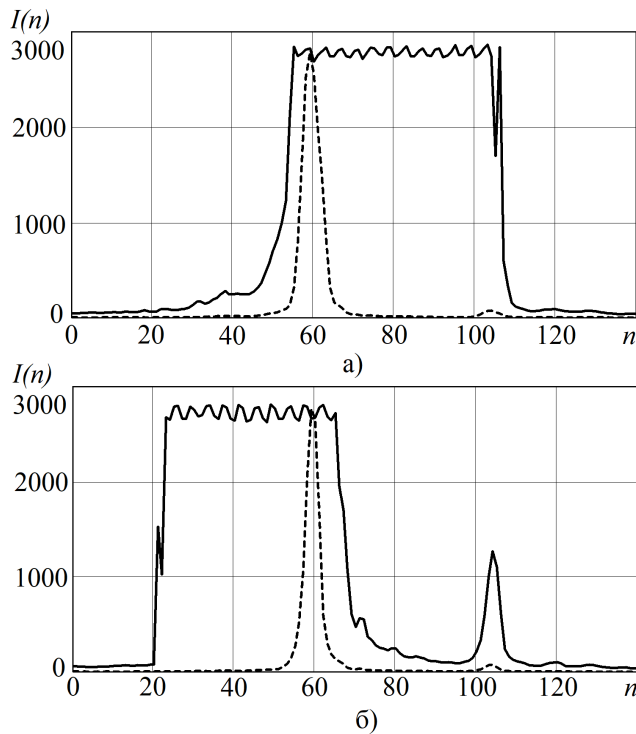


Рис. 10 Спектр з витримкою 4 с в умовах розтікання заряду (суцільна лінія), пунктир – з витримкою 0.25 с в умовах близьких до лінійного режиму. Верхній графік (а) – напрям зсуву в транспортному реєстрі вправо, нижній графік (б) – зсув вліво

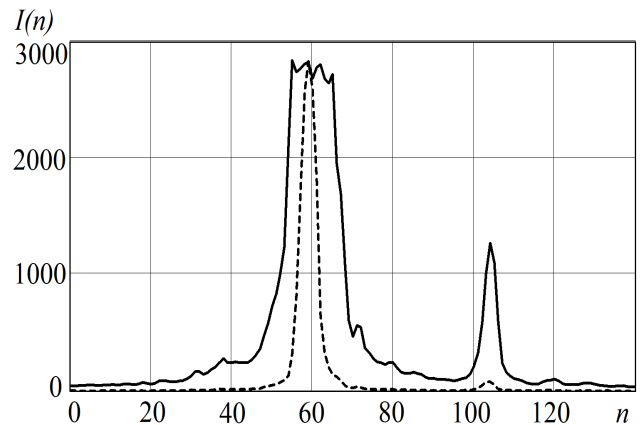


Рис. 11 Спектр з великою витримкою, скомпільований з невикривлених частин сильно переосвітленої спектральної лінії з Рис. 10. Пунктиром позначена та сама спектральна лінія з малою витримкою

## ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень розв'язано низку важливих науково-технічних задач вдосконалення методів і апаратури АЕСА як одного з найпоширеніших засобів контролю елементного складу речовини. При цьому отримані такі наукові та практичні результати:

1. Вперше розроблено спосіб збільшення роздільної здатності багатоелементних фотоприймачів при реєстрації спектрів, який складається з апаратної модернізації спектрометра, що дозволяє виконати мікрометричний зсув зображення спектра щодо пікселів детекторних лінійок, а також алгоритму обробки спектральних даних. Це відкриває можливість отримання субпіксельного розділення спектральних зображень аж до повної оптичної роздільної здатності спектрального приладу. Експериментально отримана роздільна здатність, що у два рази перевищує роздільну здатність фотоприймача.

2. Вперше експериментально встановлено, що для визначення температури кристала фотоприймача TCD1304AP, при роботі в реальних умовах, доцільно використовувати перевищення рівня темного струму над апаратним нулем. За результатами випробувань цей метод забезпечує точність кращу, ніж  $1^{\circ}\text{C}$  і може бути реалізований без застосування додаткових температурних датчиків. Це дозволяє компенсувати вплив деяких заважаючих чинників і підвищити точність аналізів в лабораторних і заводських умовах.

3. Вперше запропоновано спосіб лінеаризації передавальної світлосигнальної функції ПЗЗ фотоприймачів, що не мають антиблумінга, при великих сигналах. Для цього застосована паралельна реєстрація із зустрічним транспортуванням зарядів в ПЗЗ детекторах. Це дозволяє компенсувати асиметричні викривлення перевантажених ділянок спектру і суттєво (більш ніж в десять разів) збільшити динамічний діапазон фотоприймачів.

4. Отримали подальший розвиток методи контролю нелінійностей трактів накопичення і перенесення заряду фотоприймачів щодо виконання принципу взаємозамінності яскравості ліній і тривалості експозиції. Як показано в результаті досліджень, цей принцип є дуже чутливим індикатором не тільки в разі перевантаження, а й у випадку слабких сигналів. Це дозволяє оптимізувати діапазон експозицій реєстратора в залежності від характеру спектральних даних.

5. Спроектовано оптичну схему і виготовлено спектрогеліограф для спостереження Сонця одночасно у двох лініях спектра, що дозволяє отримувати одночасно два зображення сонячної фотосфери на різних її глибинах.

Виконано розробку, виготовлення і впровадження комплекту спектральної апаратури, що має істотні переваги перед існуючими зразками й складається з:

- Дугового імпульсного генератора плазми з цифровим керуванням параметрами розряду, що має широкий діапазон регулювання параметрів збудження плазми. Генератор має удосконалену схемотехніку формування розрядного струму з підвищеною стабільністю і швидкодією, що дає змогу розширити діапазон енергій збуджуваних спектральних ліній. За результатами порівняльних випробувань точність вимірювань розробленого генератора перевищує точність з використанням серійного генератора УГЭ-4, в три рази.

- Декількох варіантів оптичних блоків з неklasичною дифракційною ґраткою і схрещеною дисперсією. В результаті використання ґратки з криволінійними штрихами й нерівномірним кроком нарізки вдвічі зменшено розміри спектрометра з одночасним зменшенням аберацій і поліпшенням оптичної роздільної здатності. Виконані розрахунки й макетування декількох оптичних схем зі схрещеною дисперсією, показані їх переваги в поєднанні з сучасними матричними сенсорами.

- Оригінальної мультисенсорної камери з гнучкою архітектурою для реєстрації оптичних спектрів в лабораторних і промислових умовах, яка здатна реєструвати спектр без розривів в діапазоні від 190 до 1100 нм.

Результати досліджень і розроблені методики були використані при розробці спектрофотометричної апаратури та алгоритмів обробки експериментальних даних. Понад два десятки комплектів спектральної апаратури, розробленої та виготовленої за участю автора, було поставлено на промислові підприємства і лабораторії України.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Публікації у наукових фахових виданнях України:*

1. Егоров А. Д., Моторненко А. П., Егоров В. А., Егоров С. А., Здор Е. В., Корж В. Г., Скуратовский И. Г. Автоматизированный спектрометр для эмиссионного спектрального анализа // Радиопизика и електроника. 1999. Т. 4, № 3. С. 148–153. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення односенсорної ПЗЗ камери, участь у дослідженнях спектральних характеристик ПЗЗ ILX526A (Sony)).*
2. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Здор Е. В. Фотометрирование эмиссионных оптических спектров фотодиодными линейками // Радиопизика и електроника. 2002. Т. 7, № 2. С. 422–425. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення односенсорної багатоканальної камери на базі КМОН сенсора S5463–1024Q (Hamamatsu), участь у розробці методики вимірювань).*
3. Yegorov A., Yegorov V., Yegorov S. Subpixel Detection of Spectrum Images by Photodiode Structures // Радиопизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 1. С. 77–83. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру на базі ПЗЗ сенсора TCD1205D (Toshiba), запропонував рішення щодо модифікації спектрометрів для забезпечення зсуву спектру відносно фотоприймача, приймав участь у визначенні методики вимірювань, та попередньої обробки даних).*
4. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников І. Є. Дослідження можливості компенсації ефекта блумінга ПЗЗ-детекторів оптичного спектру // Технологія та конструювання в електронній апаратурі. 2019. № 5–6. С. 8–15. *(Особистий внесок здобувача: розробив та виготовив декілька модифікацій спектральних камер, запропонував використання зустрічного транспортування зарядів в ПЗЗ сенсорах для відновлення координат перевантажених спектральних ліній)*
5. Егоров В. А., Егоров С. А., Луценко В. И. Экспериментальное исследование газоразрядной антенны на парах ртути с низкочастотным возбуждением плазмы // Прикладна радіоелектроніка. 2019. Т. 18, № 3–4. С. 190–196. *(Особистий внесок здобувача: запропонував і виготовив конструкцію плазмової антени з низькочастотним збудженням плазми, брав участь у вимірюваннях)*
6. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников І. Є. Дуговий генератор плазми атомно-емісійного аналізатора з цифровим керуванням параметрами розряду // Радиопизика та електроніка. 2020. Т. 25, № 3. С. 78–88. DOI: [doi.org /10.15407/rej2020.03.078](https://doi.org/10.15407/rej2020.03.078) *(Особистий внесок здобувача: запропонував і виготовив конструкцію генератора плазми, виконав моделювання і макетування джерел розрядного струму.)*

**Наукова праця у зарубіжному спеціалізованому виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз :**

7. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. Динамический диапазон ПЗС-фотоприемников спектра атомно-эмиссионных анализаторов. // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86, № 3. С. 410–416. (Scopus, WoS)

*(Особистий внесок здобувача: розробив та виготовив багатосенсорну спектральну камеру, запропонував використання зустрічного транспортування зарядів в ПЗЗ сенсорах для відновлення координат перевантажених спектральних ліній, запропонував пояснення відхилення закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗЗ)*

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (тези доповідей на наукових конференціях):**

8. Акимов Л. А., Егоров А. Д., Егоров В. А. Проект спектрогелиографа // Солнце и космическая погода: конференция памяти академика Андрея Борисовича Северного, 9–14 июня. 2003 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2004. Т. 100, № 1. С. 233. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розробці оптичної схеми інструмента, виконав аналіз параметрів фотодетекторів )*

9. Акимов Л. А., Белянкин И. П., Егоров А. Д., Егоров В. А. Еленская Л. И., Здор Е. В., Железняк А. П., Коничек В. В., Корохин В. В., Синельников И. Е. Харьковский спектрогелиограф для оперативной регистрации солнечной активности // Физика звездных атмосфер: химический состав, магнетизм и поверхностные неоднородности: материалы международной научной конференции, 17–23 июня. 2007 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2008. Т. 104, № 2. С. 52. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розробці оптичної схеми інструмента, розробляв і досліджував спектральну камеру на матричному КМОН фотоприймачі).*

10. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. Получение субпиксельного разрешения при регистрации изображений спектров фотодиодными структурами // Физика звездных атмосфер: химический состав, магнетизм и поверхностные неоднородности: материалы международной научной конференции, 17–23 июня. 2007 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2008. Т. 104, № 2. С. 51. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру, запропонував рішення щодо модифікації спектрометрів для забезпечення зсуву спектру відносно фотоприймача).*

11. Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е. Исследование температурных эффектов при регистрации спектров фотоэлектрическими детекторами // Функциональные и конструкционные материалы : материалы 3-й международной научно-технической конференции НТЦ «Реактивэлектрон» НАНУ, 11–14 ноября 2013 г., Донецк, 2013. С. 85. *(Особистий внесок здобувача: запропонував методику визначення температури сенсора по амплітуді періодичної складової вихідного сигналу, розробив методику вимірювань і конструкцію спектральної камери з термоелектричним охолодженням).*

12. Егоров С. А., Егоров В. А., Синельников И. Е. Реконструкция спектров излучения при заданных ограничениях на аппаратную функцию системы регистрации // Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов радиолокации, связи и акустике : VIII Всероссийские Армандовские чтения, 26–28 июня 2018 г., Муром. С. 7–9. URL : [http://www.mivlgu.ru/conf/armand2018/tezis-2018/pdf/T\\_1.pdf](http://www.mivlgu.ru/conf/armand2018/tezis-2018/pdf/T_1.pdf) (*Особистий внесок здобувача: брав участь у формулюванні завдань дослідження з урахуванням специфіки вимірювань ПЗЗ сенсорами*)

13. Егоров А. Д., Егоров С. А., Егоров В. А., Синельников И. Е. Влияние температуры на чувствительность CCD сенсоров фирмы Toshiba TCD1304AP и TCD1304DG. // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Армандовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 625–629. URL : [http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4\\_38.pdf](http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_38.pdf) (*Особистий внесок здобувача: брав участь у створенні експериментальної установки та інтерпретації результатів вимірювань*).

14. Егоров С. А., Егоров В. А. Исследование нелинейности чувствительности ПЗС сенсоров TCD1304 и влияющих на нее факторов // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Армандовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 635–638. URL : [http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4\\_40.pdf](http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_40.pdf) (*Особистий внесок здобувача: запропонував пояснення відхилення закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗЗ*).

15. Егоров В. А., Егоров С. А., Луценко В. И. Плазменная антенна с парами ртути вида полувибратора Пистолькорса на металлическом экране // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Армандовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 580–587. URL : [http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4\\_31.pdf](http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_31.pdf) (*Особистий внесок здобувача: запропонував і виготовив конструкцію плазмової антени з низькочастотним збудженням плазми, брав участь у вимірюваннях*)

#### **Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

16. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Корж В. Г., Моторненко А. П. Автоматизированный спектрометр на основе спектрографа ИСП-28 // Авиационно-космическая техника и технология. 2000. Вып. 18. С. 235–241. (*Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення односенсорної ПЗЗ камери, брав участь у дослідження спектральних характеристик фотодетекторів*)

17. Егоров В. А., Егоров С. А. Автоматизированный атомно-эмиссионный спектрометр // Наука та інновації. 2008. Т. 4, № 2. С. 33–39. (*Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру з*

*розташуванням сенсорів на колі Роуланда, виконав комп'ютерне моделювання оптичної схеми спектрометра і декількох типів дифракційних ґраток).*

18. Андрющенко А. Ю., Бланк А. Б., Глушкова Л. В., Шевцов Н. И., Штителъман З. В., Егоров А. Д., Егоров В. А., Здор Е. В. О преимуществах фотоэлектрической регистрации атомно-эмиссионных спектров для анализа функциональных материалов и объектов окружающей среды // Методы и объекты химического анализа. 2008. Т. 3, № 2. С. 157–162. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру для спектрографа ДФС-8, брав участь в постановці завдань та інтерпретації результатів вимірювань)*

19. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Еленская Л. И., Синельников И. Е. Исследование температурных эффектов при регистрации спектров фотоэлектрическими детекторами // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування: збірник наукових праць. 2014. Вип. 48(2). С. 74–80. *(Особистий внесок здобувача: запропонував методику визначення температури сенсора по амплітуді періодичної складової вихідного сигналу, розробив методику вимірювань і конструкцію спектральної камери з термоелектричним охолодженням)*

20. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Еленская Л. И., Синельников И. Е. Телескопы видимого и инфракрасного диапазонов для обнаружения экзопланет земного типа // Радиофизика и радиоастрономия. 2016. Т. 21, № 1. С. 14–23. *(Особистий внесок здобувача: оцінив вплив квантових флуктуацій при вимірюваннях світлового потоку в видимому та інфрачервоному діапазонах з застосуванням режиму підрахунку фотонів фотоприймачами різних типів).*

21. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е., Бабаков М. Ф. Мультисенсорная камера для спектральных измерений на приборах с зарядовой связью линейной структуры // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. 2019. Т. 90, № 2. С. 80–88. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення мультисенсорної камери для спектральних вимірювань, запропонував методику визначення температури сенсора по амплітуді періодичної складової вихідного сигналу, запропонував пояснення відхилення закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗЗ)*

22. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е. Удосконалені методики обробки даних в оптичних спектрометрах // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Т. 30 (69), № 3, Ч. 1. С. 46–50. *(Особистий внесок здобувача: запропонував табличне задання апаратної функції при обробці спектрів методом максимальної правдоподібності)*

## АНОТАЦІЯ

*Єгоров В. А.* **Підвищення метрологічних та експлуатаційних характеристик елементів та систем атомно-емісійного спектрального аналізу.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2020.

Дисертацію присвячено розв'язанню задачі виявлення фізичних закономірностей процесів збудження, аналізу та реєстрації спектрів плазмових утворень в апаратурі атомно-емісійного спектрального аналізу (АЕСА), та використання цих закономірностей для удосконалення аналітичної апаратури. Виконана розробка комплексу апаратури АЕСА з удосконаленими метрологічними та експлуатаційними характеристиками. Розроблено та виготовлено дуговий генератор з програмним керуванням параметрами розряду. Створено декілька багатоканальних спектрометрів. Розроблено та виготовлено камери реєстрації спектрів. Розроблено способи підвищення роздільної здатності фотоприймачів. Запропоновані способи розширення динамічного діапазону фотодетекторів. Розроблена апаратура реєстрації гіперспектральних зображень. Запропоновано алгоритм оптимальної фільтрації результатів спектральних вимірювань.

**Ключові слова:** атомно-емісійний спектральний аналіз, дугове джерело спектра, оптичний спектрометр, ПЗЗ фотодетектор, роздільна здатність, динамічний діапазон.

## ABSTRACT

*Yegorov V. A.* **Improving metrological and operational characteristics of elements and systems of atomic emission spectral analysis.** – Manuscript.

Thesis for Candidate Degree in Physical and Mathematical Sciences, Speciality 01.04.01 – Physics of Devices, Elements and Systems. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to solving the problem of identifying the physical laws of the processes of excitation, analysis and registration of the spectra of arc and spark plasma formations in the equipment for atomic emission spectral analysis, and the use of these laws to improve the metrological and operational characteristics of analytical equipment.

The development and creation of a complex of equipment for atomic emission spectral analysis, research and implementation of methods for improving their metrological and operational characteristics have been completed.

As a result of the work, an arc generator with programmed control of the discharge parameters for flexible control of the sampling and plasma excitation modes was developed and manufactured. Methods for the formation of the discharge current

and the breakdown of the discharge gap of the arc have been improved, which have increased stability and speed.

Several optical spectral units of multichannel spectrometers have been created for operation in the near infrared, visible and ultraviolet ranges. The advantages of aberration compensation concave diffraction gratings are shown. Several cross-dispersion optical layouts are presented. The equipment has been developed and the possibilities of registration of hyperspectral images of plasma formations have been investigated. Based on the designed optical layout, a spectroheliograph has been created for observing the Sun simultaneously in two lines of the spectrum, which makes it possible to simultaneously obtain two images of the solar photosphere at different depths.

Cameras for recording spectra have been developed and manufactured with the possibility of continuous recording of a given part of the spectrum (without gaps), in a wide spectral range, with the possibility of thermoelectric control of the temperature of photodetectors. A technique has been developed for determining the temperature of multi-element photodetectors from the parameters of the output signal without using additional temperature sensors.

Technical means and methods of increasing the resolution of multielement photodetectors based on a controlled shift of the spectrum image relative to pixels and an algorithm for the processing of spectral data have been developed. This makes it possible to obtain subpixel resolution of spectral images, up to the full optical resolution of a spectral device.

Work has been carried out to study the dynamic range of multichannel photodetectors. Methods for controlling the nonlinearity of photodetectors were further developed in accordance with the principle of reciprocity of brightness and exposure time, which made it possible to find an explanation for the deviation of reciprocity for low signal levels. A method is proposed for expanding the dynamic range of a photo-CCD using parallel registration with counter transport of charges in CCD shift registers. An experimental comparison is made of the dynamic range of CCD photodetectors with and without built-in blooming suppression.

An algorithm for the optimal filtering of the results of spectral measurements is proposed, taking into account the specifics of multichannel photodetectors when measuring spectra. It is proposed to choose the analytical parameters least affected by the overload, using the maximum likelihood method.

**Keywords:** atomic emission spectral analysis, arc spectrum source, optical spectrometer, CCD photodetector, resolution, dynamic range.