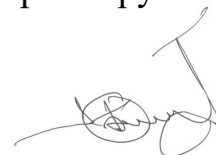


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАЛАНЮК ЮРІЙ ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.397.3

**МЕТОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СКАНУВАЛЬНОГО
МІКРОСКОПА З ОСВІТЛЕННЯМ ДОСЛІДЖУВАНИХ МІКРООБ'ЄКТІВ
В УЛЬТРАФІОЛЕТОВОМУ ДІАПАЗОНІ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник –
доктор технічних наук, професор
Шклярський В.І.

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради*

/І.В. Демидов/

Львів – 2017

АНОТАЦІЯ

Баланюк Ю.В. Методи удосконалення телевізійного сканувального мікроскопа з освітленням досліджуваних мікрооб'єктів в ультрафіолетовому діапазоні. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.17 «Радіотехнічні та телевізійні системи» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2017.

Важливе місце серед мікроскопів займають телевізійні сканувальні мікроскопи (ТСМ), які використовують принцип послідовного у часі передавання інформації про елементи зображення через сканування досліджуваного об'єкта (ДО) світловим зондом. Запропоновано розширити можливості ТСМ, використавши електронно-променеву трубку (ЕПТ) з ультрафіолетовим свіченням екрана. Такий мікроскоп дозволить перевищити класичну дифракційну межу роздільної здатності, і буде з успіхом функціонувати замість багатьох модифікацій мікроскопів. Він може забезпечувати: прямий та інвертований режими роботи мікроскопа; роботу в режимі світла, що проходить, та відбитого світла; роботу в режимі темного поля та режимі наведеної люмінесценції.

У дисертації представлено дослідження та проведено розроблення методів удосконалення ТСМ з освітленням досліджуваних мікрооб'єктів в ультрафіолетовому діапазоні. Мета дисертаційної роботи полягає у покращенні технічних параметрів ТСМ, які дозволять підвищити якість формованого зображення ДО, збільшити швидкодію формування зображення ДО та розширити функціональні можливості ТСМ за рахунок використання для освітлення ДО в ультрафіолетовому діапазоні спеціалізованої ЕПТ високої роздільної здатності.

Перший розділ роботи містить огляд літературних джерел за темою дисертації в рамках проведення аналізу особливостей побудови ТСМ з використанням ЕПТ високої роздільної здатності. Проаналізовано особливості дослідження мікрооб'єктів в ультрафіолетовому діапазоні освітлення. Встановлено особливості застосування ЕПТ для освітлення ДО в ТСМ. Визначено основні вимоги до перетворювача світло-сигнал у ТСМ.

Другий розділ роботи присвячено дослідженню особливостей забезпечення основних параметрів ТСМ. Проаналізовано шляхи забезпечення стійкості перетворювачів напруга-струм з комплексним навантаженням, основним завданням якого є прецизійне формування струму в індуктивному навантаженні відповідно до вхідного сигналу розгортки сканувального елемента. Визначено граничну швидкість переміщення сканувального елемента в ТСМ, яка впливає на роздільну здатність за рахунок наявності часу післясвічення люмінофора використовуваної ЕПТ. Запропоновано методи підвищення швидкодії ТСМ за рахунок врахування часу перехідного процесу встановлення сканувального елемента в активному режимі роботи ТСМ. Розглянуто особливості роботи перетворювача напруга-струм в режимі малого та великого сигналу. Визначено глибину різкості зображення ДО в ТСМ та вплив неточності наведення на різкість об'єктива на розфокусування зображення.

У третьому розділі дисертації розроблено методи покращення технічних параметрів ТСМ. Запропоновано метод визначення необхідної яскравості свічення ЕПТ для забезпечення заданого відношення сигнал/шум на виході формувача відеосигналу. Проаналізовано можливості роботи ТСМ в реальному масштабі часу. Розроблено метод масштабування зображення ДО при збереженні роздільної здатності формованого зображення. Проаналізовано методи покращення якості зображення ДО за рахунок підвищення відношення сигнал/шум.

В четвертому розділі роботи досліджено шляхи практичної реалізації ТСМ з метою розширення його функціональних можливостей. Запропоновано

реалізацію ТСМ з відтворенням вторинної фотолюмінесценції ДО в умовних кольорах. Розроблено структурну схему ТСМ для дослідження біологічних та медичних мікрооб'єктів з малим контрастом. Розроблено метод формування зображення рухомого ДО в центральній частині екрана монітора при його переміщенні по всій площині зору ТСМ та визначення його швидкості руху та прискорення. Досліджено шляхи створення ТСМ для кріомедицини з метою дослідження процесів надшвидкого охолодження ДО.

У роботі вперше розроблено метод визначення динамічних параметрів ДО при застосуванні сканувальних растрів різних розмірів, що дозволяє скоротити тривалість вимірювань і розширити діапазон вимірюваних параметрів ДО при збереженні точності вимірювання; вперше розроблено метод формування зображення рухомого ДО в центральній частині екрана монітора при довільному його русі в площині об'єкта; удосконалено метод визначення необхідної яскравості свічення ЕПТ з метою отримання заданого відношення сигнал/шум на виході ТСМ; удосконалено метод визначення граничної швидкості переміщення світної плями на екрані ЕПТ високої роздільної здатності в ТСМ; набув подальшого розвитку метод визначення глибини різкості зображення ДО в ТСМ.

Проаналізовано переваги та недоліки ТСМ з освітленням досліджуваних мікрооб'єктів ЕПТ надвисокої роздільної здатності. Проведено порівняльний аналіз ТСМ з оптичними, камерними телевізійними та лазерними мікроскопами. Серед основних переваг відзначено: зручність спостереження об'єкта на екрані телевізійного монітора; вищу просторову роздільну здатність; відсутність дифракційних контурних повторень на зображенні; точкове освітлення ДО (і тому менш загрозливе з точки зору руйнування об'єкта); можливість гнучкого вибору режиму освітлення об'єкта з метою зміни контрасту без використання комп'ютерної обробки; можливість зміни масштабу зображення без втрати роздільної здатності; можливість використання оптичного променя для вибіркового впливу на об'єкт. До недоліків віднесено: необхідність застосування високостабільних джерел

керування і живлення сканувальної ЕПТ; відносно невелику інтенсивність сканувального оптичного променя; обмеження стосовно швидкості сканування, обумовлені післясвіченням люмінофора екрана; наявність відносно значного шуму порошкового екрана сканувальної ЕПТ.

Запропоновано метод забезпечення стійкості ПНС за рахунок шунтування індуктивного навантаження резистором. Розроблено методику розрахунку оптимального опору резистора шунтування. Досліджено пасивний та активний режим роботи ТСМ. Суть пасивного режиму роботи ТСМ полягає в тому, що код наступної координати елемента освітлювального растра видається через час, який перевищує суму тривалості перехідного процесу встановлення струму в навантаженні при його максимальній зміні та тривалості імпульсу підсвічування. Суть активного режиму роботи ТСМ полягає в тому, що код наступної координати елемента освітлювального растра видається через час, який визначається тривалістю перехідного процесу встановлення, після чого надходить імпульс готовності, який формується після закінчення імпульсу підсвічування. Запропоновано дві структурні схеми ПНС, які забезпечують активний режим роботи ТСМ.

Оцінено вплив часу післясвічення люмінофора на апертуру світної плями залежно від швидкості сканування. На основі отриманих співвідношень визначено вплив інерційності загасання люмінофора та швидкості сканування на роздільну здатність ТСМ. Виведено аналітичні вирази для визначення глибини різкості ДО та впливу неточності наведення об'єктива на різкість на розфокусування елемента ДО на екрані монітора.

Розроблено метод та оцінено мінімальну величину яскравості свічення елемента сканувальної ЕПТ, необхідну для забезпечення заданого відношення сигнал-шум на вході формувача сигналу. Виведено аналітичний вираз, який дозволяє визначити відношення сигнал/шум на виході формувача відеосигналу при роботі ТСМ в малокадровому режимі. Запропоновано структурну схему ТСМ з масштабуванням зображення ДО при збереженні роздільної здатності формованого зображення, яка розширює його функціональні можливості.

Запропонований ТСМ працює як в телевізійному стандарті, так і в дискретному режимі формування сканувального растра та неповноформатного растра при масштабуванні зображення ДО. Масштабування зображення здійснюється внаслідок зміни розмірів сканувального растра цифровим або аналоговим способом. Показано, що при використанні ЕПТ високої роздільної здатності можна отримати збільшення зображення фрагмента досліджуваного об'єкта у 7 разів, без погіршення якості зображення.

Встановлено, що наявність структурних шумів екрана ЕПТ призводить до появи похибок при формуванні відеосигналу на виході ФЕП. Ці шуми мають суттєвий вплив для визначення питомої густини зображення (робота ТСМ на просвічування). Розроблено структурну схему ТСМ, який реалізує метод компенсації шумів люмінофора ЕПТ. В такому ТСМ отримано сигнал, пропорційний до коефіцієнта пропускання або коефіцієнта відбивання досліджуваного об'єкта ДО без шумів люмінофора застосовуваної ЕПТ.

Розроблено структурну схему ТСМ, який реалізує метод утримання зображення динамічного МО в центральній зоні монітора. В такому режимі ТСМ розмір мінірастра є значно меншим розміру повноформатного растра ($\leq 10\%$ від розміру повноформатного растра). Центр першого формованого мінірастра співпадає з центром ДО при першому повноформатному скануванні, а центр кожного наступного мінірастра співпадає з центром ДО при його попередньому скануванні. Тоді, ТСМ з одного боку, підтримує зображення збільшеного фрагмента ДО в центральній зоні монітора, а з іншого – обмежує спостереження ДО моментом, коли ДО досягає краю повноформатного растра.

Розроблено структурну схему ТСМ, який реалізує метод визначення прискорення руху динамічних ДО, що рухаються нерівномірно та з довільною траєкторією. ТСМ забезпечує вимірювання координат їх двох послідовних у часі положень у полі зору мікроскопа з метою визначення швидкості руху ДО та наступного визначення прискорення їх руху (за наявності двох послідовних у часі значень швидкості руху ДО).

Розроблено структурну схему ТСМ, який забезпечує дослідження об'єкта в процесі їх надшвидкого охолодження в галузях кріомедицини та кріобіології. В такому ТСМ режим роботи блока лазера вибирають так, щоб потужність його випромінювання забезпечувала температуру вибраного фрагмента рівною початковій температурі охолодження всього ДО незалежно від температури його подальшого охолодження. Після досягнення заданої температури ДО формується сигнал, який вимикає лазер. Як результат, температура фрагмента ДО різко знижується від її початкового значення до температури блока охолодження зі швидкістю, обумовленою теплотехнічними параметрами ДО, тобто відбувається надшвидке охолодження фрагмента. Процес надшвидкого охолодження фрагмента досліджуваного об'єкта ДО можна спостерігати на екрані телевізійного монітора ТСМ.

Ключові слова: телевізійний сканувальний мікроскоп, електронно-променева трубка, мікрооб'єкт, ультрафіолетовий діапазон, швидкодія, малокадровий режим, шум люмінофору, масштабування зображення.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Баланюк Ю. Сканувальний телевізійний оптичний ультрафіолетовий мікроскоп для дослідження біологічних мікрооб'єктів / Юрій Баланюк, Анатолій Педан, Володимир Шклярський // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. – 2009. – № 645. – С. 243–252. (Google Scholar).

2. Баланюк Ю. Особливості визначення прискорення руху різних динамічних мікрооб'єктів телевізійним сканувальним оптичним мікроскопом / Юрій Баланюк, Юрій Матієшин, Володимир Василюк // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. – 2012. – № 738. – С. 245–253. (Google Scholar).

3. Balanyuk Y. Scanning television optical microscope for diagnostics of microobjects in medicine / Y. Balanyuk, Y. Matiieshyn, I. Prudyus, V. Shkliarskyi, A. Pedan, V. Vasylyuk // *Diagnostyka (Діагностика)*. – 2013. – Vol. 14, № 3. – P. 41–44. (Scopus, Google Scholar).

4. Баланюк Ю. Точність визначення параметрів двох динамічних мікрооб'єктів за допомогою телевізійного сканувального оптичного мікроскопа / Юрій Баланюк, Юрій Матієшин, Володимир Шклярський, Борис Гудзь // *Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”*. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. – 2013. – № 766. – С. 58–64. (Google Scholar).

5. Баланюк Ю. Забезпечення стійкості перетворювачів напруга-струм з комплексним навантаженням / Юрій Баланюк, Володимир Василюк, Володимир Шклярський // *Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”*. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. – 2014. – № 796. – С. 43–48. (Index Copernicus, Google Scholar).

6. Balanyuk Y. Interactive Operation of Scanning Television Optical Microscope / Y. Balanyuk, V. Shkliarskyi, V. Vasylyuk, B. Hudz // *Computational Problems of Electrical Engineering*. – Lviv Polytechnic National University. – 2014. – Vol. 4, № 2. – P. 69–76. (Google Scholar, Ulrich's Web, Index Copernicus).

7. Balanyuk Y. Error analysis of current formed by precision voltage-current converter loaded by inductance / Y. Balanyuk, V. Vasylyuk, V. Shkliarskyi // *Measurement Automation Monitoring (MAM)*. – 2015. – Vol. 61, № 8. – P. 403-405. (IEE Inspec, Ulrich's Web, Index Copernicus, Google Scholar, Baztech, Arianta, Lista czasopism punktowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego).

8. Баланюк Ю. Розширення функціональних можливостей телевізійного сканувального оптичного мікроскопа при дослідженні мікрооб'єктів / Юрій Баланюк, Володимир Шклярський, Юрій Матієшин, Роман Янкевич // *Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”*. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. – 2016. – № 849. – С. 91–98. (Index Copernicus, Google Scholar).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Balanjuk Yu. Uv illumination scanning optical microscope / Yu. Balanjuk // Electronic and Telecommunications Conference of Students and Young Scientific Workers SECON-2007 : proceed. of the VIII intern. conf., 7-8 November 2007, Warsaw, Poland. – Warsaw, 2007. – P. 10.

10. Balanjuk Yuriy. Scanning optical microscope on base CRT with a ultraviolet luminescence of the screen / Yuriy Balanjuk, Anatoliy Pedan, Ivan Prudyus, Volodimir Shkljarskyi // Modern Problem of Radio Engineering Telecommunications and Computers Science: proceedings of the International Conference TCST'2008, 19-23 February 2008, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2008. – P. 246–247. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar).

11. БАЛАНЮК Ю. Сканувальна мікроскопія / Ю. БАЛАНЮК // Computer Science & Engineering CSE-2009 : proceed. 3-rd Int. Conf. of young scientists, 14 – 16 May 2009 Lviv, Ukraine. – Lviv, 2009. – P. 289–292. (Google Scholar).

12. Balanjuk Y. V. Correcting of Non-uniformity of Brightness of the Image in a Scanning Microscope / Y. V. Balanjuk, V. M. Goj, G. O. Turkinov, V. I. Shkliarskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : proceedings of X Int. Conf., 23-27 February 2010, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2010. – P. 102. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar).

13. Balanjuk Y. V. Correcting of Non-uniformity of Brightness of the Image in a Scanning Microscope [Electronic source] /Y. V. Balanjuk, V. M. Goj, G. O. Turkinov, V.I. Shkliarskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : results of the X-th International Conference, 23-27 February 2010, Lviv-Slavske, Ukraine, 2010. – Electron. dat. (32 Mb). – Lviv : NU“LP”, 2010. – 1 electron. opt. disc (CD-ROM). – Title from the disc label.

14. Balanjuk Y. V. Scanning Television Optical Microscope for Research of Biological Microobjects / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, V. I. Shkliarskyi,

B. I. Lubinecka, A. D. Pedan, I. N. Prudyus, G. O. Turkinov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : proceedings of X Int. Conf., 23-27 February 2010, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2010. – P. 18. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar).

15. Scanning Television Optical Microscope for Research of Biological Microobjects [Electronic source] / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, V. I. Shkliarskyi, B. I. Lubinecka, A. D. Pedan, I. N. Prudyus, G. O. Turkinov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : results of the X-th International Conference, 23-27 February 2010, Lviv-Slavske Ukraine, 2010. – Electron. dat. (32 Mb). – Lviv : NU“LP”, 2010. – 1 electron. opt. disk (CD-ROM). – Title from the disc label.

16. Баланюк Ю. В. Сканувальний телевізійний оптичний мікроскоп високої роздільної здатності / Ю. В. Баланюк [та ін.] // Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку МРФ-2011 : матеріали IV міжнар. радіоелектр. форуму, 18-21 жовтня 2011 р., Харків, Україна / Харківський національний університет радіоелектроніки. – Харків, 2011. – С. 16–19.

17. Balanjuk Y. V. Scanning Television Optical Microscope With Illumination of Microobject in a Ultra-Violet Range / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, A. D. Pedan // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2012 : proceedings of XI Int. Conf., 21-24 February 2012, Lviv-Slavske Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2012. – P. 113. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar).

18. Balanyuk Y. Scanning television optical microscope for diagnostics of microobjects in medicine / Y. Balanyuk, I. Prudyus, V. Shkliarskyi, Y. Matiieshyn, A. Pedan, V. Vasylyuk // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów DIAG'2013 : materiały VIII Krajowa Konf., 3-7 June 2013, Ustroń, Poland / Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych. – Ustroń, 2013. – P. 89.

19. Balanjuk Y. V. Methods of Correction of Distortions Luminous Raster Cathode Ray Tube / Y. V. Balanjuk, V. I. Shkliarskyi, B. I. Lubinecka, T. Smarkutskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2014 : proceedings of XII Int. Conf., 25 February – 1 March 2014, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, – 2014. – P. 293–295. (Google Scholar).

20. Balanjuk Y. Definition of formation of errors current in inductive load precision voltage converter-current / Y. Balanyuk, V. Shkliarskyi, V. Vasylyuk // Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK'2014 : Streszczenia referatów X Szkoła-Konf., 27-30 Maja 2014, Waplewo, Polska / Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, Wojskowe Centrum Metrologii Ministerstwa Obrony Narodowej. – Waplewo, 2014. – P. 167.

21. Balanjuk Y. V. Algorithms of television scanning optical microscope in determining the parameters of dynamic microobjects / Y. V. Balanjuk, V. I. Shkliarskyi, Y. M. Matiieshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2016 : proceedings of XIII Int. Conf., 23-26 February 2016 Lviv-Slavske (Ukraine) / Lviv Polytechnic National University [etc.]. – Lviv-Slavske, 2016. – P. 321–325. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar).

22. Баланюк Ю. В. Сканувальний стереотелевізійний оптичний мікроскоп для дослідження мікрооб'єктів / Ю. В. Баланюк, В.І. Шклярський, Р.З. Матвіїв, А.В. Регуш // Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо'2016 /UkrMiCo'2016) : зб. мат. наук.-техн. конф., 11-15 вересня 2016 / Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова [та ін.]. – Київ, 2016. – С.184– 191.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

23. Пат. 75989 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп / В.І. Шклярський, Ю.М. Матієшин, Ю.В. Баланюк, В. Я. Василюк ; власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201205135 ; заявл. 25.04.2012 ; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24. – 8 с.

24. Пат. 75990 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп / Ю.М. Матієшин, В.І. Шклярський, Ю.В. Баланюк, В. Я. Василюк; власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201205137 ; заявл. 25.04.2012 ; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24. – 8 с.

25. Пат. 103133 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Сканувальний телевізійний оптичний мікроскоп / Ю. В. Баланюк, Ю.М. Матієшин, А.Д. Педан, В.І. Шклярський ; власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201503699 ; заявл. 20.04.2015 ; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23. – 8 с.

26. Пат. 103134 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Сканувальний телевізійний оптичний мікроскоп / Ю.В. Баланюк, Б.В. Гудзь, В. І. Шклярський; власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201503700 ; заявл. 20.04.2015 ; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23. – 8 с.

ABSTRACT

Balanyuk Yu.V. Methods of improvement of a television scanning microscope with illumination of micro objects being studied in the ultraviolet range. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis submitted for fulfillment of candidate (Ph.D.) degree in technical sciences on specialty 05.12.17 «Radio Engineering and Television Systems» (172 – Telecommunications and Radio Engineering). – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

Prominent among microscopes occupy the Television Scanning Microscopes (TSM) using the principle of sequential time transmission of information via picture elements by the scanning of investigated object (IO) by light probe. Proposed to expand opportunities of TSM using cathode-ray tube (CRT) with ultraviolet luminosity of the screen. This microscope will exceed the classical diffraction limit of resolution, and will successfully operate instead many modifications of the microscopes. It can provide: direct and reverse modes of microscope; work in passing light and reflected light modes; work in the dark field mode and induced luminescence mode.

In the thesis are presented research and conducted development of the methods for improving of TSM with lighting of investigated microobjects in the ultraviolet range. The aim of the thesis is to improve the technical parameters of TSM, that will improve the quality of the formed image of IO, to increase fast action of the image of IO forming and to extend the functionality of TSM through the use for lighting of IO in the ultraviolet range of specialized high-resolution CRT.

The first section provides an overview of the literature on the topic of the thesis as part of the analysis features of TSM construction using high resolution CRT. The features of microobjects research in ultraviolet light are analyzed. The peculiarities of the use of CRT for lighting of IO in TSM are established. The basic requirements for light-signal converter in TSM are determined.

The second section is devoted to research of features providing the basic parameters of TSM. The ways providing the stability of the voltage-current converters with integrated load, whose main task is the precision formation of current in the inductive load according to the input signal of sweep of the scanning element, are analyzed. Determined a limit speed of movement of scanning element in TSM, which affects the resolution due to the availability afterglow time of luminophore used in CRT. Methods of TSM fast action improving by taking into account the time of transitional process of scanning element setting in active mode of TSM. Considered the features of voltage-current converter mode of small and large signal.

Determined the depth of field in an image of TSM and the impact of inaccuracies guidance on the sharpness of an objective for defocusing the image.

In the third section of the thesis the methods of improving the technical parameters of TSM been developed. The method for determination the required brightness of the glow of CRT to provide a given signal/noise ratio on the video signal shaper output is proposed. Possibilities of TSM work in real time are analyzed. The method of the image of IO scaling while maintaining the resolution of the formed image is developed. The methods of image quality improving by increasing the signal/noise ratio are analyzed.

In the fourth section of the thesis ways of practical implementation of TSM to expand its functionality are investigated. A TSM implementation with reproducing secondary photoluminescence of IO in conditional colors is proposed. The block diagram of TSM for investigation of biological and medical microobjects with low contrast is developed. A method of forming an image of a moving IO in a central area of the monitor screen when IO moving across the plane of view of TSM and determine its velocity and acceleration. The ways of creating of TSM for cryomedicine to investigate processes of ultrafast cooling of IO are researched.

In the thesis for the first time is developed the method for determining the dynamic parameters of IO when scanning rasters of various sizes are used, which makes it possible to shorten the measurement time and to expand the range of the measured parameters of IO while maintaining the measurement accuracy; for the first time is developed the method of forming an image of a moving IO in the central area of the monitor screen for arbitrary movement of IO in its plane; improved the method of determining the required brightness of the CRT glow to obtain a given signal/noise ratio at the output of TSM; improved the method for determining the limit speed of moving a luminous spot on a screen of a high resolution CRT in a television scanning microscope; was developed the method of determining the depth of field of the IO image in TSM.

Advantages and disadvantages of TSM with lighting of investigated microobjects by ultra high-resolution CRT are analyzed. A comparative analysis of

TSM with optical, chamber television and laser microscopes is conducted. Among the main advantages are noted: convenience of observation of the object on the screen of the television monitor; higher spatial resolution; no diffraction contour repetitions on image; spot light of IO (and therefore less threatening from the standpoint of the destruction of the object); flexibility lighting mode selection facility to change the contrast without computer processing; the possibility of image scaling without loss of resolution; the possibility of using an optical beam to selectively influence on the object. The disadvantages include: necessity of application of highly stable sources of control and power of scanning CRT; relatively low intensity of the scanning optical beam; restrictions on scanning speed due to afterglow of screen luminophore; the presence of relatively large noise of scanning CRT powder screen.

The method of providing sustainability of VCC by shunting inductive load with resistor is proposed. The method of calculating the optimal shunting resistor is developed. Passive and active modes of TSM are researched. The essence of the passive mode of TSM is that the code following coordinate of lighting raster element issued through time which exceeds the duration of the transition process of current installation in the load at its maximum change and duration of illumination pulse. The essence of the active mode of TSM is that the code following coordinate of lighting raster element issued through time determined by the duration of the transition process installation, then goes readiness impulse, which is formed after the illumination pulse. A two block diagrams of VCC providing an active mode of TSM are proposed.

The influence of afterglow time of luminophore on the aperture of luminous spot depending on the scanning speed is estimated. Based on the ratios defined the influence of damping inertia of luminophore and scanning speed at a resolution of TSM. Analytical expressions to determine the depth of field of IO and the impact of inaccurate guidance lens focusing to defocusing of IO element on the monitor screen are derived.

Developed the method and the estimated minimum value of the brightness of the glow element of scanning CRT required to ensure a given signal/noise ratio at the

input of signal generator. Analytical expression that allows determining signal/noise ratio on the output of video signal generator when TSM is working in little frame mode is derived. A block diagram of the TSM with image of IO scaling while preserving resolution of image formed, which extends its functionality is proposed. The proposed TSM operates as a standard television, and in discrete mode of scanning raster and not full format raster formations while the image of IO scaling. Scaling an image is performed because resizing of scanning raster by digital or analog way. It is shown that the use of high resolution CRT can increase zoom of investigated object fragment in 7 times without reducing of image quality.

It was established that the presence of structural noises of CRT screen leads to errors in the formation of video signal of PMT output. These noises have a significant impact on determining the specific density of image (TSM work on translucence). The block diagram of TSM, which implements the method of noise compensation of CRT luminophore is developed. In such TSM is obtained signal proportional to transmittance coefficient or reflection coefficient of the investigated object IO without noises of applied CRT luminophore.

The block diagram of TSM, which implements the method of an image of dynamic MO retention in the central area of the monitor, is developed. In such a mode of TSM size of the miniraster is much smaller the size of full format raster ($\leq 10\%$ the size of full format raster). The center of first formed miniraster coincides with the center of IO while first full format scanning and the center of each subsequent miniraster coincide with the center of IO at his previous scan. Then TSM on the one hand, supports image of increased fragment of IO in the central area of the monitor, and the other – limits the observation of IO to the moment when reaching the edge of full format raster.

The block diagram of TSM, which implements the method for determining the acceleration of motion of dynamic IO moving unevenly and with an arbitrary trajectory, is developed. TSM provides a measurement of the coordinates of two consecutive in time positions in the field of view of the microscope to determine the

velocity of IO and subsequent accelerate of their motion determination (if two consecutive in time velocity values available).

The block diagram of TSM, which provides research of microobject in the process of its ultrafast cooling in areas cryomedicine and cryobiology, is developed. In such TSM mode of laser unit select such power of its radiation to provide temperature of the selected area equal to the initial temperature of whole IO cooled regardless of the temperature further cooling. After reaching the set temperature of IO is forming a signal that turns off the laser. As a result, the temperature of IO fragment sharply reduced from its initial value to the temperature of the cooling unit at a speed determined by thermo-technical parameters of IO that is going ultrafast cooling of fragment. The process of ultrafast cooling of investigated object IO fragment may be observed on the screen of the television monitor of TSM.

Keywords: Television Scanning Microscope, Cathode Ray Tube, Microobject, Ultraviolet Range, Fast Action, Little Frame Mode, Noise of the Luminophore, Image Scaling.

List of publications of the applicant

Scientific works major scientific results of the thesis are published at:

1. Balanyuk Yu. Scanning television optical ultraviolet microscope for the biological microobjects study / Yuriy Balanyuk, Anatoliy Pedan, Volodymyr Shkliarskyi // Visn. Nat. Univ. "Lviv Polytechnic". Series: Radio Electronics and Telecommunications: coll. of science works. – 2009. – № 645. – P. 243–252. (Google Scholar). – (In Ukrainian).

2. Balanyuk Yu. Features of various dynamic microobjects acceleration of movement determination by the television scanning optical microscope / Yuriy Balanyuk, Yuriy Matiieshyn, Volodymyr Vasylyuk // Visn. Nat. Univ. "Lviv Polytechnic". Series: Radio Electronics and Telecommunications: coll. of science works. – 2012. – № 738. – P. 245–253. (Google Scholar). – (In Ukrainian).

3. Balanyuk Y. Scanning television optical microscope for diagnostics of microobjects in medicine / Y. Balanyuk, Y. Matiieshyn, I. Prudyus, V. Shkliarskyi,

A. Pedan, V. Vasylyuk // *Diagnostics*. – 2013. – Vol. 14, № 3. – P. 41–44. (Scopus, Google Scholar). – (In English).

4. Balanyuk Yu. The accuracy of two dynamic microobjects parameters determination using the television scanning optical microscope / Yuriy Balanyuk, Yuriy Matiieshyn, Volodymyr Shkliarskyi, Borys Hudz // *Visn. Nat. Univ. "Lviv Polytechnic"*. Series: Radio Electronics and Telecommunications: coll. of science works. – 2013. – № 766. – P. 58–64. (Google Scholar). – (In Ukrainian).

5. Balanyuk Yu. Ensuring the sustainability of the current-voltage converters with integrated load / Yuriy Balanyuk, Volodymyr Vasylyuk, Volodymyr Shkliarskyi // *Visn. Nat. Univ. "Lviv Polytechnic"*. Series: Radio Electronics and Telecommunications: coll. of science works. – 2014. – № 796. – P. 43–48. (Index Copernicus, Google Scholar). – (In Ukrainian).

6. Balanyuk Y. Interactive Operation of Scanning Television Optical Microscope / Y. Balanyuk, V. Shkliarskyi, V. Vasylyuk, B. Hudz // *Computational Problems of Electrical Engineering*. – Lviv Polytechnic National University. – 2014. – Vol. 4, № 2. – P. 69–76. (Google Scholar, Ulrich's Web, Index Copernicus). – (In English).

7. Balanyuk Y. Error analysis of current formed by precision voltage-current converter loaded by inductance / Y. Balanyuk, V. Vasylyuk, V. Shkliarskyi // *Measurement Automation Monitoring (MAM)*. – 2015. – Vol. 61, № 8. – P. 403-405. (IEE Inspec, Ulrich's Web, Index Copernicus, Google Scholar, Baztech, Arianta, A list of journals scored by the Ministry of Science and Higher Education). – (In English).

8. Balanyuk Yu. Expansion of functional capabilities of television scanning optical microscope in the study of microobjects / Yuriy Balanyuk, Volodymyr Shkliarskyi, Yuriy Matiieshyn, Roman Yankevych // *Visn. Nat. Univ. "Lviv Polytechnic"*. Series: Radio Electronics and Telecommunications: coll. of science works. – 2016. – № 849. – P. 91–98. (Index Copernicus, Google Scholar). – (In Ukrainian).

Scientific works certifying approbation of the thesis material:

9. Balanjuk Yu. UV illumination scanning optical microscope / Yu. Balanjuk // Electronic and Telecommunications Conference of Students and Young Scientific Workers SECON-2007 : proceed. of the VIII intern. conf., 7-8 November 2007, Warsaw, Poland. – Warsaw, 2007. – P. 10. – (In English).

10. Balanjuk Yuriy. Scanning optical microscope on base CRT with a ultraviolet luminescence of the screen / Yuriy Balanjuk, Anatoliy Pedan, Ivan Prudyus, Volodimir Shkljarskyi // Modern Problem of Radio Engineering Telecommunications and Computers Science: proceedings of the International Conference TCST'2008, 19-23 February 2008, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2008. – P. 246–247. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar). – (In English).

11. Balanyuk Yu. Scanning Microscopy / Yu. Balanyuk // Computer Science & Engineering CSE-2009 : proceed. 3-rd Int. Conf. of young scientists, 14-16 May 2009 Lviv, Ukraine. – Lviv, 2009. – P. 289–292. (Google Scholar). – (In Ukrainian).

12. Balanjuk Y. V. Correcting of Non-uniformity of Brightness of the Image in a Scanning Microscope / Y. V. Balanjuk, V. M. Goj, G. O. Turkinov, V. I. Shkliarskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : proceedings of X Int. Conf., 23-27 February 2010, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2010. – P. 102. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar). – (In English).

13. Balanjuk Y. V. Correcting of Non-uniformity of Brightness of the Image in a Scanning Microscope [Electronic source] / Y. V. Balanjuk, V. M. Goj, G. O. Turkinov, V. I. Shkliarskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : results of the X-th International Conference, 23-27 February 2010, Lviv-Slavske, Ukraine, 2010. – Electron. dat. (32 Mb). – Lviv : NU“LP”, 2010. – 1 electron. opt. disc (CD-ROM). – Title from the disc label. – (In English).

14. Balanjuk Y. V. Scanning Television Optical Microscope for Research of Biological Microobjects / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, V. I. Shkliarskyi,

B. I. Lubinecka, A. D. Pedan, I. N. Prudyus, G. O. Turkinov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : proceedings of X Int. Conf., 23-27 February 2010, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2010. – P. 18. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar). – (In English).

15. Scanning Television Optical Microscope for Research of Biological Microobjects [Electronic source] / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, V. I. Shkliarskyi, B. I. Lubinecka, A. D. Pedan, I. N. Prudyus, G. O. Turkinov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : results of the X-th International Conference, 23-27 February 2010, Lviv-Slavske Ukraine, 2010. – Electron. dat. (32 Mb). – Lviv : NU“LP”, 2010. – 1 electron. opt. disk (CD-ROM). – Title from the disc label. – (In English).

16. Balanyuk Yu. V. Scanning television optical microscope of high resolution / Yu. V. Balanyuk [et al.] // Applied Radio Electronics. Status and development prospects IREF-2011 : proceedings of IV Intern. Radio Electr. Forum, 18-21 October 2011 y., Kharkiv, Ukraine / Kharkiv National University of Radio Electronics. – Kharkiv, 2011. – P. 16–19. – (In Ukrainian).

17. Balanjuk Y. V. Scanning Television Optical Microscope With Illumination of Microobject in a Ultra-Violet Range / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, A. D. Pedan // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2012 : proceedings of XI Int. Conf., 21-24 February 2012, Lviv-Slavske Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2012. – P. 113. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar). – (In English).

18. Balanyuk Y. Scanning television optical microscope for diagnostics of microobjects in medicine / Y. Balanyuk, I. Prudyus, V. Shkliarskyi, Y. Matiieshyn, A. Pedan, V. Vasylyuk // Technical diagnostics of equipment and systems DIAG'2013: materials VIII National Conference, 3-7 June 2013, Ustroń, Poland / Military Academy of Technology, Faculty of Electronics, Institute of Electronic Systems. – Ustroń, 2013. – P. 89. – (In English).

19. Balanjuk Y. V. Methods of Correction of Distortions Luminous Raster Cathode Ray Tube / Y. V. Balanjuk, V. I. Shkliarskyi, B. I. Lubinecka, T. Smarkutskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2014 : proceedings of XII Int. Conf., 25 February – 1 March 2014, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, – 2014. – P. 293–295. (Google Scholar). – (In English).

20. Balanjuk Y. Definition of formation of errors current in inductive load precision voltage converter-current / Y. Balanyuk, V. Shkliarskyi, V. Vasylyuk // Computer-aided Metrology CAM'2014 : Abstracts of papers X School-Conf., 27-30 May 2014, Waplewo, Poland / Faculty of Electronics of Military Academy of Technology, Military Metrology Center of Ministry of National Defence. – Waplewo, 2014. – P. 167. – (In English).

21. Balanjuk Y. V. Algorithms of television scanning optical microscope in determining the parameters of dynamic microobjects / Y. V. Balanjuk, V. I. Shkliarskyi, Y. M. Matiieshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2016 : proceedings of XIII Int. Conf., 23-26 February 2016 Lviv-Slavske (Ukraine) / Lviv Polytechnic National University [etc.]. – Lviv-Slavske, 2016. – P. 321–325. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar). – (In English).

22. Balanyuk Yu. V. Scanning stereo television optical microscope for research of the microobjects / Yu. V. Balanyuk, V. I. Shkliarskyi, R.Z. Matviyiv, A.V. Rehush // International conference of information-telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2016) : coll. of mat. scient. and tech. konf., 11-15 September 2016 / National Technical University of Ukraine " Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Odessa National Academy of Telecommunications. named O. S. Popov [et al.]. – Kyiv, 2016. – P.184– 191. – (In Ukrainian).

Scientific works that additionally reflect the scientific results of the thesis:

23. Pat. 75989 Ukraine, MPK G06F 3/153, H04N 5/00. Television Scanning Optical Microscope / V. I. Shkliarskyi, Yu. M. Matiieshyn, Yu. V. Balanyuk,

V. J. Vasylyuk; patent owner National University "Lviv Polytechnic". – № u201205135 ; appl. 25.04.2012 ; publ. 25.12.2012, Bull. № 24. – 8 p. – (In Ukrainian).

24. Pat. 75990 Ukraine, MPK G06F 3/153, H04N 5/00. Television Scanning Optical Microscope / Yu. M. Matiieshyn, V. I. Shkliarskyi, Yu. V. Balanyuk, V. J. Vasylyuk; patent owner National University "Lviv Polytechnic". – № u201205137 ; appl. 25.04.2012 ; publ. 25.12.2012, Bull. № 24. – 8 p. – (In Ukrainian).

25. Pat. 103133 Ukraine, MPK G06F 3/153, H04N 5/00. Scanning Television Optical Microscope / Yu. V. Balanyuk, Yu. M. Matiieshyn, A. D. Pedan, V. I. Shkliarskyi; patent owner National University "Lviv Polytechnic". – № u201503699 ; appl. 20.04.2015 ; publ. 10.12.2015, Bull. № 23. – 8 p. – (In Ukrainian).

26. Pat. 103134 Ukraine, MPK G06F 3/153, H04N 5/00. Scanning Television Optical Microscope / Yu. V. Balanyuk, B. V. Hudz, V. I. Shkliarskyi; patent owner National University "Lviv Polytechnic". – № u201503700 ; appl. 20.04.2015 ; publ. 10.12.2015, Bull. № 23. – 8 p. – (In Ukrainian).

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	26
ВСТУП	27
РОЗДІЛ 1. ТЕЛЕВІЗІЙНІ СКАНУВАЛЬНІ МІКРОСКОПИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОБ'ЄКТІВ В БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ	33
1.1. Телевізійний сканувальний мікроскоп, як засіб дослідження мікрооб'єктів	33
1.2. Особливості дослідження мікрооб'єктів в ультрафіолетовому діапазоні освітлення	41
1.3. Електронно-променева трубка високої роздільної здатності з ультрафіолетовим свіченням екрану, як джерело освітлення досліджуваного мікрооб'єкта в телевізійному сканувальному мікроскопі	49
1.4. Визначення вимог до перетворювача світло-сигнал в телевізійному сканувальному мікроскопі	58
Висновки до розділу 1	64
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СКАНУВАЛЬНОГО МІКРОСКОПА	66
2.1. Забезпечення стійкості перетворювачів напруга-струм з комплексним навантаженням	66
2.2. Гранична швидкість переміщення сканувального елемента в телевізійному сканувальному мікроскопі	73
2.3. Особливості роботи перетворювача напруга-струм	86
2.4. Пасивний та активний режим роботи телевізійного сканувального мікроскопа	93
2.5. Функціональна схема телевізійного сканувального мікроскопа з повним урахуванням тривалості перехідного процесу в активному режимі роботи	95
2.6. Глибина різкості зображення досліджуваного мікрооб'єкта в	

телевізійному сканувальному мікроскопі	98
Висновки до розділу 2	113
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СКАНУВАЛЬНОГО МІКРОСКОПА	114
3.1. Визначення вимог до сканувальної електронно-променевої трубки, придатної до використання в ультрафіолетовій мікроскопії	114
3.2. Визначення вимог до оптичного каналу сканувального телевізійного оптичного мікроскопа	121
3.3. Аналіз можливості роботи сканувального телевізійного мікроскопа в реальному масштабі часу	125
3.4. Метод масштабування зображення досліджуваного об'єкта при збереженні роздільної здатності формованого зображення	127
3.5. Розроблення та дослідження методів покращення якості зображення за рахунок підвищення відношення сигнал/шум ...	136
Висновки до розділу 3	145
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СКАНУВАЛЬНОГО МІКРОСКОПА	147
4.1. Телевізійний сканувальний мікроскоп з дослідженням мікрооб'єкта в ультрафіолетовому діапазоні і відтворенням зображення у видимому спектрі	147
4.2. Телевізійний сканувальний мікроскоп з відтворенням вторинної фотолюмінесценції досліджуваного мікрооб'єкта в умовних кольорах	153
4.3. Телевізійний сканувальний мікроскоп для дослідження біологічних та медичних мікрооб'єктів з малим контрастом ...	160
4.4. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп для відстеження положення центра динамічного мікрооб'єкта	165
4.5. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп для	

визначення прискорення руху досліджуваних мікрооб'єктів ...	171
4.6. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп для дослідження мікрооб'єктів у процесі їх надшвидкого охолодження	176
Висновки до розділу 4	181
ВИСНОВКИ	183
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	186
ДОДАТКИ	200
Додаток А. Акти використання та впровадження результатів дисертаційних досліджень.....	200
Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи	204
Додаток В. Основні технічні параметри фотоелектронних помножувачів	210
Додаток Г.	213
Г.1. Формувач сигналів відхилення	213
Г.2. Перетворювач напруга – струм	219

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВКП	— відеоконтрольний пристрій;
ВП	— відеопідсилювач;
ДО	— досліджуваний об'єкт;
ЕПТ	— електронно-променева трубка;
ЛМ	— люмінесценція;
МК	— монітор комп'ютера;
МО	— мікрооб'єкт;
О	— об'єктив;
ОК	— оптичний канал;
ОМ	— оптичний мікроскоп;
ПК	— персональний комп'ютер;
ПНС	— перетворювач напруга–струм;
СЕ	— сканувальний елемент;
ПЕПТ	— проєкційна електронно-променева трубка;
СЕПТ	— сканувальна електронно-променева трубка;
ТМ	— телевізійний монітор;
ТСМ	— телевізійний сканувальний мікроскоп;
УФ	— ультрафіолет;
УФВ	— ультрафіолетове випромінювання;
ФЕП	— фотоелектронний помножувач;
ФПВ	— формувач повного відеосигналу;
ЦАП	— цифро-аналоговий перетворювач.

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній день у різних галузях науки і техніки виникає потреба дослідження мікрооб'єктів (МО), розміри яких знаходяться в межах 0,3 – 100 мкм. До таких МО відносять мікроорганізми, більшість рослинних і тваринних клітин, дрібні кристали, деталі мікроструктури металів і сплавів тощо. Для спостереження і вивчення таких об'єктів призначені мікроскопи різних типів. Важливе місце серед мікроскопів займають телевізійні сканувальні мікроскопи (ТСМ), які використовують принцип послідовного у часі передавання інформації про елементи зображення через сканування досліджуваного МО світловим зондом. Відомі два типи ТСМ: камерні та сканувальні. Щоразу ширшого застосування набувають ТСМ на базі електронно-променевої трубки (ЕПТ) високої роздільної здатності. Для збільшення можливостей ТСМ використовують ЕПТ з ультрафіолетовим світленням екрана. Такий мікроскоп дозволить перевищити класичну дифракційну межу роздільної здатності, і буде з успіхом функціонувати замість багатьох модифікацій мікроскопів. Він може забезпечувати: прямий та інвертований режими роботи; роботу в режимі прямого та відбитого світла; роботу в режимі темного поля та режимі наведеної люмінесценції.

Детальний теоретичний аналіз сканувальних систем різного призначення і їх технічної реалізації виконано у роботах Г. П. Катиса та В.М. Шкунденкова. Особливості формування сигналів у фотоелектронних сканувальних системах містяться у працях В. Г. Абакумова. Сканувальні пристрої, побудовані на основі ЕПТ високої роздільної здатності, розглянуто в монографіях, виданих під редакцією С. Т. Васькова та З.Д. Грицьківа. Низку теоретичних питань побудови сканувальної і телевізійної мікроскопії та її практичної реалізації розглянуто в монографії Шклярського В.І. За кордоном, у період 2000 – 2014 рр., роботи у напрямку сканувальних систем проводились фірмою Cosmic technologies corporation (США) Однією з найвідоміших фірм з побудови телевізійних камерних мікроскопів є фірма CARL ZEISS (Німеччина).

Сучасний стан розробок, які проводять в Україні, а також врахування здобутку закордонних дослідників у просуванні телевізійних мікроскопів на

ринок свідчить про те, що необхідно збільшити область застосування ТСМ для дослідження МО при освітленні їх в ультрафіолетовому діапазоні з формуванням зображення досліджуваного МО у видимому спектрі. Це дозволить більше використовувати ТСМ у біології, медицині, органічній хімії, мистецтвознавстві, криміналістиці та інших галузях, де важливим є визначення параметрів різних МО, що свідчить про актуальність цієї роботи. Важливо покращити технічні параметри мікроскопів, зокрема, чутливість, роздільну здатність, глибину різкості, інформативність зображення.

Отже, виникає необхідність розв'язання наукового завдання покращення технічних параметрів телевізійного сканувального мікроскопа, що дозволить поліпшити якість формованого зображення досліджуваного об'єкта, збільшити швидкодію формування його зображення та розширити функціональні можливості мікроскопа внаслідок використання в ньому для освітлення досліджуваного об'єкта в ультрафіолетовому діапазоні спеціалізованої електронно-променевої трубки високої роздільної здатності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Завдання, які вирішені у даній дисертаційній роботі, є складовою частиною наукових проектів, що протягом тривалого часу здійснюються на кафедрі радіоелектронних пристроїв та систем Національного університету "Львівська політехніка". Дослідження, висвітлені в дисертаційній роботі, проводили згідно з планом науково-дослідних робіт Національного університету "Львівська політехніка" в рамках держбюджетних робіт: ДБ/ФЛЮОР «Сканувальна телевізійно-оптична ультрафіолетова мікроскопія для дослідження біологічних мікрооб'єктів» (номер держ. реєстрації 0107U000832), ДБ/МІКРОСКОПІЯ «Сканувальна телевізійно-оптична мікроскопія для кріобіології та кріомедицини» (номер держ. реєстрації 0109U001154); ДБ-ЛЮМІНОФОР «Розроблення нанолюмінесцентного скануючого оптичного мікроскопа для дослідження функціонування мікроорганізмів під впливом низьких температур» (номер держ. реєстрації 0111U001227), ДБ/КРІОБ «Розроблення люмінесцентного скануючого оптичного мікроскопа з керованим швидким заморожуванням мікрооб'єкта для досліджень в кріобіології та

нанотехнологіях» (номер держ. реєстрації 0113U001395), де автор приймав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у покращенні технічних параметрів ТСМ, які дозволять підвищити якість формованого зображення ДО, збільшити швидкодію формування зображення ДО та розширити функціональні можливості ТСМ за рахунок використання для освітлення ДО в ультрафіолетовому діапазоні спеціалізованої ЕПТ високої роздільної здатності. Завдання досліджень:

1. Розробити метод формування прецизійного сканувального растра на екрані ЕПТ, розміри та зміщення якого змінюються у широких межах.
2. Визначити необхідну яскравість свічення ЕПТ з метою отримання заданого відношення сигнал/шум на виході формувача відеосигналу.
3. Визначити граничну швидкість переміщення світної плями на екрані ЕПТ високої роздільної здатності в ТСМ.
4. Розробити метод дослідження динамічних МО з метою вимірювання параметрів їх руху та знаходження їх зображення в центральній частині екрана монітора при довільному русі в площині МО.
5. Дослідити можливість підвищення швидкодії роботи ТСМ при використанні діалогового режиму роботи ТСМ з ПК.
6. Розробити структурну схему ТСМ з широкими функціональними можливостями для використання його в кріомедицині.

Об'єктом дослідження є процес формування зображення ДО за допомогою ТСМ на базі ЕПТ високої роздільної здатності з УФ–свіченням екрана.

Предметом дослідження є методи покращення технічних параметрів ТСМ на базі ЕПТ високої роздільної здатності з УФ–свіченням екрана для визначення статичних та динамічних параметрів ДО.

Методи дослідження – при вирішенні поставлених завдань у теоретичних дослідженнях використано основні положення і методи теорії радіотехнічних та телевізійних пристроїв та систем, теорії оптико-електронних приладів та систем, теорії похибок. Експериментальні дослідження проведено з

використанням фізичних та математичних методів за допомогою числового аналізу та комп'ютерного моделювання, з використанням прикладних пакетів Mathcad та MATLAB.

Наукова новизна отриманих результатів:

— вперше розроблено метод визначення динамічних параметрів досліджуваного об'єкта при застосуванні сканувальних растрів різних розмірів (повноформатний растр, мінірастр), що дозволяє скоротити тривалість вимірювань внаслідок зменшення часу формування мінірастра і розширити діапазон вимірюваних параметрів досліджуваного об'єкта при збереженні точності вимірювання;

— вперше розроблено метод формування зображення рухомого досліджуваного об'єкта в центральній частині екрана монітора при довільному його русі в площині об'єкта;

— удосконалено метод визначення необхідної яскравості свічення електронно-променевої трубки з метою отримання заданого відношення сигнал/шум на виході формувача відеосигналу, який, на відміну від відомого методу, враховує шуми електронно-променевої трубки та параметри оптичного каналу.

— удосконалено метод визначення граничної швидкості переміщення світної плями на екрані електронно-променевої трубки високої роздільної здатності в телевізійному сканувальному мікроскопі, який, на відміну від відомого методу, враховує час післясвічення використовуваного люмінофору.

Практичне значення отриманих результатів:

— встановлено вимоги до електронно-променевої трубки з ультрафіолетовим свіченням екрана стосовно її спектра свічення, роздільної здатності, мінімально необхідної яскравості, допустимого шуму люмінофора;

— удосконалено метод сканування досліджуваного об'єкта растрами різних розмірів та різної роздільної здатності, що дозволить формувати фрагменти досліджуваного об'єкта в збільшеному масштабі без втрати роздільної здатності зображення;

— розроблено метод визначення граничної швидкості руху сканувального променя з урахуванням часу післясвічення використовуваної електронно-променевої трубки;

— розроблено метод компенсації шумів люмінофора через виділення світлового потоку від світлого растра, формування електричного сигналу від цього потоку та ділення сигналів від досліджуваного об'єкта на сигнал від світлого растра, що дозволяє покращити відношення сигнал/шум на виході формувача відеосигналу;

— розроблено структурну схему та алгоритм роботи телевізійного сканувального мікроскопа, придатного до використання в кріобіології та кріомедицині для спостереження за надшвидким охолодженням фрагмента досліджуваного об'єкта;

— розроблено структурну схему та алгоритм роботи телевізійного сканувального мікроскопа, придатного для вимірювання швидкості руху та прискорення досліджуваного об'єкта.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в науково-дослідні роботи, виконані у Національному університеті “Львівська політехніка”; науково-дослідну роботу, виконану в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті електронної вимірювальної та обчислювальної техніки НДКІ ЕЛВІТ (м. Львів); госпдоговірній роботі, виконаній на замовлення ТОВ “МЕЛТА” (м. Київ); навчальний процес у Національному університеті “Львівська політехніка” при підготовці спеціалістів напрямку “Радіотехніка”.

Усі результати реалізації підтверджено відповідними актами про впровадження та використання.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні і практичні результати отримано автором самостійно. У роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: у роботах [3, 82, 83, 89] проаналізовано можливість побудови СТМ з використанням для освітлення досліджуваного об'єкта ЕПТ зі свіченням в УФ діапазоні, в роботах [6, 80, 85, 85] досліджено вимоги до точності та стійкості ПНС, у роботах [7, 47-50, 78, 79,] досліджено способи розширення функціональних можливостей СТМ для

його використання в біології та медицині, у роботах [4, 5, 10, 83, 93] встановлено вимоги до параметрів СТМ, придатного для вимірювання динамічних параметрів рухомих об'єктів, у роботах [8, 87, 88] запропоновано методи побудови СТМ з урахуванням особливості використання ЕПТ високої роздільної здатності.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи представлені та обговорені на 12 міжнародних науково-технічних конференціях та форумах: 1) VIII-а міжнародна НТК «Electronic and Telecommunications Conference of Students and Young Scientific Workers SECON'2007» (Варшава, 2007); 2) Міжнародні НТК «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET» (Львів –Славське, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016); 3) 3-тя міжнародна НТК молодих вчених «Computer Science & Engineering CSE'2009» (Львів, 2009); 4) XX-а міжнародна НТК «Електроніка та нанотехнології» (Київ, 2010); 5) IV-й міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку МРФ'2011» (Харків, 2011); 6) VIII-а міжнародна НТК «Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów DIAG'2013» (Устронь, 2013); 7) X-а міжнародна НТК «Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK'2014» (Ваплево, 2014); 8) IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки УкрМіКо'2016 (Київ).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано в 26 наукових працях, зокрема у 8 статтях, опублікованих у наукових виданнях, які внесені до списку фахових видань України та до міжнародних наукометричних баз даних, 4 патентах України на корисну модель, а також у 14 працях – матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій, з яких 2 – одноосібні.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 114 найменувань та чотирьох додатків. Обсяг основної частини складає 178 сторінок, загальний обсяг – 223 сторінки. Робота містить 5 таблиць і 57 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ТЕЛЕВІЗІЙНІ СКАНУВАЛЬНІ МІКРОСКОПИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОБ'ЄКТІВ В БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

1.1. Телевізійний сканувальний мікроскоп як засіб дослідження мікрооб'єктів

Загальновідомо, що мікроскопи – це прилади, які створюють збільшене зображення малих об'єктів так, що їх можна спостерігати у зручному для дослідження та аналізу масштабі [42]. До найпростіших мікроскопів відносять лупи – скляні та пластикові, які широко застосовуються і сьогодні. Оптичний мікроскоп, який складається з об'єктива та окуляра, постійно удосконалювався з метою підвищення коефіцієнта збільшення та покращення якості зображення. Встановлено, що роздільна здатність оптичних приладів обмежується довжиною хвилі випромінювання внаслідок явища дифракції. Надалі розвиток оптичних мікроскопів полягав у розробленні та удосконаленні фазового контрасту, який дозволяє ефективно досліджувати прозорі об'єкти, що особливо важливо в медицині та біології.

Особливої уваги заслуговує електронна мікроскопія, поява якої базується на хвильовому трактуванні потоку електронів. У таких мікроскопах потік електронів високої енергії можна інтерпретувати як випромінювання з довжиною хвилі, що визначається цією енергією. Підвищення кінетичної енергії електронів еквівалентне зменшенню довжини хвилі і дозволяє значно підвищити роздільну здатність мікроскопа. Роздільна здатність оптичного мікроскопа складає орієнтовно 0,3...0,4 мкм, тоді як електронного мікроскопа сягає 0,2 нм [30, 42]. Однак, електронні мікроскопи мають суттєві недоліки, які полягають у необхідності попереднього оброблення досліджуваних об'єктів (ДО) і неможливості дослідження живих об'єктів.

Як відомо, мікроскопи будуються за двома основними принципами: на просвічування і відбиття [30, 61]. У мікроскопах просвічувального типу потік

опромінювача досягає досліджуваного поля об'єкта і після нього використовується для формування зображення ДО. У мікроскопах відбивального типу, відбитий від ДО світловий потік використовується для формування зображення ДО.

У мікроскопах сканувального типу, так званих растрових, формується гостросфокусований на об'єкт електронний зонд і так опромінюється тільки невелика частина поля ДО – елемент одержуваного видимого зображення. Процес сканування дозволяє поелементно проаналізувати все поле ДО [100]. Для відтворення зображення частину електронного потоку, яка пройшла через об'єкт або ж відбилася від нього, перетворюють в електричний сигнал, який із застосуванням телевізійних методів, створює зображення об'єкта на екрані телевізійного монітора. Принцип сканування стосується не тільки електронної мікроскопії. Його застосовують також у сканувальних тунельних мікроскопах, конфокальних сканувальних мікроскопах, сканувальних телевізійних оптичних мікроскопах.

Необхідно відзначити особливий вклад у розвиток мікроскопії застосування телевізійних та комп'ютерних засобів. Телевізійні методи дозволяють отримати електричний сигнал, який відповідає зображенню об'єкта. Використання цього сигналу для відтворення зображення на електронному моніторі суттєво підвищує зручність спостереження. Використання спеціальних електронних засобів як доповнення до монітора дозволяє вводити на екран допоміжні графічні елементи, а також здійснювати вимірювання, наприклад, лінійних розмірів ДО [30, 61]. Телебачення перетворило оптичний мікроскоп в оптично-електронний пристрій.

У свою чергу, наявність електричного сигналу, який відповідає зображенню, забезпечує також можливість оцифрування цього сигналу та занесення його в електронну пам'ять. Це є передумовою: 1) ефективного архівування зображення; 2) комп'ютерної обробки зображень цифровими методами з метою підвищення їх якості та інформативності [44]. Можливим є комплектування кожного мікроскопа, в якому формується електронний сигнал

зображення, окремими комп'ютерними засобами та відповідним програмним забезпеченням [101].

Загалом сьогодні відомі такі типи мікроскопів, які застосовуються для дослідження об'єктів малих розмірів [42, 63]: акустичні; атомних сил; біноклярні; відео (камерні); вимірювальні; відбивні; лазерні; інфрачервоні; інтерференційні; металографічні; мікрохірургічні; оптичні; поляризаційні; просвітлювальні електронні з фотовідповіддю; порівняльні; рентгенівські; сканувальні (растрові) оптичні; сканувальні конфокальні; сканувальні електронні; сканувальні тунельні; стробоскопічні; ультрафіолетові; фазового контрасту; флуоресцентні.

Ця робота стосується виключно телевізійних сканувальних мікроскопів ТСМ, принцип роботи яких базується на застосуванні для освітлення ДО випромінювання електронно-променевих трубок ЕПТ високої роздільної здатності. До написання цієї роботи спонукала перспективність побудови та використання для вирішення певних завдань ТСМ сканувального типу з освітленням ДО в ультрафіолетовому діапазоні, які мають низку переваг порівняно з більш поширеними зараз відеомікроскопами (мікроскопами камерного типу) та сканувальними мікроскопами, які працюють у видимому діапазоні освітлення ДО.

ТСМ на базі ЕПТ надвисокої роздільної здатності з освітленням ДО в ультрафіолетовому діапазоні можна використати як новий засіб досліджень наукового та прикладного характеру в біології, а також медицині та інших галузях науки і техніки, де використання ультрафіолетового випромінювання створює практичні переваги. Застосування таких мікроскопів дозволить отримати додаткову кількісну та якісну інформацію про характеристики мікрооб'єктів. При цьому максимально досягне збільшення ТСМ сумірне з початковим значенням збільшення растрових електронних мікроскопів.

Принцип сканування ДО ультрафіолетовим зондом з наступною комп'ютерною обробкою зображень має низку переваг порівняно з оптичною ультрафіолетовою мікроскопією: можливість проведення кількісних

вимірювань у межах окремих фрагментів ДО; гнучкість керування процесом вимірювання; скорочення тривалості проведення дослідження; вища роздільна здатність порівняно з оптичними ультрафіолетовими мікроскопами. Ці переваги дозволять широко використати новий метод в ультрафіолетовому діапазоні опромінювання. Варто зазначити, що ТСМ з ультрафіолетовим освітленням ДО можна використати також у біології, медицині, мінералогії, металографії, хімії, криміналістиці тощо.

ТСМ на основі ЕПТ слід порівнювати зі звичайними оптичними мікроскопами, камерними телевізійними мікроскопами, а також лазерними сканувальними мікроскопами [63, 75].

ТСМ мають такі переваги перед оптичними мікроскопами:

- 1) зручність спостереження об'єкта на екрані телевізійного монітора;
- 2) вища просторова роздільна здатність;
- 3) відсутність дифракційних контурних повторень на зображенні;
- 4) можливість вимірювань, базованих на відеосигналі;
- 5) можливість обробки зображень;
- 6) точкове освітлення (і тому менш загрозливе з точки зору руйнування об'єкта);
- 7) можливість гнучкого вибору режиму освітлення об'єкта з метою зміни контрасту без використання комп'ютерної обробки;
- 8) можливість зміни масштабу зображення без втрати роздільної здатності;
- 9) можливість використання оптичного променя для вибіркового впливу на об'єкт;
- 10) можливість накопичення і зберігання зображень;
- 11) можливість спряження з телекомунікаційними мережами.

Деякі з цих переваг згадуються у [42, 98], а також в [63].

Переваги, зазначені у пунктах 2, 3, 6, 7, 8, 9, є також перевагами сканувальної мікроскопії перед камерною. Слід, однак, зазначити, що сучасні телевізійні (відео)камерні мікроскопи базуються на CCD-камерах. Останні

мають дискретну структуру чутливого вузла з решіткою чутливих елементів (пікселів) певного розміру. Як відомо, розрізняюваний просторовий період за допомогою такої решітки, у кращому випадку, може бути оцінений як $2a$, де a – розмір чутливого елемента решітки. Це призводить до нижчої просторової роздільної здатності порівняно з ТСМ, оскільки в останньому розділення можливе навіть при певному накладанні сканувальних елементів. Підвищення роздільної здатності CCD можливе із зменшенням растра, однак при цьому падає чутливість. А це, у свою чергу, примушує підвищувати рівень освітлення або зменшувати частоту кадрів. Чутливість ТСМ значною мірою визначається ФЕП. При застосуванні ФЕП чутливість сканувального мікроскопа у 5000...10000 разів перевищує чутливість CCD-мікроскопа. При цьому необхідний рівень відеосигналу забезпечується навіть при значно нижчому рівні освітлення об'єкта, ніж у камерному CCD-мікроскопі.

При інтенсивному освітленні для CCD є характерним розтікання заряду на чутливій поверхні, що еквівалентно збільшенню розміру пікселя i , отже, зниженню просторової роздільної здатності [27, 33]. Щось подібне могло б виникати у ТСМ через збільшення розміру плями на екрані ЕПТ, однак такий ефект у ЕПТ відсутній. Як відомо, CCD мають обмеження щодо найнижчої тактової частоти перенесення зарядів у комірках. При надто низькій частоті заряди також розтікаються з тим же ефектом зниження просторової роздільної здатності. Подібного обмеження немає у ТСМ. Швидкість сканування може бути як завгодно низькою і це може використовуватися для збільшення рівня сигналу та, за потреби, усунення впливу післясвічення люмінофора сканувальної ЕПТ. Високоякісне (без "флікер-ефекту") відтворення зображення на моніторі забезпечується використанням буферної пам'яті та достатньо високої частоти кадрів у моніторі [81, 82].

Стосовно переваги ТСМ щодо зміни масштабу зображення слід зазначити, що у камерних мікроскопах зміну масштабу реалізують з застосуванням відповідної програми комп'ютерної обробки цифрового зображення. Як результат, при зростанні коефіцієнта збільшення стає помітною

піксельна структура зображення. У ТСМ зображення залишається злитим, оскільки масштаб змінюють зміною розмірів сканувального растра.

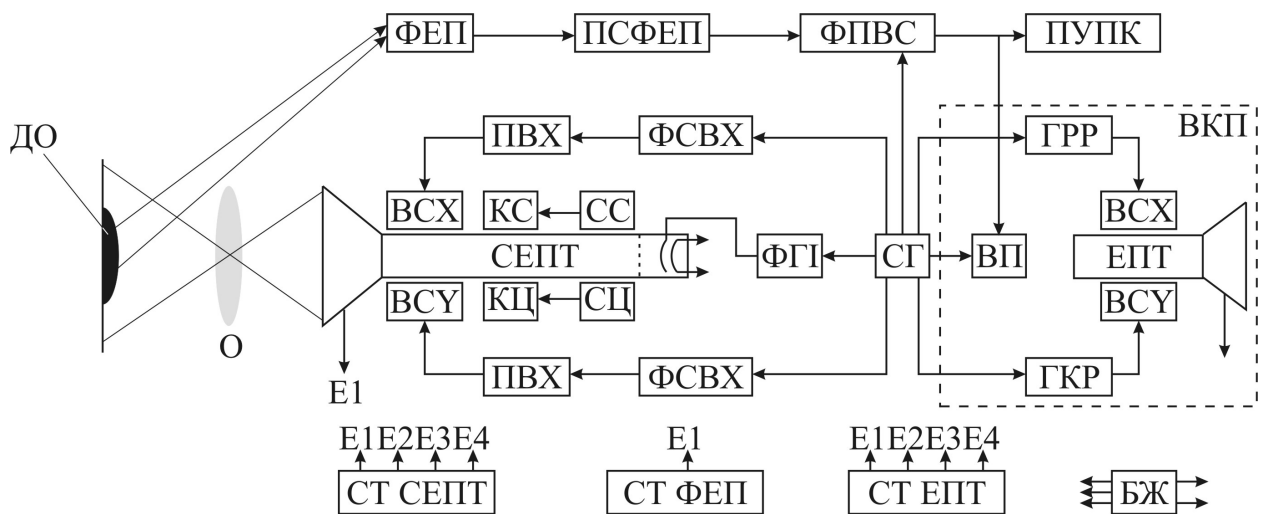


Рисунок 1.1 – Структурна схема ТСМ при роботі на відбиття

Структурна схема телевізійного сканувального оптичного мікроскопа наведена на рис. 1.1. До його складу входять: сканувальна електронно-променева трубка СЕПТ; відхилювальні системи по координатах Х та Y ВСХ та ВСУ; котушка стигматора КС; котушка центрування КЦ; стабілізатор струму котушки стигматора СС; стабілізатор струму котушки центрування СЦ; підсилювачі відхилення по координатах Х та Y ПВХ та ПВУ; формувачі сигналу відхилення по координатах Х та Y ФСВХ та ФСВУ; формувач імпульсів гасіння ФГІ; синхрогенератор СГ; об'єктив О; досліджуваний об'єкт ДО; фотоелектронний помножувач ФЕП; підсилювач сигналу фотоелектронного помножувача ПСФЕП; формувач повного відеосигналу ФПВС; пристрій узгодження з персональним комп'ютером ПУПК; відеоконтрольний пристрій ВКП до складу якого входять: електронно-променева трубка ЕПТ; відхилювальні системи по координатах Х та Y ВСХ та ВСУ; генератор рядкової розгортки ГРР; генератор кадрової розгортки ГКР; відеопідсилювач ВП, а також блок живлення БЖ; стабілізатор живлення електродів сканувальної електронно-променевої трубки СТ. СЕПТ; стабілізатор

живлення фотоелектронного помножувача СТ. ФЕП; стабілізатор живлення електронно-променевої трубки СТ ЕПТ.

Принцип роботи ТСМ такий. Світний растр з екрана сканувальної електронно-променевої трубки СЕПТ проектується через об'єтив О на досліджуваний об'єкт ДО. Відбите світло від досліджуваного об'єкта ДО, потрапляє на приймальне вікно фотоелектронного помножувача ФЕП, де перетворюється в електричний сигнал, що надходить на попередній підсилювач сигналу фотоелектронного помножувача ПСФЕП, де підсилюється до величини 0,8–1 В. У формувачі повного відеосигналу ФПВС здійснюється сумування відеосигналу з імпульсами гасіння по рядку та кадру, а також прив'язування рівня чорного та обмеження сигналу за амплітудою.

Регулювання розміру растра на екрані сканувальної трубки здійснюється в широких межах при збереженні лінійності розгортки та стабільності її параметрів. Зміна розміру світного растра забезпечує регулювання розміру досліджуваного зображення на екрані ЕПТ відео-контрольного пристрою ВКП [74]. Зменшення світного растра в 10 разів приводить до збільшення масштабу досліджуваного зображення в 10 разів. Синхрогенератор СГ формує на своїх виходах сигнали, які зв'язують в часі процеси сканування досліджуваного об'єкта ДО та відтворення зображення на екрані ВКП.

Структурна схема СТМ з точки зору формування відеосигналу наведена на рис. 1.2. До її складу входять: сканувальна ЕПТ; перший оптичний канал ОК1, який проектує світний растр на ДО; другий оптичний канал ОК2, який збирає розсіяне світло ДО при роботі сканувального мікроскопа на відбиття або збирає світло, яке пройшло через ДО при роботі сканувального мікроскопа на просвічування; фотоелектронний помножувач ФЕП, який перетворює світловий сигнал в електричний, та формувач відеосигналу ФС, який підсилює сигнал ФЕП до нормованої величини та замішує в нього імпульси синхронізації та гасіння.

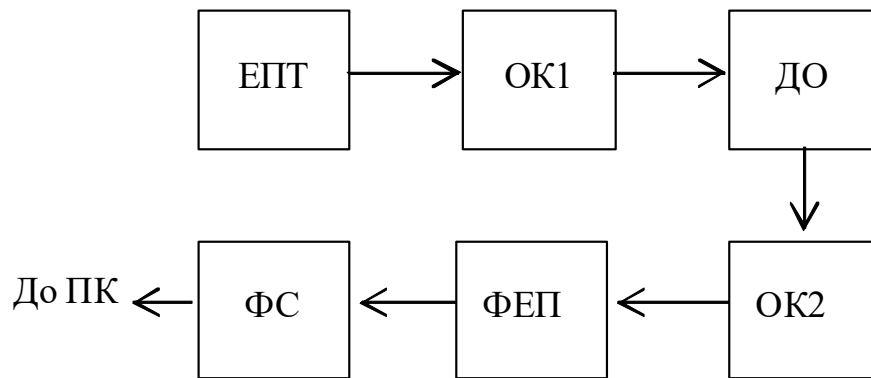


Рисунок 1.2 – Структурна схема СТМ з точки зору формування відеосигналу

Також слід констатувати, що сканувальні мікроскопи на основі ЕПТ мають певні переваги і перед лазерними сканувальними мікроскопами, у яких застосовують оптико-механічні системи сканування. У таких системах важко забезпечити достатньо високі частоти сканування і, отже, ускладнюється робота мікроскопа у реальному масштабі часу при дослідженні динамічних об'єктів. Лазери мають монохромне випромінювання, що не дозволяє будувати кольорові мікроскопи. Лазерний промінь здебільшого має надто високу потужність, тому виникає загроза руйнування об'єкта. А використання спеціальних засобів захисту вимагає додаткових витрат.

СТМ структурно та алгоритмічно подібний до сканувального електронного мікроскопа (СЕМ), за допомогою якого вивчаються тривимірні (об'ємні) поверхневі структури клітин. Основні відмінності – сканування об'єкта світловим променем, а не електронним, та розташування об'єкта в природному для нього середовищі, а не у вакуумі. Розташування живих МО в природному для їх існування середовищі дозволяє проводити тривалі дослідження без порушення процесів життєдіяльності, що особливо важливо в кріобіології та кріомедицині [81, 82, 84].

Корисний масштаб збільшення СТМ – 20000 разів, який сумірний з початковими збільшеннями електронних мікроскопів, дозволяє одержати із стандартних препаратів суттєво більший об'єм клінічних ознак. Вартість СТМ на порядок нижча від вартості СЕМ.

Звичайно, СТМ на основі ЕПТ також мають недоліки. До них відносять:

- чутливість сканувальної ЕПТ до зовнішніх магнітних полів;
- необхідність застосування високостабільних джерел керування і живлення сканувальної ЕПТ;
- відносно невелика інтенсивність сканувального оптичного променя;
- зменшення інтенсивності сканувальної плями при відхиленні електронного променя ЕПТ від центру екрана;
- необхідність корекції розміру сканувальної плями в площині об'єкта при відхиленні електронного променя ЕПТ від центру екрана;
- обмеження стосовно швидкості сканування, обумовлені післясвіченням люмінофора екрана;
- наявність відносно значного шуму порошкового екрана сканувальної ЕПТ.

Найближчі перспективи розвитку СТМ можна пов'язати з [85]:

- 1) використанням ЕПТ з ультрафіолетовим свіченням екрана;
- 2) удосконаленням ЕПТ з монокристалічним екраном;
- 3) використанням ЕПТ з волоконно-оптичним екраном;
- 4) використанням як джерело сканувального променя – сучасних мікродисплеїв.

1.2. Особливості дослідження мікрооб'єктів в ультрафіолетовому діапазоні освітлення

Ультрафіолетове випромінювання УФВ – електромагнітне випромінювання, яке займає спектральну область між видимим та рентгенівським випромінюванням в межах довжин хвиль 10-400 нм [32, 38, 55, 114]. Оптичні властивості речовин в УФ області спектра значно відрізняються від їх оптичних властивостей у видимій області. Характерною особливістю є зменшення прозорості (збільшення коефіцієнта поглинання) більшості тіл, прозорих у видимій області. Наприклад, звичайне скло – непрозоре при

довжині хвилі $\lambda < 320$ нм; у більш короткохвильових УФ-променях непрозорими стають майже всі відомі речовини, зокрема, і повітря [51, 59].

В ультрафіолетовій мікроскопії невидиме оку зображення досліджуваного МО, отримане в УФ-променях, перетворюється у видиме зображення такими методами, як фотографування, застосування флуоресціюючих екранів тощо. Перевагою УФ мікроскопії є можливість підвищення роздільної здатності внаслідок зменшення довжини хвилі УФ-випромінювання порівняно з видимим світлом та підвищення контрасту зображення досліджуваного МО внаслідок великого коефіцієнта поглинання УФ-променів багатьма речовинами. УФ-мікроскопія використовується в біології, медицині, мінералогії, металографії, хімії тощо [87, 89].

Особливо широко УФ-мікроскопія використовується в біології та медицині (бактеріологічні, гістологічні, цитологічні, ембріологічні, гематологічні дослідження тощо). Причиною цьому сприяла велика зацікавленість до вирішення життєво важливих проблем, пов'язаних з процесами, які проходять у живій клітині [59, 90]. Відомо, що основні речовини клітин мають максимум поглинання в УФ ділянці спектра: так, наприклад, нуклеїнові кислоти мають максимум поглинання при довжині хвилі $\lambda = 260$ нм, тоді як у видимій ділянці спектра вони повністю прозорі [78, 90]. Завдяки цьому за допомогою абсорбційної фотометрії в УФ ділянці спектра є можливим отримати кількісну інформацію про незафарбовані препарати. Застосовуючи мікроспектрофотометричний метод сканування живої клітинки, можна вивчати розподіл та концентрацію нуклеїнової кислоти, яка має велике значення в життєдіяльності клітин [83].

Найбільшого поширення в УФ мікроскопії набули два методи: метод сканування досліджуваного МО, запропонований Касперсоном та двоххвильовий метод Мендельсона [88]. Обидва методи дозволяють до мінімуму звести похибки, які виникають через нерівномірність розподілу речовини в структурах біологічних негомогенних об'єктів. Двоххвильовий метод отримав широке використання лише при дослідженнях зафарбованих об'єктів у видимій

області, в той час як метод сканування Касперсона використовує певну спектральну ділянку [96]. Ультрафіолетовий сканувальний оптичний мікроскоп у режимі роботи на просвічування завдяки використанню принципу точкового сканування здійснює ще й процедуру мікроспектрофотометрії (в межах спектра випромінювання сканера) препарату окрім одержання його збільшеного зображення [105].

Широко відомо використання УФ-променів для проведення досліджень речових доказів, встановлення ідентичності фарбників, достовірності документів тощо [97]. В мистецтвознавстві УФВ дозволяє виявити на картинах невидимі для ока сліди реставрації [99].

У криміналістиці використовують лише порівняно невелику ділянку УФ-випромінювання – від 400 нм до 200 нм. Це пояснюється тим, що довжині хвилі 200 нм відповідає межа пропускання УФ-променів кварцом та флюоритом. Спеціальні пристрої, які дозволяють проводити візуальні дослідження в УФ-ділянці спектра – люмінесцентні та електронно-оптичні перетворювачі УФ зображення у видиме. Метод кольорової трансформації за Брумбергом дозволяє спостерігати кольорові зображення з високим ступенем ахроматизації в УФ та видимій ділянках спектра [99]. Застосовувану в криміналістиці ділянку УФ частини спектра, умовно ділять на три частини:

- довгохвильові УФ-промені з довжиною хвилі 400...320 нм;
- середньохвильові УФ-промені з довжиною хвилі 320...275 нм;
- короткохвильові УФ-промені з довжиною хвилі коротшою 275 нм [99].

Основним методом застосування УФ-променів у криміналістиці є люмінесцентний аналіз. Для збудження люмінесценції використовують не лише УФ-промені, а також видиме світло, електронні пучки, рентгенівські промені тощо.

Коефіцієнт відбиття всіх матеріалів (зокрема металів) зменшується зі зменшенням довжини хвилі випромінювання. Наприклад, коефіцієнт відбиття щойно напиленого алюмінію, одного з кращих матеріалів для відбиття у

видимій області спектра, різко зменшується при $\lambda < 90$ нм, а також внаслідок окислення поверхні (рис. 1.3). Для захисту поверхні алюмінію від окислення застосовуються покриття з фтористого літію або фтористого магнію.

Джерела УФ-випромінювання нагрітих твердих тіл до 3000К, мають помітну частку УФ неперервного спектра, інтенсивність якого зростає зі збільшенням температури.

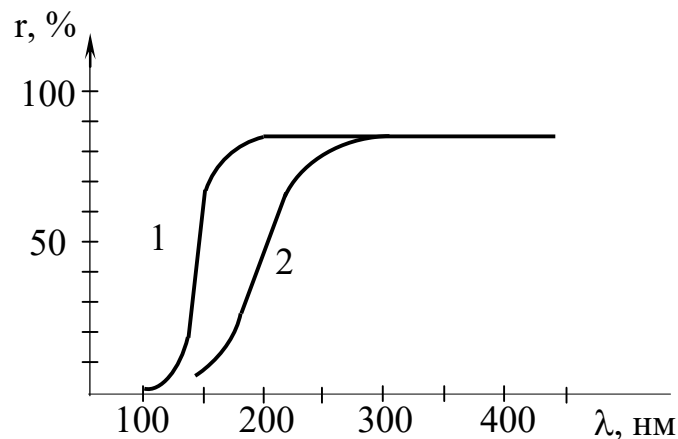


Рисунок 1.3 – Залежність коефіцієнта відбиття r шару алюмінію від довжини хвилі λ , виміряна відразу після напилування в ультрафіолетовому вакуумі (1) і після зберігання на відкритому повітрі протягом року (2)

Біологічна дія УФ-випромінювання. При дії на живі організми УФ-випромінювання поглинається верхніми пластами тканин рослин або шкіри людини і тварин. Основою біологічної дії УФ випромінювання є хімічні зміни молекул біополімерів. Ці зміни зумовлені як безпосереднім поглинанням ними квантів поглинання, так і (меншою мірою), утворюваними при опромінюванні радикалами води та інших низькомолекулярних з'єднань [38]. Великі дози УФ-випромінювання можуть викликати пошкодження очей (фотоофтальмію) і опік шкіри. Часті і понадмірні дози УФ-випромінювання іноді можуть спричинити канцерогенну дію на шкіру [99].

У рослинах УФ-випромінювання змінює активність ферментів і гормонів, впливає на синтез пігментів, інтенсивність фотосинтезу і фотоперіодичність реакції. Великі дози УФ-випромінювання, поза сумнівом, не

є корисними для рослин, про що свідчать існуючі в них захисні реакції (наприклад, накопичування певних пігментів, клітинні механізми відновлення від пошкоджень) [113]. На мікроорганізми і культивовані клітини вищих тварин і рослин УФ-випромінювання діє згубно і мутагенно (найбільш ефективним є УФ-випромінювання з довжиною хвилі в межах 280–240 нм).

Як правило, спектр летальної і мутагенної дії УФ-випромінювання приблизно співпадає зі спектром поглинання нуклеїнових кислот – ДНК, РНК, у деяких випадках спектр біологічної дії наближений до спектра поглинання білків. Певне значення в летальній дії УФ-випромінювання на клітини мають також пошкодження біологічних мембран і порушення синтезу різних компонентів мембран і клітинної оболонки. Більшість живих клітин можна відновити від спричинених УФ-випромінюванням пошкоджень завдяки наявності в них систем репарації [91, 99].

За чутливістю до УФ-випромінювання біологічні об'єкти дуже розрізняються. Наприклад, доза УФ-випромінювання, яка викликає загибель 90% клітин, для різних штамів кишкової палички рівна 10, 100 і 800 ер-год/мм², а для бактерій *Micrococcus radiodurans* – 7000 ер-год/мм² (рис. 1.4). Завдяки великому мутагенному ефекту УФ-випромінювання широко застосовують як в генетичних дослідженнях, так і в селекції рослин і промислових мікроорганізмів, які є продуцентами антибіотиків, амінокислот, вітамінів і білкової біомаси. Генетична дія УФ-випромінювання могла мати суттєве значення в еволюції живих організмів [99].

Широкого застосування набула люмінесцентна мікроскопія. Вона базується на властивості деяких речовин давати свічення – люмінесценцію в УФ-променях або в синьо-фіолетовій частині спектра. Багато біологічних речовин, таких як прості білки, коферменти, деякі вітаміни та лікарські препарати, мають власну (первинну) люмінесценцію. Інші речовини починають світитися лише при додаванні до них спеціальних барвників – флюорохромів (вторинна люмінесценція). Флюорохроми можуть розподілитися в клітині дифузійно або вибірково і розфарбовувати окремі клітинні структури, або певні

хімічні з'єднання біологічного об'єкта. На цьому побудоване застосування люмінесцентної мікроскопії при цитологічних та гістохімічних дослідженнях, а також в люмінесцентному аналізі і люмінесцентній дефектоскопії [103].

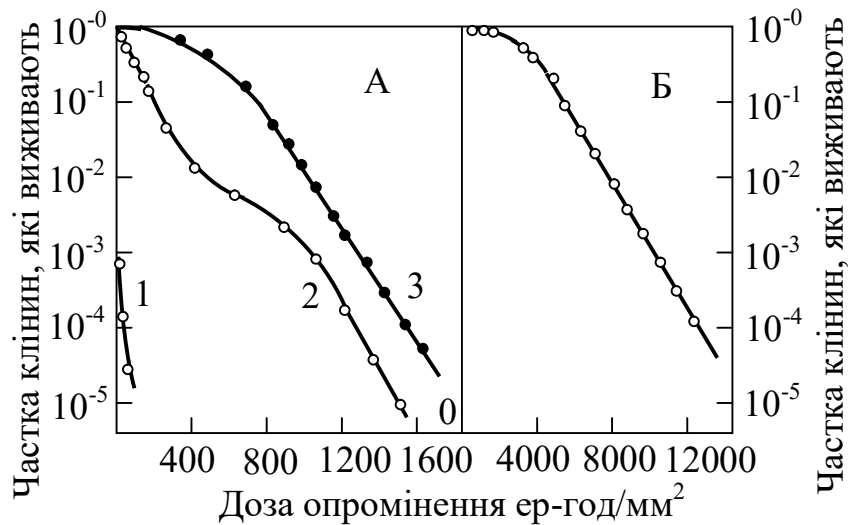


Рисунок 1.4 – Залежність часток клітин різних бактерій, які виживають від дози УФ-випромінювання; А – кишкова паличка, $\lambda = 253,7 \text{ nm}$; 1, 2 – мутантні штами; 3 – дикий тип; Б – *Micrococcus radiodurans*, $\lambda = 265,2 \text{ nm}$

За допомогою імунолюмінесценції можна виявити вірусні антигени та їх концентрацію в клітинах, ідентифікувати віруси, визначити антигени, гормони, різні продукти метаболізму тощо. В зв'язку з цим люмінесцентну мікроскопію застосовують у лабораторній діагностиці таких інфекцій як герпес, епідемічний паротит, вірусний гепатит, а також використовують в експрес-діагностиці респіраторних вірусних інфекцій. Розвиток люмінесцентних експрес-методів діагностики різних інфекційних та інших захворювань підтверджують важливість та необхідність вдосконалення апаратури для люмінесцентних мікродосліджень у напрямку забезпечення кількісного та якісного аналізу.

В патоморфології за допомогою люмінесцентної мікроскопії розпізнають злоякісні пухлини в гістологічних та цитологічних препаратах, визначають ділянки ішемії м'язу серця при початкових стадіях інфаркту міокарда, виявляють амілоїд в біоптатах тканин тощо. Крім абсорбційного аналізу ультрафіолетова мікроскопія дозволяє досліджувати люмінесценцію

тканин живих об'єктів. Висока чутливість цього методу робить його особливо перспективним в мікробіології, цитології, медицині [103, 105].

В сканувальній оптичній мікроскопії за способом збудження відомі два типи люмінесценції – катодолюмінесценція та фотолюмінесценція. Перший тип спостерігають при створенні джерела світлового випромінювання бомбардуванням люмінофора в ЕПТ електронним пучком. Другий тип спостерігається при опроміненні сканувальним світловим зондом речовин препарату. Фотолюмінесценція залежно від тривалості наведеного свічення поділяється на флуоресценцію (10^{-9} – 10^{-6} сек.) та фосфоресценцію (10^{-3} – 10 сек.). Квантовий вихід фотолюмінесценції (порівняно з катодолюмінісценцією) достатньо великий, проте її параметри (інтенсивність, спектр, тривалість) залежать від досліджуваної речовини. Для ідентифікації біологічних речовин, які не мають властивостей фотолюмінесценції, використовують, так звані, біомаркери – люмінесцентні частинки, споріднені з певними білковими молекулами, які далі з'єднуються з відповідними білками клітин і роблять їх доступними для спостереження оптичними засобами [38].

В окремих випадках люмінесцентна мікроскопія дозволяє розрізнити живі та мертві (пошкоджені) мікробні клітини по кольору їх флуоресценції. Така точна і відносно проста методика може мати важливе, а здебільшого і вирішальне значення при експериментальних роботах у області вивчення змінності мікробів, дії на мікробну частину антибіотиків і дезінфікуючих речовин, ультрафіолетового світла, рентгенівських променів тощо. Ефект різного забарвлення живих та мертвих мікробних клітин, пов'язаний з різною здатністю їх протоплазми адсорбувати акрединовий помаранчевий: в цитоплазмі живих клітин його концентрація низька – порядку 1:50000, а мертвих клітин – порядку 1:1000 [38, 64, 75].

Наведене вище можна підсумувати так: досить суттєвим недоліком люмінесцентно-мікроскопічних приладів є мала яскравість свічення об'єкта. Для зменшення його негативних наслідків, тобто збільшення яскравості свічення, використовують більш інтенсивні джерела світла. Підвищення

інтенсивності опромінювання об'єкта приводить до “вицвітання” флуоресцентних картин та згубного впливу на життєдіяльність клітин. Негативні наслідки люмінесцентної мікроскопії спричинені малою яскравістю флуоресценції, а відтак, великою інтенсивністю опромінювання об'єкта можна значно зменшити, використовуючи принцип сканування об'єкта світловим зондом, який лежить в основі сканувальної оптичної мікроскопії. Виходячи з цього принципу, кожна досліджувана точка об'єкта зазнає інтенсивного опромінювання сфокусованим світловим зондом на дуже короткий відрізок часу (мінімальне значення якого визначається тривалістю післясвічення катодолюмінесцентного джерела випромінювання), яке періодично повторюється після відносно довгої паузи. Отже, загальна експозиція об'єкта суттєво зменшується з усіма негативними наслідками, пов'язаними з опромінюванням.

Враховуючи той факт, що кожна окрема точка об'єкта випромінює світло флуоресценції в окремий момент часу, з'являється можливість інтегрального використання флуоресцентного випромінювання даної точки з усіх напрямків його поширення, тобто повної енергії випромінювання. Опромінювання наступної точки має здійснюватися після закінчення свічення флуоресценції попередньої точки об'єкта. У загальноприйнятій люмінесцентній мікроскопії використовується лише та частина флуоресцентного світлового потоку, яка попадає в апертуру об'єктива, що є суттєво менше повної енергії випромінювання. Тому застосування ТСМ на основі ЕПТ з ультрафіолетовим свіченням екрана дозволить використовувати його у всіх раніше згаданих випадках пр. дослідженні МО.

1.3. Електронно-променева трубка високої роздільної здатності як джерело освітлення досліджуваного мікрооб'єкта в телевізійному сканувальному мікроскопі

Оскільки метод спостереження в УФ-променях дозволяє збільшити граничну роздільну здатність мікроскопа, то пропонується у ТСМ використати

спеціалізовану ЕПТ високої роздільної здатності з УФ-свіченням екрана [3, 8, 9, 26]. Метод УФ мікроскопії розширює можливості мікроскопічних досліджень через те, що частинки багатьох речовин, прозорих у видимому світлі, поглинають УФ-промені певних довжин хвиль і, відповідно, легко розрізняються в УФ зображеннях.

Оскільки, УФ-промені невидимі для ока людини, то зображення в УФ мікроскопі реєструється за допомогою перетворювача світло-сигнал, чутливого до УФ-випромінювання. Можливо також представляти такі зображення в умовних кольорах. Для цього досліджуваній МО освітлюється у трьох діапазонах довжин хвиль УФ області спектра. Кожен з діапазонів відтворюється видимим світлом певного кольору (наприклад, зеленим або червоним), які одночасно проєктуються на один екран монітора. Як результат, на екрані такого монітора створюється кольорове зображення в умовних кольорах, які залежать від поглинаючої здатності досліджуваного МО в ультрафіолеті. Можливим є освітлення досліджуваного об'єкта УФ-випромінюванням з широким спектром, а сприйняття поглинання перетворювачами світло-сигнал з вузьким спектром, наприклад, за допомогою оптичних фільтрів з вузьким спектром пропускання УФ-опромінювання.

Проведені дослідження вимог до використання як джерела освітлення в ТСМ ЕСТ, в першу чергу направлені [52, 55]:

- на визначення необхідного спектра сканувальної ЕПТ в УФ діапазоні випромінювання;
- на визначення необхідної яскравості свічення сканувальної ЕПТ з метою отримання якісного зображення досліджуваного МО у видимому діапазоні спектра на екрані монітора;
- на визначення необхідної роздільної здатності сканувальної ЕПТ з метою забезпечення можливості масштабування зображення через зміну розміру сканувального растра в межах, які не погіршують роздільну здатність формованого зображення на екрані монітора;

– на визначення допустимого шуму люмінофора екрана сканувальної ЕПТ.

Враховуючи необхідність проведення досліджень з біологічними МО, спектр випромінювання використовуваної ЕПТ у ТСМ повинен знаходитися в ближній області (довжина хвилі 400...200 нм). Аналіз виконуваних робіт на оптичних мікроскопах показує, що найчастіше використовується при біологічних дослідженнях УФ-випромінювання з довжиною хвилі 400...350 нм.

Для визначення необхідної яскравості свічення сканувальної ЕПТ з метою отримання якісного зображення ДО у видимому діапазоні спектра на екрані монітора, використано методику, наведену в [26]. В цій роботі показано, що якість відтворюваного на екрані монітора зображення значною мірою залежить від помітності шумів, основними джерелами яких у ТСМ є формувач повного відеосигналу, ФЕП та сканувальна ЕПТ.

У свою чергу, помітність шумів визначається відношенням сигнал/шум на виході формувача відеосигналу [26]. Як відомо, у телевізійних системах відношення сигнал/шум є тим більше, чим вищою є освітленість об'єкта за умови, що джерело світла можна вважати безшумним. Цей метод визначення необхідної освітленості об'єкта описано в [24, 33]. Однак, використовуване у ТСМ світло – це ЕПТ. Для всіх ЕПТ характерним є значний рівень шуму, який необхідно враховувати при виборі типу ЕПТ [43].

При визначенні необхідної роздільної здатності сканувальної ЕПТ потрібно врахувати:

- роздільну здатність відтворюваного зображення ДО на екрані монітора;
- необхідний діапазон зміни масштабу зображення через зміну розмірів сканувального растра;
- мінімально можливий діаметр сканувальної плями на екрані ЕПТ при вибраному коефіцієнті модуляції яскравості свічення [16];
- максимально можливі розміри сканувального растра на екрані ЕПТ;

– роздільну здатність елементів, що входять до складу оптичного каналу.

Серед основних параметрів ТСМ є його просторова роздільна здатність, яка, в першу чергу, визначається роздільною здатністю використовуваної сканувальної ЕПТ [63, 95]. Мінімально можливі розміри сканувального растра на ДО визначаються розмірами растра на екрані сканувальної ЕПТ, а також використовуваним об'єктивом та конструктивними розмірами оптичного каналу, який формує сканувальний растр на ДО. При виборі ЕПТ потрібно передбачити, щоб її роздільна здатність не погіршувала необхідної роздільної здатності загалом, тобто повинна виконуватися умова:

$$D_{ПСК} \leq D_{ПК} / q \cdot q_1, \quad (1.1)$$

де $D_{ПСК}$ – діаметр світної плями сканувальної ЕПТ;

$D_{ПК}$ – діаметр світної плями монітора;

q – лінійне збільшення телевізійної системи мікроскопа, яке дорівнює відношенню ширини растра зображення на моніторі $b_{ПК}$ до ширини сканувального растра на екрані сканувальної ЕПТ $b_{ПСК}$;

q_1 – коефіцієнт телевізійного збільшення внаслідок зменшення растра на екрані сканувальної трубки (зменшення розмірів растра сканувальної трубки дозволяє пропорційно збільшувати загальний коефіцієнт збільшення мікроскопа):

$$q_1 = b_{ПСК_{MAX}} / b_{ПСК_{MIN}}, \quad (1.2)$$

де $b_{ПСК_{MAX}}$ – максимальний розмір ширини растра на екрані ЕПТ;

$b_{ПСК_{MIN}}$ – мінімальний розмір ширини растра на екрані ЕПТ.

При розрахунку параметрів будемо орієнтуватися на використання монітора з діагоналлю 21' (54 см), а у сканувальній частині – ЕПТ, яка має робочий розмір екрана $d = 30$ мм і діаметр світної плями $D_{ПСК} = 10$ мкм. Формат растра, який вписується в екран ЕПТ $k = 4/3$. Розміри растра на екрані ЕПТ при форматі, який вписується в задане робоче поле, будуть:

для ширини растра:

$$b_{ПСК_{MAX}} = \frac{d \cdot k}{\sqrt{1+k^2}} = \frac{30 \cdot 1,33}{\sqrt{1+1,33^2}} = 24 \text{ мм}; \quad (1.3)$$

для висоти растра:

$$h_{ПСК_{MAX}} = b_{ПСК_{MAX}} / k = 24 / 1,33 = 18 \text{ мм}. \quad (1.4)$$

Горизонтальний розмір растра монітора при використанні екрана з діагоналлю 21' (54 см), складає $b_E = 340$ мм. Мінімальне збільшення телевізійної частини мікроскопа при цьому буде:

$$q = b_E / b_{ПСК_{MAX}} = 340 \text{ мм} / 24 \text{ мм} = 14. \quad (1.5)$$

При необхідності з виразу (1.1) можна знайти діапазон зміни сканувального растра на екрані ЕПТ трубки без погіршення якості формованого зображення ДО на екрані монітора.

При визначенні допустимого шуму люмінофора екрана сканувальної ЕПТ необхідно врахувати такі параметри тракту формування відеосигналу сканувального мікроскопа:

- допустиме відношення сигнал/шум на виході формувача повного відеосигналу;
- шум використовуваного ФЕП;
- електричні параметри використовуваного ФЕП;
- верхню граничну смугу пропускання тракту формування відеосигналу.

Проведені спільні дослідження з науково-дослідним інститутом приймальних електронно-променевиx трубок «ЕРОТРОН» (м. Львів) та Львівським Національним університетом ім. Ів. Франка, які підтвердили можливість створення люмінофора, який світиться в ближньому ультрафіолетовому спектрі (350-400 нм). Також проведені спектральні дослідження на базі Національного університету ім. Ів. Франка, які показали, що яскравість свічення люмінофора в діапазоні 300 нм зменшується порівняно з яскравістю свічення люмінофора в діапазоні 400 нм у 6-8 разів.

Результатом проведених досліджень стало створення проєкційної ЕПТ високої роздільної здатності з діапазоном свічення в ближньому УФ. Загальний

вигляд проектованої сканувальної ЕПТ високої роздільної здатності, яка в перспективі зможе працювати в УФ-діапазоні випромінювання, наведено на рис. 1.5. Основні технічні параметри трубки наведені в таблиці 1.1. Проведені дослідження люмінофорів з ультрафіолетовим спектром випромінювання в Національному університеті ім. Ів. Франка підтверджують можливість створення люмінофорів з коротким часом післясвічення, придатним до використання їх в мікроскопі з біжучим променем. Як відомо, в такому мікроскопі вгамівність випромінювання від попереднього елемента сканувального растра повинна бути такою, щоб не впливати на формування сигналу зображення від нового розташування елемента сканувального растра.



Рисунок 1.5 – Загальний вигляд сканувальної ЕПТ високої роздільної здатності типу У4ТП1И

Таблиця 1.1 – Основні технічні параметри ЕПТ типу У4ТП1И

Екран	монокристалічний, круглий, плоский
Фокусування променя	електростатичне
Відхилення променя	електромагнітне
Кут відхилення променя, градус	30

Розмір робочої частини екрана	коло діаметром 30 мм
Енергетична яскравість свічення екрана, Вт/(ср·м ²)	не менше 0,25
Ширина лінії, мм	не більше 0,015
Нерівномірність енергетичної яскравості свічення екрана, %	не більше 25
Міжелементна нерівномірність енергетичної яскравості свічення екрана, %	не більше 3
Напруга розжарення, В	6,3
Струм розжарення, А	0,27 – 0,3
Напруга (відносно катода), В: – модулятора, запираюча – прискорюючого електрода – фокусуючого електрода – підфокусуючого електрода – анода	30 – 100 1000 1100 – 1500 200 – 500 15000
Маса, кг	не більше 0,3
Довжина, мм	не більше 270
Мінімальне напрацювання, год.	5000

Проведені дослідження також підтвердили можливість створення монокристалічних плівкових катодолюмінесцентних покриттів, які випромінюють у ближньому УФ спектрі (350-400 нм). В цих дослідженнях застосовувалася ЕПТ з монокристалічним екраном, максимум спектра свічення якої знаходився в районі 450 нм. Для збудження катодолюмінесценції використовувалася електронно-оптична система з фокусуючою лінзою у вигляді високоомного спірального резистивного покриття на внутрішній поверхні горловини, під'єданого між анодом А і фокусуючим електродом 8 (рис. 1.6).

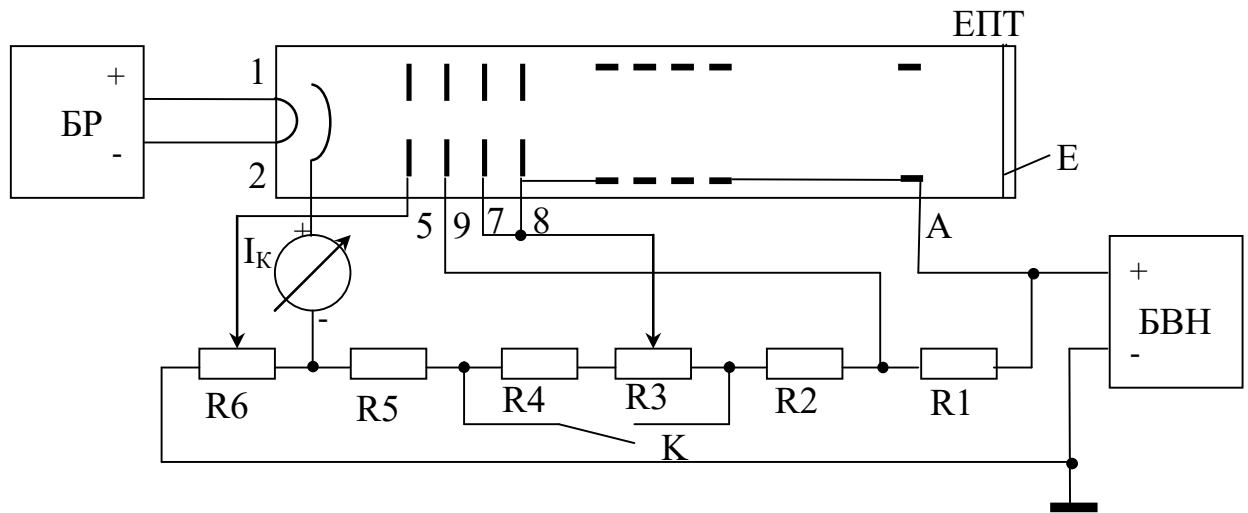


Рисунок 1.6 – Структурна схема живлення ЕПТ при дослідженні спектральної характеристики катодолюмінісценції

Живлення електродів ЕПТ здійснювалося від високоомного подільвача R1 – R6, під'єданого до блока високої напруги БВН (15 кВ). Розжарення підігрівача здійснювалося від окремого блока розжарення БР. Струм катода I_k контролювався стрілковим приладом, по якому, використовуючи попереднє калібрування, можна було оцінювати струм променя, величина якого встановлювалася зміною потенціалу модулятора 5 потенціометром R6. Режим фокусування електронного променя на екрані підбирався зміною потенціалу фокусуєчого електроду 8 потенціометром R3. Для оперативної зміни режиму фокусування (промінь сфокусовано чи розфокусовано) використовувався ключ, при замиканні якого промінь розфокусовувався. Ці два режими забезпечували різні умови збудження катодолюмінісценції по енергетичному навантаженню кристала, що важливо враховувати при розробці катодолюмінесцентних монокристалічних плівок із заданими спектральними характеристиками катодолюмінісценції.

Спектральний склад випромінювання катодолюмінісценції аналізувався монохроматором МДР-23 ЛОМО, у якому перетворювач світло-сигнал виконано на базі ФЭУ-136. Результати поточних вимірів по діапазону спектра

випромінювання автоматично оброблялися персональним комп'ютером з відповідним програмним забезпеченням.

Оскільки, процес проходження монохроматором всього діапазону вимірювань є тривалим, то необхідно було забезпечити стабільність режиму емісії катода ЕПТ, тобто досягти стану рівноваги теплових процесів в катодному вузлі ЕПТ. Для цього було здійснено процедуру виходу на режим вимірювання при контролі струму катода до досягнення ним максимального значення при заданому режимі роботи імерсійного об'єктива електронно-оптичної системи ЕПТ (рис. 1.7, а).

Результати вимірювання спектральної залежності інтенсивності катодолюмінісценції у відносних одиницях у різних режимах фокусування електронного променя (1 – сфокусований промінь, 2 – розфокусований промінь) представлено на рис.1.7, б.

В ділянці довжини хвилі $\lambda = 400$ нм у режимі сфокусованого променя спостерігається суттєве підвищення інтенсивності катодолюмінісценції, що переконливо демонструє рис. 1.7, в, де представлено різницю інтенсивностей при розфокусованому та сфокусованому променях.

Для математичного аналізу одержаних результатів використовувалися програми, в яких спектральні одиниці переведені в енергетичні (рис. 1.7, г). Апроксимація одержаних експериментальних кривих нормальним розподілом показує, що вони описуються сумою двох розподілів, які суттєво відрізняються залежно від режиму електронного опромінювання (відповідно, розфокусований та сфокусований промені), в першу чергу, різниці протікання теплових процесів у зоні катодолюмінісценції при різних енергетичних навантаженнях кристалічної ґратки екрана ЕПТ (рис. 1.7, д, 1.7, е), де 1 – експериментальна крива, 2, 3 – нормальні розподіли, сума яких апроксимує криву 1.

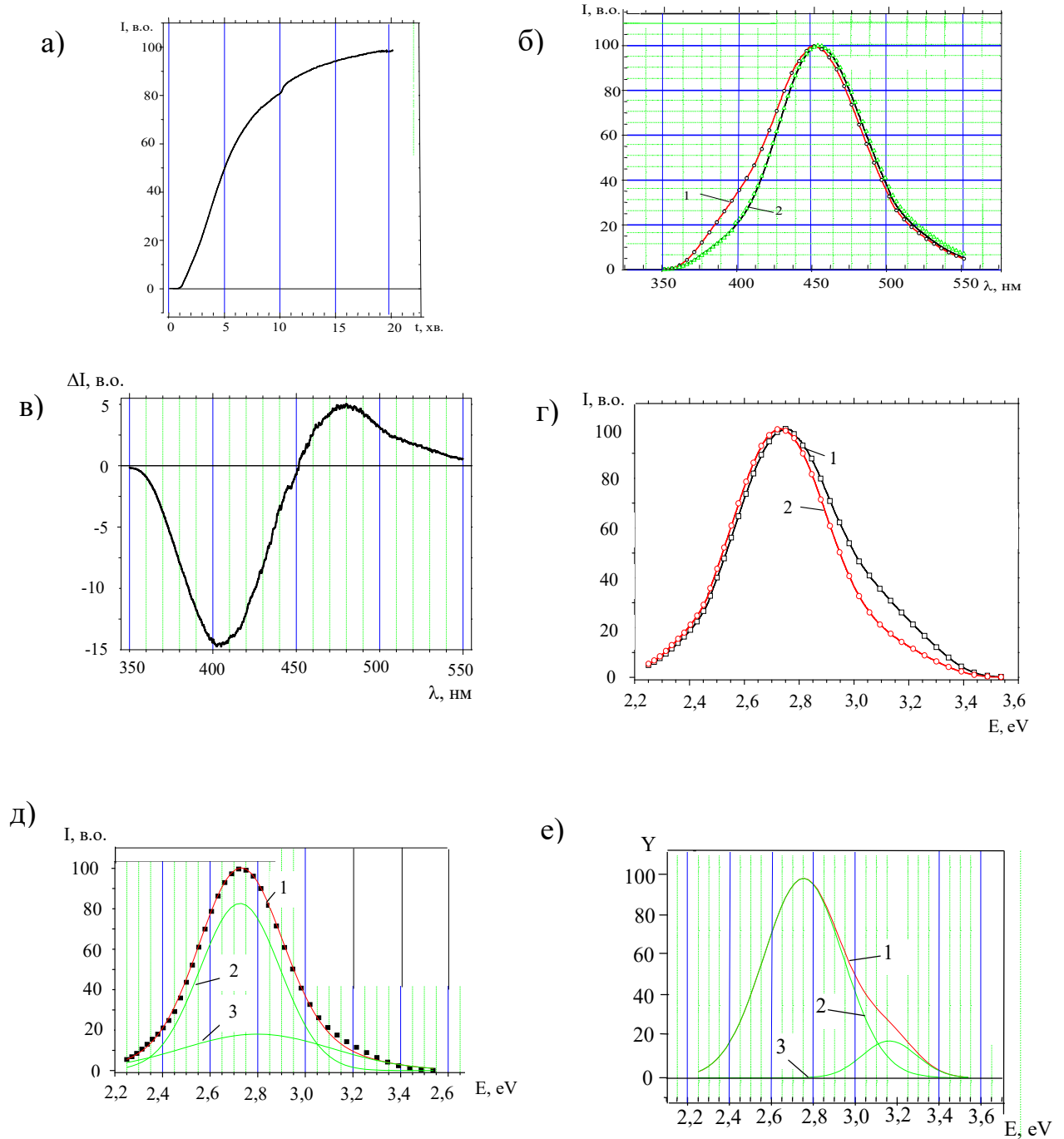


Рисунок 1.7 – Графічне відображення основних характеристик роботи сканувальної ЕПТ високої роздільної здатності

Додатково встановлено, що при проектуванні ТСМ, який працює в УФ діапазоні спектра випромінювання, необхідно враховувати нерівномірну чутливість ФЕП, яка може значно змінити нормовану за амплітудою характеристику вихідного сигналу зображення досліджуваного МО. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що

розроблена ЕПТ може бути придатна до використання в ультрафіолетовій мікроскопії. Розроблено вимоги до такої трубки стосовно її спектра свічення, роздільної здатності, мінімально необхідної яскравості, допустимого шуму люмінофора.

1.4. Визначення вимог до перетворювача світло-сигнал у телевізійному сканувальному мікроскопі

З точки зору забезпечення ефективності використання випромінюваного світлового потоку важливе значення має коректний вибір типу перетворювача світло-сигнал. Препарати досліджуються шляхом опромінення їх ультрафіолетовими променями в області довжин хвиль 250 - 400 нм з подальшим перетворенням світла, що проходить, та відбитого світла в електричний сигнал за допомогою перетворювача світло-сигнал. У зв'язку з малими значеннями величин світлових потоків перетворювачі повинні мати високу чутливість. Цей параметр і обумовив вибір типу перетворювачів – фотоелектронні помножувачі ФЕП. При використанні ультрафіолетового спектра першим критерієм відбору взято спектральну характеристику фотокатода. З конструктивних міркувань бажано мати перетворювач з рівномірною чутливістю в усьому діапазоні випромінювання від 250 нм до 700 нм. Аналіз перетворювачів, поширених на теренах країн СНД, показав, що немає ні одного перетворювача, який би перекривав згаданий вище діапазон при достатній рівномірності чутливості [2]. Тому аналіз перетворювачів зосередився на виборі тих з них, які перекривають певні смуги спектра при максимальній чутливості.

Найближчий діапазон спектральної характеристики перетворювача світло-сигнал до максимуму поглинання має перетворювач типу ФЭУ-116 з діапазоном спектральної характеристики 200 – 365 нм, максимальна спектральна чутливість якого лежить в межах 260 – катода 300 нм. Також, близьку до максимуму поглинання 260 нм має спектральна характеристика

ФЭУ-99, діапазон спектральної характеристики якого лежить в межах 150 – 320 нм, максимум чутливості – в межах 220 – 260 нм та ФЭУ-133 – з діапазоном спектральної характеристики 145 – 365 нм і максимумом чутливості 220 – 260 нм.

Ближчі до видимого спектра випромінювання - ФЭУ-27, ФЭУ-88 та ФЭУ-112, діапазони спектральних характеристик яких, відповідно, лежать в межах: 320 – 750 нм, максимальна спектральна чутливість в діапазоні 480 – 550 нм; 300 – 800 нм, максимальна спектральна чутливість 420 - 550нм; 400 – 1200 нм, максимальна спектральна чутливість 650 – 850 нм. Чутливості фотокатодів вище згаданих ФЕП, відповідно, складають 30 А/лм, 10 А/лм та 10 А/лм при однаковій напрузі живлення [2].

Такий підхід у виборі фотоперетворювачів за трьома зонами видимого спектра доцільний ще і з точки зору можливого синтезу кольорового зображення на моніторі, через попередній спектральний аналіз світла, яке проходить крізь препарат або відбитого від нього. Крім того, в люмінесцентних дослідженнях при використанні “маркерів”, які мають різні кольори свічення і різну спорідненість до певних типів білків, доцільно разом з використанням вузько-смугового оптичного фільтра використовувати і відповідний ФЕП для впевненої індикації незначної люмінесценції “маркера”.

Проведений аналіз показав, що в ТСМ необхідно передбачити оперативність заміни ФЕП з врахуванням його електричного режиму роботи залежно від поставлених дослідницьких задач, що вимагає ускладнення конструкції певних вузлів мікроскопа. Оптимальним варіантом було б використання одного ФЕП з широкою і рівномірною спектральною характеристикою.

Аналіз каталогу фірми “Hamamatsu” [108 112], провідного виробника ФЕП за кордоном, показав, що близьким до наших вимог є ФЕП типу R3896 (рис. 1.8), який працює в діапазоні довжин хвиль від 185 нм до 900 нм, і при цьому чутливість фотокатода змінюється від 60 мА/Вт до 92 мА/Вт., а анодна чутливість знаходиться в межах 5000 А/лм. При однакових напругах живлення

ФЕП R3896 на порядок перевищує аналогічні параметри зразків з каталогів, проаналізованих вище.

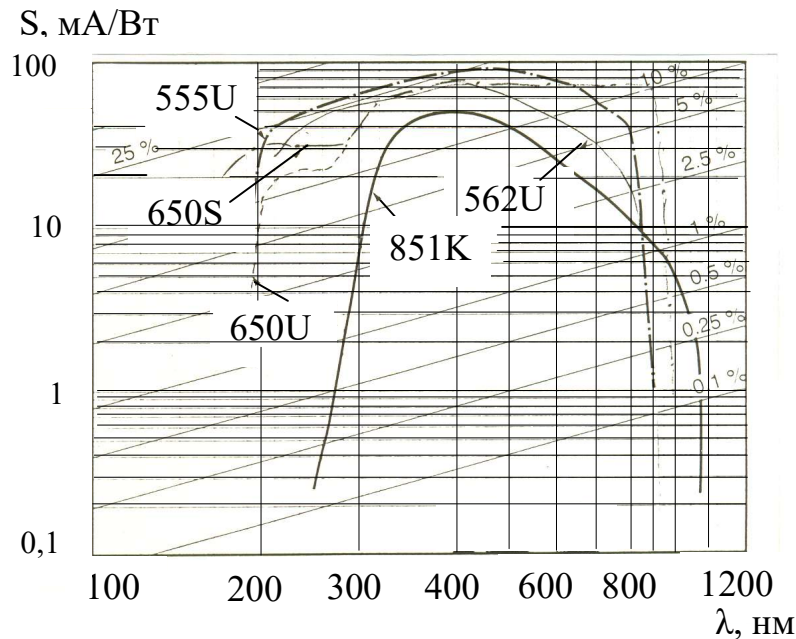


Рисунок 1.8 – Спектральна залежність чутливості фотокатода 555U фотоелектронного помножувача R 3896 виробництва фірми “Hamamatsu”.

При виборі ФЕП доцільно керуватися такими міркуваннями:

- узгодження ФЕП з джерелом випромінювання. Спектральна характеристика ФЕП не плоска. Слід вибирати такий ФЕП, щоб отримати максимально можливу ефективність. Якщо спектральний склад випромінювання має ширші межі за довжинами хвиль, ніж потрібний діапазон, який контролюється за допомогою ФЕП і має велику чутливість в цьому спектральному діапазоні, то слід встановлювати відсікаючі фільтри з метою усунення помилок реєстрації і зменшення шуму;

- поріг чутливості. Для системи реєстрації світла існує мінімальна світлова енергія, яка реєструється і визначається шумом та ефективністю ФЕП. При реєстрації дуже слабких світлових потоків не можна нехтувати флуктуаціями випромінювання, тому такі потоки важко реєструвати точно;

- час наростання. Якщо на ФЕП приходить світло у вигляді імпульсу, то для точного відтворення форми вхідного світлового сигналу найважливішим

параметром є час наростання сигналу на виході ФЕП. Слід скерувати увагу не тільки на постійну часу ФЕП, але і на робочу напругу та параметри електронної схеми;

– максимальний вихідний сигнал. Кожен фотоперетворювач має свій граничний вихідний струм або напругу. Фотоперетворювач завжди краще використовувати при нижчому рівні вихідного сигналу, ніж вказаний у його паспорті максимальний вихідний сигнал.

Якщо потрібно отримати найбільшу можливу чутливість ФЕП, тоді як підсилювач сигналу необхідно використовувати витоковий або емітерний повторювач. Нехай величина еквівалентного опору навантаження ФЕП – R , а необхідна смуга пропускання сигналу використовуваного підсилювача – Δf , то флуктуації на виході ФЕП будуть

$$\langle I_f^2 \rangle = 2e \cdot I_0 \cdot \Delta f \cdot M^2, \quad (1.6)$$

де M – загальне підсилення ФЕП. Як відомо, теплові шуми вхідного опору рівні $4k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f$ і повинні бути менші, ніж шуми ФЕП, що приводить до нерівності:

$$2e \cdot I_0 \cdot \Delta f \cdot M^2 \cdot R^2 \geq 4k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f, \quad (1.7)$$

звідки

$$M^2 \geq 0,05 / I_0 R \quad (1.8)$$

при кімнатній температурі. Нехай, наприклад, струм фотокатода $I_0 = 10^{-15} \text{А}$, при еквівалентному опорі навантаження $R = 10^6 \text{ Ом}$, внаслідок вхідних струмів, мінімальне підсилення помножувача $M = 7000$, тоді влаштовує ФЕП з підсиленням 10000. Сам підсилювач при цьому повинен мати підсилення, достатнє для того, щоб підсилені ним шуми ФЕП не перевищували флуктуації у всій наступній апаратурі. Якщо є можливість ФЕП охолоджувати, тоді I_0 зменшується. При цьому необхідно збільшувати число каскадів множення у ФЕП при відповідному значенні опору навантаження R .

З аналізу (1.8) видно, що струм з останнього динода не повинен перевищувати значення $\sim 10^{-7} \text{А}$ (0,1 мкА), якщо ФЕП має лінійну

характеристику. Таким чином, при використанні ФЕП з великим числом каскадів швидко досягається верхня границя вимірюваного світлового потоку. Якщо ж використовується ФЕП з порівняно малим числом каскадів, то можна вимірювати значно більші інтенсивні світлові потоки без перевищення гранично допустимого значення струму останнього динода. З цим же ФЕП можна спостерігати дуже слабкі світлові потоки, якщо застосувати вхідний опір підсилювача дуже великої величини, наприклад 10^8 Ом. Однак, при цьому верхня гранична частота сигналу, визначена відповідно до (1.33), при ємності вхідного каскаду рівній 20 пФ не перевищуватиме 80 Гц, що не відповідає телевізійному стандарту, який потребує верхньої граничної частоти сигналу не менше 6,5 МГц.

Далі визначимо величину помноження, яка необхідна для використання максимальної чутливості фотокатода. Припустимо, що вторинна електронна емісія дозволяє проводити точні вимірювання фотострумів без внесення додаткових динодів ФЕП. Тоді сигнал $I_\phi = M I_\phi$. Якщо стороння компонента струму фотокатода є i , то на виході ФЕП вона проявиться у вигляді фонового струму $I = M i$. Нехай I_ϕ – компонента сигналу у фотокатоді i , I_ϕ – ця ж компонента на виході. Дробові шуми на виході будуть

$$M \cdot \sqrt{2e \cdot (i + I_\phi) \cdot \Delta \cdot f}, \quad (1.9)$$

і відношення

$$\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} = \frac{M I_\phi}{M \sqrt{2e \cdot (i + I_\phi) \cdot \Delta f}} = \frac{I_\phi}{\sqrt{2e \cdot (i + I_\phi) \cdot \Delta f}}. \quad (1.10)$$

З виразу (1.10) видно, що коефіцієнтом помноження M можна знехтувати, і що відношення сигнал/шум зростає (тобто вимірювання стають точніші) при наступних умовах:

1. Коли I_ϕ найбільше, тобто, коли при даному світловому потоці квантовий вихід фотокатода найбільший. Добре відомо, що у ФЕП фотокатоли з найбільшим квантовим виходом дозволяють вимірювати найслабші світлові потоки. Величина помноження, яка створюється динодами, сюди не входить;

необхідно тільки, щоб вона була достатньо велика для того, щоб можна було знехтувати тепловими шумами в опорі навантаження порівняно з дробовим ефектом фотокатода.

2. Коли струм i найменший. Тому зменшення струму i (наприклад, шляхом охолодження ФЕП) дає велику перевагу. Але струм може збільшуватися за рахунок фотострумів, які викликані стороннім освітленням. Важко звести до мінімуму попадання на ФЕП фону світла. У протилежному випадку характеристики ФЕП істотно погіршуються, оскільки стороннє світло викликає додаткові шуми у вихідному сигналі. Важливо також, щоб декілька перших диодів не давали істотних термоіонних струмів. У цьому одна з переваг диодів, виготовлених з магнієво-срібних сплавів, оскільки їх термоіонна емісія незначна.

3. Коли необхідна смуга попускання сигнального тракту Δf найменша. Збільшення відношення сигнал/шум може бути достатньо ефективно досягнуто за допомогою зменшення Δf , тобто збільшенням постійної часу вимірювальної схеми.

Досліджувався також вплив режиму живлення на стабільність роботи ФЕП. Знайдено, що при рівномірному дільнику середньоквадратичне відхилення завжди більше пуасонівського і значно збільшується із збільшенням U_a . Для дільника з стабілізованими напругами між фотокатодом та першим і другим диодом отримано середньоквадратичні відхилення, наближені до пуасоновських і мало залежні від U_a . Враховуючи ці особливості живлення ФЕП, які використовуються в режимі слабого сигналу, пропонується застосувати дільник напруги живлення ФЕП, схема якого показана на рис. 1.9.

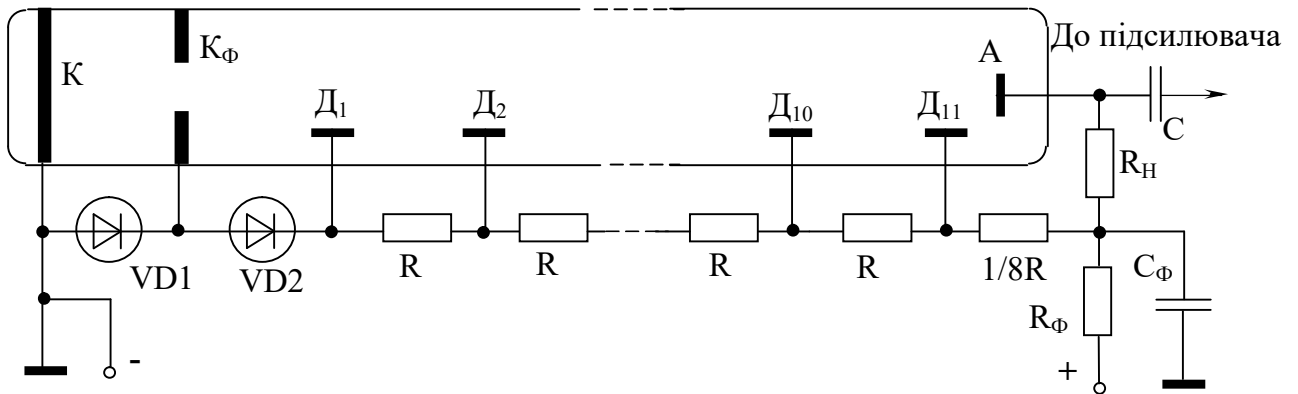


Рисунок 1.9 – Рекомендована схема дільника напруги живлення ФЕП для відліку фотонів

Використовуючи стабілітрони типу КС650 або КС680А для VD1 та VD2, між катодом, діафрагмою і першим динодом при менших напругах U_a можна досягти ефективного збирання і фокусування фотоелектронів. Зменшення опору між останнім динодом і анодом суттєво знижує іонний та оптичний зворотний зв'язок і підвищує стабільність роботи ФЕП. Застосування фільтра $R_\phi C_\phi$ в ланці живлення анода ФЕП різко збільшує завадостійкість системи ФЕП-підсилювач.

+В роботах [11, 31] показано, що наявність великих електричних полів в області катода може призвести до зниження його чутливості, збільшення темного сигналу і його нестабільності. Тому запропонована схема дільника з заземленим катодом позбавляє цієї небезпеки.

Висновки до розділу 1

В результаті проведених досліджень встановлено:

1. Телевізійні сканувальні мікроскопи порівняно з оптичними, камерними, лазерними та електронними мікроскопами мають низку переваг при дослідженні мікрооб'єктів, і, в першу чергу живих біологічних об'єктів, які полягають в значно меншій потужності освітлення досліджуваного об'єкта, що дозволяє досліджувати живі мікрооб'єкти без шкідливого впливу на них за рахунок освітлення.

2. Телевізійні сканувальні мікроскопи при використанні для джерела освітлення електронно-променевої трубки високої роздільної здатності

дозволяють масштабувати зображення досліджуваного об'єкта без втрати його роздільної здатності внаслідок зміни розмірів сканувального растра.

3. Використання для освітлення досліджуваного об'єкта електронно-променевої трубки зі свіченням екрана в ультрафіолетовому діапазоні розширить його функціональні можливості та збільшить роздільну здатність формованого зображення. Розроблено вимоги до такої електронно-променевої трубки.

4. Визначено основні вимоги до оптичного каналу телевізійного сканувального мікроскопа та досліджено спектральні характеристики перетворювачів випромінювання-сигнал з точки зору забезпечення ефективності використання випромінюваного потоку.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СКАНУВАЛЬНОГО МІКРОСКОПА

2.1. Забезпечення стійкості перетворювачів напруга-струм з комплексним навантаженням

Основним завданням перетворювачів напруга-струм (ПНС) з комплексним навантаженням є прецизійне формування струму в індуктивному навантаженні відповідно до вхідного сигналу [1, 2]. Для забезпечення високої точності перетворення вхідної напруги сигналу у вихідний струм навантаження використовується глибокий від'ємний зворотний зв'язок (ВЗЗ) за струмом. Сигнал ВЗЗ формується на прецизійному резисторі, ввімкненому послідовно з індуктивним навантаженням [22]. Глибокий ВЗЗ може стати причиною порушення стійкості роботи ПНС у всьому динамічному діапазоні роботи, або в окремих випадках при поданні сигналу прямокутної форми, або – сигналів, fronti яких є значно коротшими від періоду сигналу [1, 6]. Додаткової складності для забезпечення стійкості надає комплексний характер навантаження. За межами середніх частот (понад 30 кГц) коефіцієнт передачі визначається індуктивністю навантаження та опором резистора формування сигналу зворотного зв'язку [53], коефіцієнт зворотного зв'язку перестає зберігати дійсне значення і стає комплексним. Фаза напруги сигналу ВЗЗ починає змінюватися і дія ВЗЗ, направлена на забезпечення заданих параметрів, зменшується [92]. При досягненні великих фазових зсувів в колі підсилювача ПНС та індуктивному навантаженні на певних частотах ВЗЗ стає додатним, що приводить до значного спотворення вихідного сигналу та погіршення основних параметрів ПНС, в гіршому випадку – до самозбудження [6, 54]. Оскільки підсилювач ПНС має обмежену смугу пропускання частот, то модуль його петльового підсилення (βK) на високих частотах проходить одиничне підсилення, спадаючи до нуля. Для визначення стійкості ПНС у частотній

області необхідно дослідити поведінку частотної характеристики ($\beta K(j\omega)$) в частотній площині в околі точки $(-1, j\omega)$ [1, 6, 56].

Проаналізуємо методи визначення стійкості ПНС з глибоким ВЗЗ. На стійкість ПНС впливають коефіцієнт підсилення його підсилювача без врахування дії ВЗЗ, глибина зворотного зв'язку, стала часу індуктивного навантаження τ_H . Оскільки коефіцієнт підсилення підсилювача без врахування дії ВЗЗ та коефіцієнт передачі кола індуктивне навантаження – резистор формування сигналу ВЗЗ залежать від частоти, то ПНС з навантаженням створюють операційну систему як мінімум другого порядку, яка може бути лише умовно стійкою [13, 29].

Розглянемо критерій стійкості Найквіста на реальних діаграмах Бode для ПНС [17]. На рис. 2.1, а у вигляді інерційної ланки з частотою злomu F_P , частотою одиничного підсилення F_T . Для індуктивного навантаження характерними є частота впливу комплексного навантаження F_{HL} та власна резонансна частота комплексного навантаження F_{HP} . Сумарна амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) перетинає вісь частот в точці F_{II} зі швидкістю, близькою до -40 дБ/дек (рис. 2.1,б). Сумарна фаза в точці F_{II} наближається до 180° , що свідчить про схильність системи до самозбудження. Застосування резистора шунтування індуктивного навантаження дозволяє змінити сумарну АЧХ таким чином, що вона перетинає вісь частот зі швидкістю, близькою до -20 дБ/дек (рис. 2,а), а фаза в критичній точці віддаляється від величини -180° в сторону збільшення запасу стійкості за фазою Φ_M , під якою будемо розуміти доповнення до кута -180° фазового кута підсилення на частоті F_{II} .

$$\Phi_M = -\arctg(F_{II} / F_P) - \arctg(F_{II} / F_{HL}) + 180^\circ. \quad (2.1)$$

Якщо $F_P \ll F_{II}$ та $F_{HL} \ll F_{II}$, що майже завжди виконується з використанням у вхідних колах ПНС операційних підсилювачів, то крутий спад характеристики петльового підсилення βK приводить до стану на грані самозбудження з нульовим запасом за фазою Φ_M [86].

Другий параметр, який характеризує стійкість – запас стійкості операційної системи за підсиленням B_M , величина обернена до модуля петльового підсилення на частоті F_{Π} , при якій досягається фазовий кут 180° :

$$B_M = 1/|\beta K(F_{\Pi})| \text{ при } \arg \beta K(jF_{\Pi}) = 180^\circ. \quad (2.2)$$

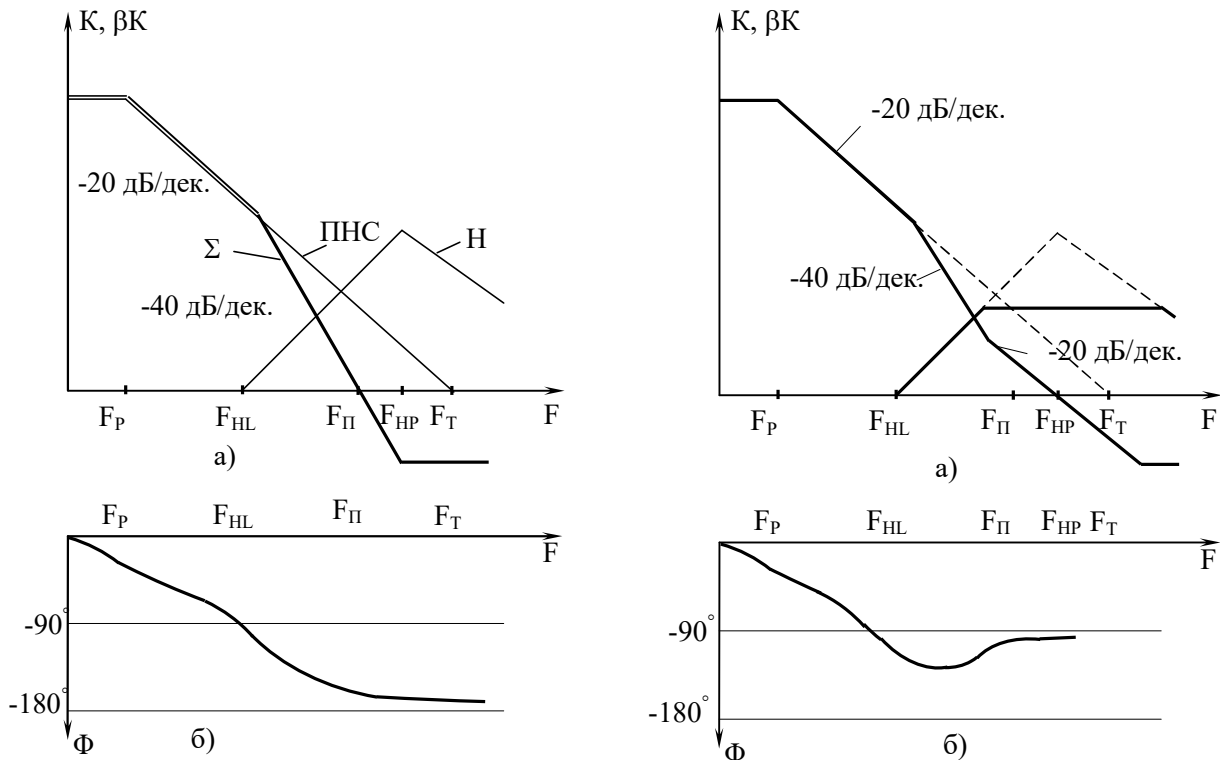


Рисунок 2.1 – АЧХ (а) і ФЧХ (б) ПНС з комплексним навантаженням

Рисунок 2.2 – АЧХ (а) і ФЧХ (б) ПНС з навантаженням та використанням резистора шунтування

Додатний запас стійкості за фазою ($\Phi_M > 0$) означає стійкий ПНС, від'ємний або нульовий запас ($\Phi_M \leq 0$) – нестійкий. Запас за фазою $\Phi_M > 45^\circ$ слід розглядати як добрий, а $\Phi_M > 30^\circ$ – як задовільний. Аналогічно запас стійкості за підсиленням $B_M > 1$ відповідає стійкій операційній системі.

Аналіз системи другого порядку показує, що відповідний коефіцієнт передачі можна подати у такому вигляді [29]:

$$G = G_{\text{Д}} / (1 + 2\xi p / \omega_{\Pi} + p^2 / \omega_T^2) \quad (2.3)$$

з власною частотою коливань

$$\omega_{\Pi} = \sqrt{\omega_T \cdot \omega_{HL}} \quad (2.4)$$

та коефіцієнт вгамівності

$$\xi = (1/2)\sqrt{(\omega_{HL} / \omega_T)} \quad (2.5)$$

де G та G_{ID} – реальний та ідеальний коефіцієнти передачі;

p – комплексна частота, $p = j\omega$;

ω_{HL} – колова частота, яка визначається виразом $\omega_{HL} = R_{33} / L_H$;

R_{33} – опір резистора формування сигналу ВЗЗ.

При проектуванні реальних ПНС необхідно враховувати, що їх складно подати у вигляді одного еквівалентного каскаду з частотами F_{II} та F_T . Як правило, ПНС реалізуються за трикаскадною або -більше схемою, що викликає додаткові спотворення АЧХ та, відповідно, ФЧХ реального ПНС, що важко піддається врахуванню при визначенні запасу стійкості. Тому апріорі при проектуванні ПНС необхідно брати до уваги, щоб частоти злому АЧХ знаходились вище частот F_T та F_{HP} . Крім того, режими роботи всіх каскадів необхідно вибирати таким чином, щоб напівпровідникові прилади, які використовуються, не потрапляли в режим насичення, що додатково може різко погіршити стійкість ПНС.

При визначенні стійкості можна використати критерій Михайлова [6, 57, 58]. Для цього необхідно вивести диференційне рівняння замкнутої системи та представити його в операторній формі $D(p)I_{HL}=0$. Однак цей метод важко реалізувати для реального пристрою, тому його можна подати в спрощеному вигляді системою третього чи четвертого порядку. Відомий також критерій Рауса-Гурвіца [13], який дозволяє зробити висновок про стійкість замкнутої системи за допомогою дослідження коефіцієнтів характеристичного рівняння, але він не дає ніяких відомостей про фазу та підсилення. Тому для визначення запасу стійкості найбільш доцільно в практичній роботі застосовувати критерій стійкості Найквіста при його графоаналітичній реалізації.

Проаналізуємо стійкість ПНС, реалізованих з використанням операційних підсилювачів. У роботі [80] аналізується схема, яка представлена однією еквівалентною RC-ланкою. В цьому ПНС застосовано операційний підсилювач з внутрішньою корекцією, а вихідний підсилювач представлений настільки широкосмуговим, що не вносить ніяких додаткових перекорень.

Таке представлення допустиме лише для ПНС, комплексне навантаження яких має дуже малу індуктивність (як правило, $L < 20 - 30$ мкГн), малий рівень максимальних струмів (до $0,05 - 0,1$ А) та великий опір резистора, на якому формується сигнал ВЗЗ ($20 - 50$ Ом). Це можливо при формуванні струмів у котушках корекції фокусувально-відхилювальних комплексів електронно-променевих трубок надвисокої роздільної здатності.

Для формування сканувального растра на екрані електронно-променевої трубки надвисокої роздільної здатності використовують котушки відхилення з індуктивністю 100 мкГн. Максимальний струм відхилення для таких котушок відхилення ± 4 А, а в ПНС необхідно застосувати додаткові проміжні каскади, які забезпечують необхідний коефіцієнт підсилення, що вимагає аналізу еквівалентної схеми підсилювача з великим числом еквівалентних RC -ланок.

У [29] розглядається стійкість систем другого порядку, однак проведений в ній аналіз доволі складний і важкозастосовуваний на практиці при представленні ПНС двома еквівалентними RC -ланками і еквівалентною схемою навантаження у вигляді LRC -контуру.

Тому для аналізу стійкості ПНС використовуємо метод, запропонований в роботі [69]. Відповідно до цієї методики для індуктивності навантаження $L_{H1} = 100$ мкГн (рис. 2.3,а) та $L_{H2} = 1500$ мкГн (рис. 2.4,а):

1. Будуємо АЧХ ПНС (залежності 1). Для цього необхідно знати загальний коефіцієнт підсилення K_0 в області низьких частот без урахування дії ВЗЗ і частоти зрізу F_{E1} і F_{E2} еквівалентних ланок відповідних каскадів ПНС.

2. Будуємо АЧХ навантаження. При цьому необхідно враховувати резонансну частоту навантаження $F_{HP} = 1/2\pi \cdot \sqrt{L_H C_H}$ і частоту впливу навантаження на коефіцієнт передачі сигналу до резистора формування сигналу зворотного зв'язку $F_H = R_{33} / 2\pi \cdot L_H$ (залежності 5).

3. Будуємо шляхом сумування загальну АЧХ ПНС (залежності 2). Якщо швидкість спаду АЧХ в межах -20 дБ $< K < +20$ дБ більше -20 дБ/дек., то ПНС схильний до самозбудження. В зв'язку з цим необхідно застосувати активний шунт R

$$R_{Ш} \leq \rho \cdot F_{Ш} / F_{КР}, \quad (2.6)$$

де $\rho = \sqrt{L_H / C_H}$ – характеристичний опір індуктивного навантаження,

$F_{Ш}$ – частота, яка визначається перетином АЧХ підсилювача з віссю, відповідно до $K = 20$ дБ (залежності 2.3 і 2.4).

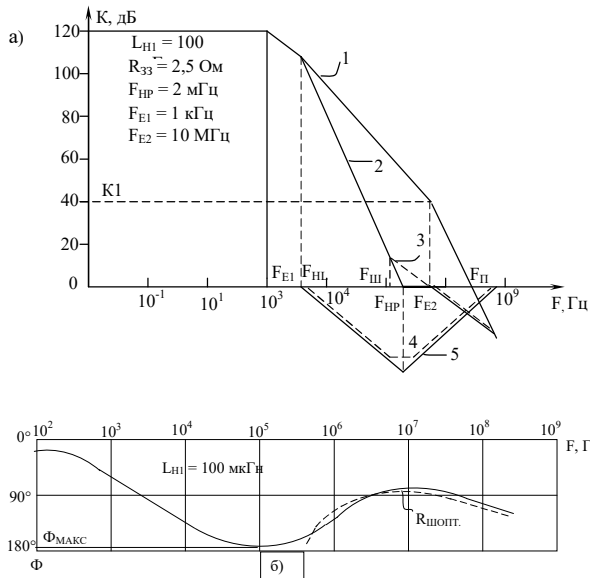


Рисунок 2.3 – АЧХ і ФЧХ ПНС для визначення стійкості при індуктивності навантаження $L_{H1} = 100$ мкГн

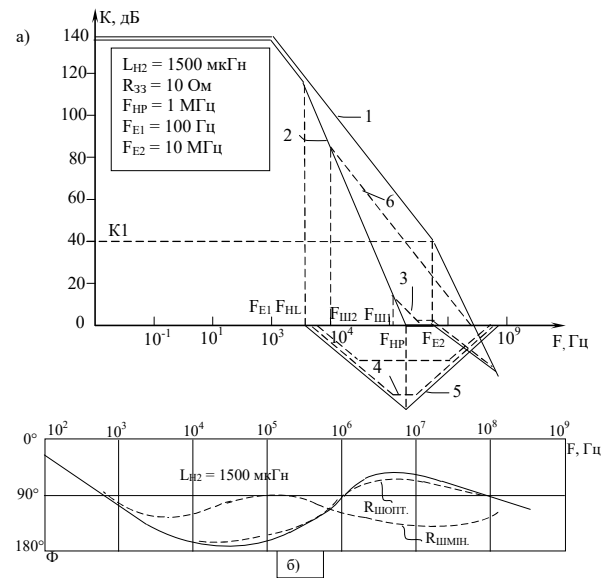


Рисунок 2.4. – АЧХ і ФЧХ ПНС для визначення стійкості при індуктивності навантаження $L_{H2} = 1500$ мкГн

4. Будуємо ФЧХ ПНС згідно з виразом:

$$\Phi = \sum_{P=1}^n \arctg(F / F_P) - \sum_{Z=1}^n \arctg(F / F_Z), \quad (2.7)$$

де n – кількість відповідних згинів.

5. Перевіряємо запас стійкості за фазою і запас стійкості за амплітудою.

На рис. 2.3,б та 2.4,б наведено ФЧХ ПНС при індуктивності $L_{H1} = 100$ мкГн (рис. 2.3,б) і $L_{H2} = 1500$ мкГн (рис. 2.4,б). З рисунків видно, що при оптимальному шунтуванні відбувається незначне покращення ФЧХ (незначне покращення запасу стійкості за фазою). Сильне шунтування (рис. 2.4,б) значно

збільшує запас стійкості за фазою, однак погіршує швидкодію встановлення струму при роботі каскадів підсилювача в лінійному режимі.

Якщо при аналізі величини запасу стійкості за фазою виявиться, що вона недостатня, то необхідно збільшувати частоти F_{E1} . Для цього використовують спеціальну корекцію операційного підсилювача (так звана корекція “вперед”) [68, 94], яка дозволила б зменшити фазові спотворення операційного підсилювача в діапазоні частот 1 кГц – 10 кГц. На рис. 2.4 наведено АЧХ і ФЧХ ПНС при індуктивності навантаження 1500 мкГн для випадку корекції операційного підсилювача “вперед”. Частота корекції операційного підсилювача, глибина корекції вибрана таким чином, щоб остаточний коефіцієнт підсилення в області низьких частот (10 Гц – 1 кГц) був не менше 80 дБ. Порівняльний аналіз фазових характеристик (див. рис. 2.3,б і рис. 2.4,б) показує, що запас стійкості за фазою збільшився з 18° – без корекції “вперед” і до 50° – з корекцією.

Необхідно відзначити, що з використанням корекції “вперед” потрібно враховувати також погіршення швидкодії при встановленні струму з великою динамічною точністю. Однак, вона може бути незначною через відсутність необхідності шунтування індуктивного навантаження резистором шунтування $R_{ш}$. У наведеному прикладі при динамічній похибці $\varepsilon_D < 0,01\%$ час встановлення майже не зменшується внаслідок того, що $K \approx 80$ дБ.

Аналіз різних варіантів побудови ПНС показує, що частоту F_{E2} необхідно вибирати з умови $F_{E2} \approx (5 - 8) F_{HP}$. При реалізації його за трьохкаскадною схемою необхідно, щоб частота третього каскаду відповідала залежності:

$$F_{E3} > [(3 \div 5)K_0 \sqrt{K1} / K1] F_{HP}, \quad (2.8)$$

де $K1$ – коефіцієнт підсилення підсилювача за частотою F_{E2} . Необхідно також відзначити, що надмірне шунтування може призвести до самозбудження ПНС (залежність б на рис. 2.4,а).

При поданні на вхід одиничного стрибка з амплітудою E_C при роботі всіх каскадів ПНС у лінійному режимі напруга на резисторі формування сигналу ВЗЗ буде змінюватися за законом [68]

$$U_{33}(t) = E_C[a(1 - e^{-\omega_1 t}) + b(1 - e^{-\omega_2 t})], \quad (2.9)$$

де ω_1, ω_2 – частоти, які відповідають розташуванню полюсів АЧХ ПНС.

$$\omega_1, \omega_2 = (\omega_P / 2\omega_Z) \cdot [(\omega_T + \omega_Z \pm (\omega_T - \omega_Z) \cdot \sqrt{1 + 4(1 - \omega_Z / \omega_P)\omega_T \cdot \omega_Z / (\omega_T - \omega_Z)^2})] \quad (2.10)$$

Додаткові коефіцієнти a та b визначаються відповідно до виразів

$$a = (K_1 - K) / (K_1 - 1); \quad b = 1 - a, \quad (2.11)$$

де K_1 – коефіцієнт підсилення на частоті дублету,

K – коефіцієнт відносного розділення дублету, $K = \omega_P / \omega_Z$.

Для забезпечення стійкої роботи ПНС необхідно, щоб частоти, які відповідають розташуванню полюсів АЧХ відповідали умові:

$$1 + 4(1 - \omega_Z / \omega_P) \cdot \omega_T \cdot \omega_Z / (\omega_T - \omega_Z) \geq 0. \quad (2.12)$$

Оскільки на практиці, як правило, виконується умова $\omega_T \gg \omega_Z \gg \omega_P$, то для забезпечення стійкої роботи необхідно, щоб частота зламу АЧХ ω_Z відповідала виразові $\omega_Z < 0,5\sqrt{\omega_T \omega_P}$. Підставляючи значення $2\pi\omega_T$ замість $F_{Ш}$ у вираз (6), можна визначити оптимальне значення величини шунтуючого резистора $R_{Ш}$, який забезпечує стійку роботу ПНС.

2.2. Гранична швидкість переміщення сканувального елемента в телевізійному сканувальному мікроскопі

Швидкодію ТСМ при дискретному методі формування сканувального растра визначають часом, який необхідний для виведення сканувального елемента в точку з заданими координатами, необхідною тривалістю імпульсу підсвічування плями, часом перетворення світлового сигналу в електричний, часом обробки сигналу і часом введення інформації в ПК [73]. Тривалість імпульсу підсвічування, час перетворення сигналу та час обробки сигналу в

сумі не перевищують 0,5–1 мкс, а час виведення променя залежно від переміщення світної плями по екрану може знаходитися в межах від 1 до декількох сотень мкс. У зв'язку з цим швидкодія ТСМ при дискретному способі формування растра в основному визначається ПНС [63]. Для забезпечення необхідної стабільності розміщення світної плями на екрані ЕПТ при проектуванні ПНС зменшують величини струмів, необхідних для відхилення плями з центра на край екрана ЕПТ. Це призводить до збільшення індуктивності котушок відхилення, що, своєю чергою, зменшує швидкодію через те, що час встановлення струму в індуктивному навантаженні прямопропорційний величині індуктивності. Тому при проектуванні ПНС шукають оптимальні шляхи підвищення швидкодії при збереженні заданої стабільності.

Час встановлення струму, який відповідає максимальному переміщенню променя, в прецизійних перетворювачах напруга-струм складає 100 – 400 мкс, а час встановлення струму, який відповідає переміщенню променя по екрану ЕПТ на віддаль, що становить 5–10% від максимального розміру, дорівнює 20 – 40 мкс [12, 14]. При цьому час введення одного елемента зображення із ТСМ в ПК знаходиться у межах 0,3–1 мкс. Тому проектування і застосування швидкодіючих прецизійних ПНС зі збереженням стабільності і точності позиціонування світної плями на екрані ЕПТ вважають основним завданням для підвищення ефективності використання ТСМ [63].

Особливо важливими є технічні параметри і характеристики застосовуваних котушок відхилювальних систем і ПНС, оскільки в основному від них залежить якість отриманого зображення досліджуваного МО та швидкість його введення в ПК. При цьому відхилювальні системи повинні забезпечувати: необхідну роздільну здатність по всьому робочому полю формування растра на екрані ЕПТ, його мінімальні геометричні перекручення при малих втратах потужності на відхилення променя та при заданій швидкості переміщення світної плями, а ПНС – задану швидкість переміщення плями по

екрану ЕПТ; стабільність величини струму; точність перетворення вхідного сигналу розгортки у вихідний струм [63].

З наведеного вище зрозуміло, що такі технічні параметри ТСМ, як точність введення інформації в ПК, а також швидкодія і точність виведення інформації на екрані монітора визначаються технічними параметрами ПНС разом зі застосовуваними відхилювальними системами [60].

Однією з характерних особливостей ТСМ, побудованих на основі ЕПТ, є явище післясвічення екрана ЕПТ [73]. Якщо сканування здійснюється зі швидкістю, при якій за час післясвічення сканувальна світна пляма переміщується на віддаль, яка менша за власний діаметр, то явище післясвічення не накладає обмежень на властивості ТСМ. Виконання цієї умови можна забезпечити при дослідженні нерухомих об'єктів, якщо швидкість сканування зробити достатньо низькою, а для відтворення зображення на екрані монітора ПК без ефекту миготіння слід скористатися записом сигналу зображення у буферну пам'ять з порівняно низькою швидкістю та зчитувати цей сигнал з такою швидкістю, яка гарантує відсутність миготіння зображення на екрані монітора [54].

При дослідженні рухомих МО ТСМ повинен працювати в реальному масштабі часу, часто без використання буферної пам'яті. Для моніторів відома тенденція до підвищення частоти кадрової розгортки [54]. За таких умов час післясвічення, використовуваних в ЕПТ люмінофорів, може бути сумірним з часом переміщення світної плями на віддаль, яка перевищує її розмір, що може спричиняти специфічні спотворення відтворюваного зображення ДО, а саме: збільшення зони розмиття при відтворенні різких перепадів яскравості на межі білий фрагмент – чорний фрагмент (спотворення перехідної характеристики) та появу кольорних спотворень біля цієї межі [27].

Для аналізу цих спотворень використано модель, у якій світна пляма в площині ДО має форму квадрата з стороною δ і рівномірний розподіл яскравості B_0 . Процес сканування графічно представлено на рис. 2.5, а, де x – координата в площині ДО, у напрямку якої здійснюється сканування з

постійною швидкістю V . Межа переходу з білого (прозорого) елемента до чорного (непрозорого) збігається з координатою $x = 0$.

На рис. 2.5, б видно, як у цей момент часу розподілена яскравість вздовж осі x з урахуванням часу післясвічення, який є тим довший, чим триваліший час післясвічення. Починаючи з цього моменту часу, площа зони з яскравістю B_0 рівномірно зменшується, оскільки пляма перекривається чорним фрагментом об'єкта (рис. 2.5, в), яскравість сліду залишається незмінною, хоча сам слід переміщується у напрямку $+x$. Ця фаза триватиме до моменту часу t_1 , коли пляма повністю перекриється чорним фрагментом об'єкта (рис. 2.5, г). З цього моменту часу яскравість сліду починає зменшуватись і повністю зникає за час, рівний часові післясвічення люмінофора [26].

Часова залежність цієї напруги наведена на рис. 2.5, д. При $V = \text{const}$ між часовою координатою t та просторовою координатою x існує зв'язок: $x = V \cdot t$. Ділянка 1 показує сигнал, за відсутності післясвічення люмінофора. Сигнал стає рівним нулеві в момент часу $t_1 = \delta/V$. Це означає, що при відтворенні ДО на екрані монітора повинна з'явитися зона розмиття біло-чорного переходу, ширина якої пропорційна $\delta = V \cdot t_1$.

Ділянка 2 на тому ж рисунку показує зміну сигналу за наявності післясвічення люмінофора. Якщо післясвічення має експоненціальний характер, то і сигнал на цій ділянці змінюється експоненційно зі сталою часу вгамівності свічення люмінофора. Очевидно, що явище післясвічення призводить до додаткового збільшення зони розмиття.

Ефект кольорних спотворень можна пояснити тим, що біле свічення екрана ЕПТ забезпечується використанням суміші люмінофорів з червоним, синім та зеленим свіченням, які мають різну тривалість післясвічення [60]. Тоді експоненційна ділянка 2 на рис. 2.5, д перетвориться у три експоненти з різними сталими вгамівності [26]. Після загасання свічення люмінофора з найкоротшим післясвіченням колір обумовлюватиметься лише двома іншими люмінофорами, а після загасання люмінофора з середнім післясвіченням –

свіченням тільки люмінофора з найдовшим післясвіченням. Отож, до явища розширення зони розмиття додається явище розфарбовування цієї зони.

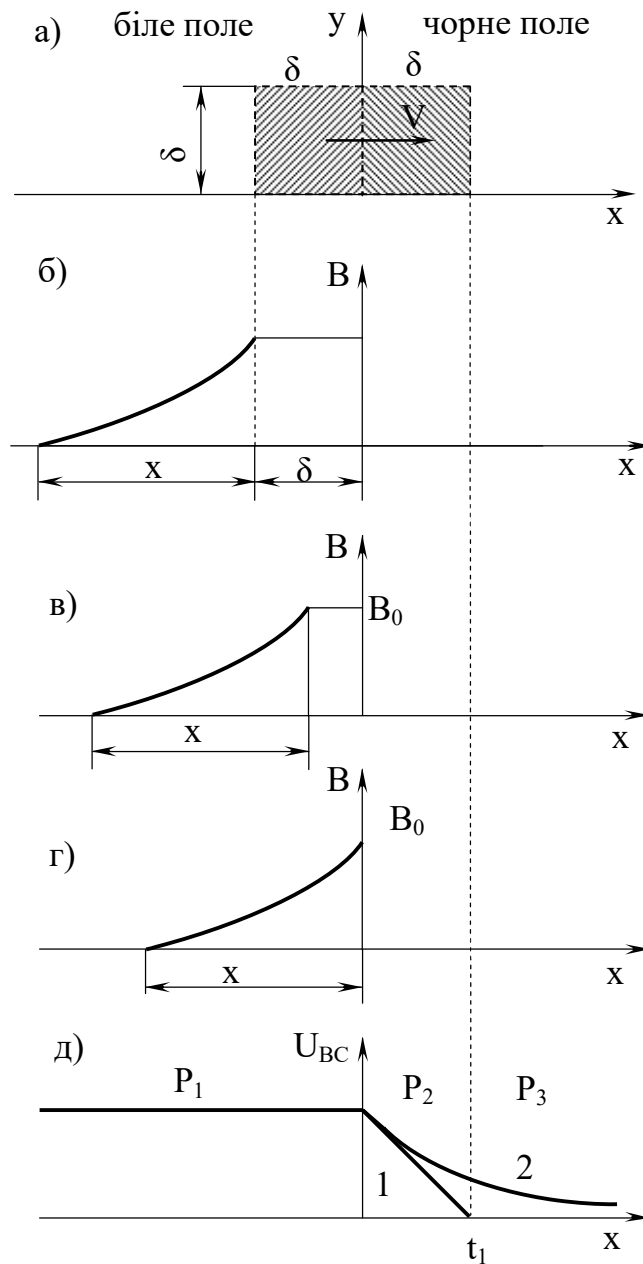


Рисунок 2.5 – До визначення спотворень, зумовлених післясвіченням люмінофора

Можна інтерпретувати описані вище явища аналітичними виразами з урахуванням трьох часових фаз формування відеосигналу (фазы P_1 , P_2 та P_3 на рис. 2.5, д). У фазі P_1 світловий потік $\Phi_{\Sigma 1}$, що сприймається ФЕП, складається з

потіку Φ_1 , зумовленого світною плямою з яскравістю B_0 і площею $S = \delta^2$, та потоку Φ_2 , зумовленим післясвіченням екрана. У фазі P_2 маємо потік $\Phi_{\Sigma 2}$, який складається з потоку Φ_2 , зумовленого післясвіченням, та потоку Φ_3 , зумовленого неперекриттям чорним фрагментом частини потоку від плями з яскравістю B_0 . У фазі P_3 маємо потік, зумовлений слідом від білої частини ДО.

Потік Φ_1 визначається таким виразом:

$$\Phi_1 = B_0 \cdot S \cdot \Omega = B_0 \cdot \delta^2 \cdot \pi D^2 / 4l^2, \quad (2.13)$$

де Ω – тілесний кут, у якому поширюється світловий потік до ФЕП;

D – вхідна зіниця оптичної системи ФЕП;

l – віддаль між вхідною зіницею оптичної системи ФЕП та ДО.

Потік Φ_2 визначено, скориставшись рис. 2.6, де на рис. 2.6, а показано слід у момент часу t_1 (пляма повністю перекрита чорним фрагментом), а на рис. 2.6, б – яскравість у межах сліду.

$$\Phi_2 = B_0 \cdot \delta \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot l^2} \cdot \exp(-t/\tau) \int_{-x}^0 \exp(x/V \cdot \tau) dx. \quad (2.14)$$

Якщо прийняти, що довжина сліду $x = 3 \cdot \tau \cdot V$, яка відповідає спадові яскравості до значення близько 5% від B_0 або, іншими словами, вважати, що Φ_2 частина світлового потоку від сліду у межах $-x > |x|$ є нехтовно малою, то після інтегрування отримаємо:

$$\Phi_2 = 0,3 B_0 \cdot \delta \cdot V \cdot \tau \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot l^2} \exp(-t/\tau). \quad (2.15)$$

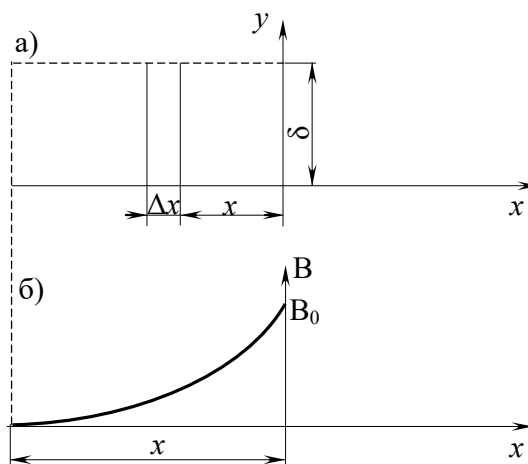


Рисунок 2.6 – До визначення світлового потоку від “сліду”

Отже, повний потік, що сприймається ФЕП, у першій фазі:

$$\Phi_{\Sigma 1} = \Phi_1 + \Phi_2 = B_0 \cdot \delta^2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot l^2} + 0,3 B_0 \cdot \delta \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot l^2} \cdot V \cdot \tau \cdot \exp(-t/\tau), \quad (2.16)$$

або, враховуючи, що цей потік маємо на момент часу $t = 0$, буде:

$$\Phi_{\Sigma 1} = B_0 \cdot \delta \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot l^2} \cdot (\delta + 0,3 \cdot V \cdot \tau). \quad (2.17)$$

Потік Φ_3 , необхідний для визначення повного потоку у фазі P_2 , знайдено, скориставшись рис. 2.7:

$$\Phi_3 = B_0 \cdot S \cdot \Omega = B_0 \cdot \delta \cdot (\delta - x) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot l^2} = B_0 \cdot \delta \cdot (\delta - V \cdot t) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot l^2}. \quad (2.18)$$

Очевидно, що формула справедлива тільки в межах часової фази P_2 , тобто при $t_1 \geq t \geq 0$. Отже, для повного світлового потоку у цій фазі отримаємо:

$$\Phi_{\Sigma 2} = B_0 \cdot \delta \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot l^2} \cdot [(\delta - V \cdot t) + 0,3 \cdot V \cdot \tau \cdot \exp(-t/\tau)]. \quad (2.19)$$

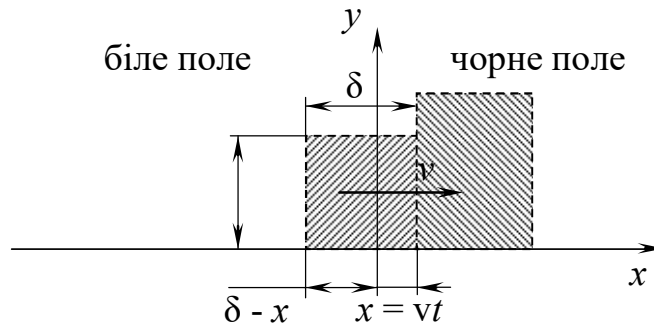


Рисунок 2.7 – До визначення світлового потоку від світної плями на межі білий фрагмент – чорний фрагмент

Щодо третьої фази P_3 , то у цій фазі діє тільки свічення сліду і величина потоку, яку за аналогією визначимо як $\Phi_{\Sigma 3}$, є така ж, як визначена вище величина потоку Φ_2 відповідно до (2.15). Як видно, з описаного вище механізму спотворень, їх слід очікувати тільки під час часових фаз P_2 та P_3 , що відповідають чорному фрагментові об'єкта. Стосовно фаз P_2 та P_3 врахуємо, що люмінофорні часточки екрана ЕПТ у трьох основних кольорах можуть мати різний час післясвічення, тобто різні сталі післясвічення, які позначено τ_{\min} , τ_{mid}

та τ_{\max} . Якщо розглянути всі можливі комбінації, то їхня кількість дорівнюватиме 6, і будуть отримані такі комбінації (таблиця 2.1).

При відомих значеннях сталої часу вгамівності люмінофора вибрано один з шести варіантів. З метою оцінки візуального сприйняття колірних спотворень на основі отриманих вище співвідношень, проведено комп'ютерне моделювання як кривих, що характеризують процес формування кольорового зображення, так і власне колірних спотворень внаслідок керування R-, G-, B-прожекторами монітора напругами, які визначалися через світлові потоки наведеного вище характеру в припущенні, що зв'язок між світловим потоком і напругою відеосигналу, створюваного ФЕП є пропорційний. Сигнали повторювались у кільканадцяти рядках (x – напрямком) кадру зображення комп'ютерного монітора, що створювало ефект протяжності межі “біле поле – чорне поле” у вертикальному (y) напрямку.

Таблиця 2.1 – Комбінації отримання різних варіантів кольорів

N	τ_{\min}	τ_{mid}	τ_{\max}
1	R	G	B
2	R	B	G
3	G	R	B
4	G	B	R
5	B	R	G
6	B	G	R

З урахуванням різних сталих часу приходимо до таких трьох пар виразів, які характеризують сигнали від люмінофорів трьох різних кольорів зі сталими τ_{\min} , τ_{mid} та τ_{\max} :

$$\begin{cases} U_{\Sigma 2}^{\max} = [(t_1 - t) + 0,3 \cdot \tau_{\max} \cdot \exp(-t/\tau_{\max})] & \text{для } 0 \leq t \leq t_1; \\ U_{\Sigma 2}^{\max} = 0,3 \cdot \tau_{\max} \cdot \exp(-t/\tau_{\max}) & \text{для } t > t_1; \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} U_{\Sigma 2}^{\text{mid}} = p \cdot [(t_1 - t) + 0,3 \cdot \tau_{\text{mid}} \cdot \exp(-t/\tau_{\text{mid}})] & \text{для } 0 \leq t \leq t_1; \\ U_{\Sigma 3}^{\text{mid}} = p \cdot \tau_{\text{mid}} \cdot \exp(-t/\tau_{\text{mid}}) & \text{для } t > t_1; \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\begin{cases} U_{\Sigma 2}^{\min} = q \cdot [(t_1 - 1) + 0,3 \cdot \tau_{\min} \cdot \exp(-t/\tau_{\min})] \text{ для } 0 \leq t \leq t_1; \\ U_{\Sigma 3}^{\min} = q \cdot 0,3 \cdot \tau_{\min} \cdot \exp(-t/\tau_{\min}) \text{ для } t > t_1. \end{cases} \quad (2.22++++++)$$

У цих виразах не враховано постійні коефіцієнти, що входять у вирази для $\Phi_{\Sigma 2}$ та $\Phi_{\Sigma 3}$. Крім того, у виразах, пов'язаних з τ_{mid} та τ_{min} , введено поправні коефіцієнти p та q . Річ у тім, що, як можна переконатися, відповідні світлові потоки, а, отже, і сигнали є пропорційними τ . Оскільки, τ мають різні значення, то і сигнали в цей момент часу виявляються різними, що не забезпечує умови одержання білого кольору. Поправні коефіцієнти, визначені з виразів, усувають цей недолік моделі:

$$p = (t_1 + 0,3 \cdot \tau_{\max}) / (t_1 + 0,3 \cdot \tau_{\text{mid}}) \quad (2.23)$$

$$q = (t_1 + 0,3 \cdot \tau_{\max}) / (t_1 + 0,3 \cdot \tau_{\min}) \quad (2.24)$$

Результати моделювання підтвердили як явище розширення зони розмиття (за відсутності післясвічення зона розмиття обмежувалася б значеннями $t = 1$; при $t > 1$ напруги сигналів дорівнювали нулеві), так і явище розфарбовування зони розмиття на переході від білого до чорного фрагмента об'єкта. Водночас слід зазначити, що порівняно значна зміна значень сталих часу не викликає помітної різниці у сприйнятті кольірних спотворень.

Оцінено вплив післясвічення люмінофора на апертуру світної плями залежно від швидкості сканування. Прийнято час розгорання люмінофора (тобто час наростання яскравості свічення люмінофора до максимального рівня) таким, що дорівнює нулю, оскільки він є істотно меншим за час загасання і, отже, ним можна знехтувати. Прийнято також, що яскравість свічення точки на екрані для безінерційного люмінофора прямопропорційна густині струму електронного пучка у цій точці.

Зменшення яскравості після припинення бомбардування люмінофора звичайно апроксимують експоненційною залежністю [50]:

$$B_p(t) = B_0 \cdot \exp(-t/\tau), \quad (2.25)$$

де $B_p(t)$ – часова залежність яскравості точки на екрані після припинення бомбардування пучком електронів;

B_0 – яскравість точки на екрані в момент припинення її бомбардування;

t – час, що пройшов від моменту припинення бомбардування;

τ – стала часу післясвічення люмінофора ЕПТ.

Розглянемо, як при скануванні рядка змінюється яскравість (нормована до свого максимального значення) будь-якої точки екрана, що лежить на осі цього рядка (рис. 2.8).

Прийmemo за початок відліку момент часу, коли центр електронного пучка збігається з вибраною точкою екрана ($t=0$ на рисунку). Тоді для “від’ємного” часу яскравість змінюватиметься за кривою $B(t)$ (суцільна лінія), а для “додатного” – за кривою $B'(t)$ (пунктирна лінія). Для безінерційного люмінофора зміна яскравості для будь-яких t відбуватиметься за суцільною кривою.

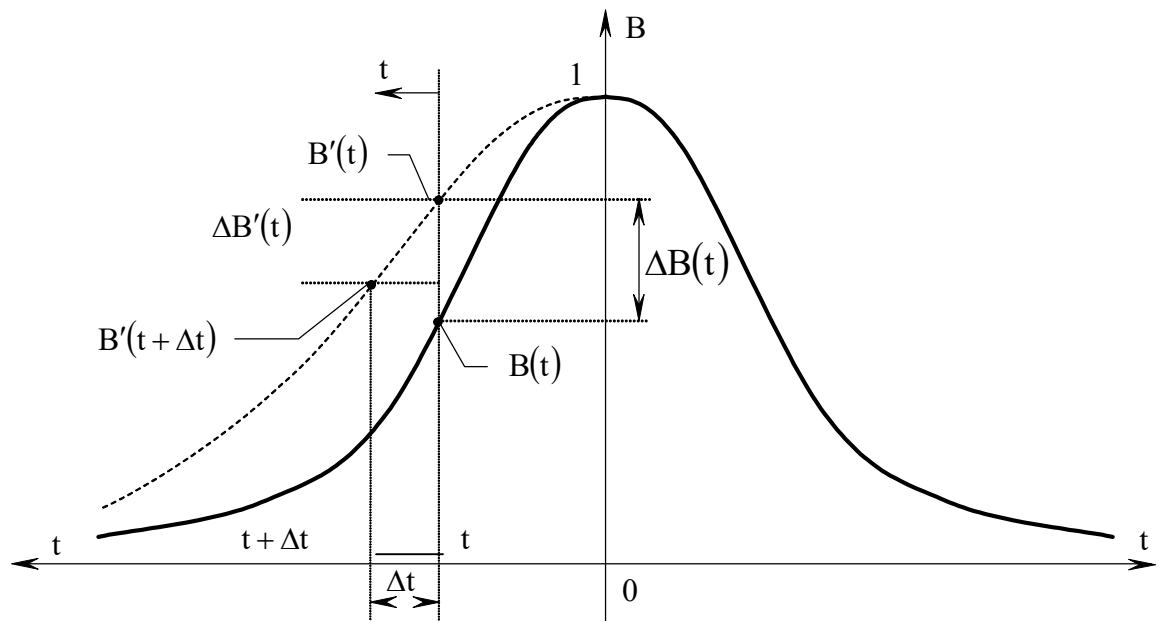


Рисунок 2.8 – До визначення закону розподілу яскравості в світній плямі з урахуванням післясвічення люмінофора: зміна яскравості точки на екрані за відсутності $B(t)$ та наявності $B'(t)$ післясвічення люмінофора

Розглянемо моменти часу t та $t + \Delta t$, де Δt – малий приріст часу. З рис. 2.8 з урахуванням (2.25) можна отримати рівняння для визначення $B'(t)$ (якщо $t \geq 0$):

$$B'(t + \Delta t) = B'(t) + \Delta B(t) \cdot \left. \frac{d \exp(-t/\tau)}{dt} \right|_{t=0} \cdot \Delta t = B'(t) - \frac{\Delta t}{\tau} \cdot (B'(t) - B(t)), \quad t \geq 0, \quad (2.26)$$

$$\tau \cdot \frac{B'(t + \Delta t) - B'(t)}{\Delta t} + B'(t) = B(t), \quad t \geq 0. \quad (2.27)$$

Виконуючи для (2.27) граничний перехід $\Delta t \rightarrow 0$, отримано диференційне рівняння та початкові умови для визначення $B'(t)$ для $t \geq 0$:

$$\tau \cdot \frac{dB'(t)}{dt} + B'(t) = B(t), \quad B'(0) = B(0) = 1, \quad t \geq 0. \quad (2.28)$$

Здійснимо для (2.28) перехід від часових до просторових координат, враховуючи, що $t = r/V$, де r – віддаль між центром світної плями та точкою на екрані; V – швидкість сканування. При цьому нехай в нульовий момент часу центри плями та точки на екрані збігаються. Тоді (2.28) прийме такий вигляд:

$$V \cdot \tau \cdot \frac{dB'(r)}{dr} + B'(r) = B(r), \quad B'(0) = B(0) = 1, \quad r \leq 0. \quad (2.29)$$

Множник $V \cdot \tau$ в (2.29) можна інтерпретувати як пробіг плями за час післясвічення люмінофора. Розв'язуючи (2.29) та враховуючи, що для $r > 0$ закон розподілу збігається з початковим, отримуємо вираз для закону розподілу яскравості в центральному січенні світної плями з урахуванням інерційності люмінофора:

$$B'(r) = \begin{cases} \left[\int_0^r B(r) \cdot \frac{\exp(u/(\tau \cdot V))}{\tau \cdot V} du + B(0) \right] \cdot \exp(r/(\tau \cdot V)), & r \leq 0 \\ B(r), & r > 0 \end{cases}. \quad (2.30)$$

Найчастіше розподіл яскравості в статичній (нерухомій) світній плямі апроксимують за дзвоноподібним чи Гаусовим законами [26, 31]. Прийmemo Гаусів закон розподілу:

$$B(r) = 1 / \exp\left(- (r/d)^2\right), \quad (2.31)$$

де d – півширина статичної світної плями за рівнем $1/e$.

Підставляючи (2.31) в (2.30) та переходячи до нормованих координат, отримано наступний вираз для розподілу яскравості в рухомій світній плямі:

$$B'(r) = \begin{cases} \left(1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot V_d} \cdot \exp\left(\left(\frac{1}{2 \cdot V_d}\right)^2\right) \cdot \left(\operatorname{Erf}\left(r - \frac{1}{2 \cdot V_d}\right) + \operatorname{Erf}\left(\frac{1}{2 \cdot V_d}\right) \right) \right) \cdot \exp\left(-\frac{r}{V_d}\right), & r \leq 0, \\ 1/\exp(-r^2), & r > 0, \end{cases} \quad (2.32)$$

де $\operatorname{Erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x \exp(-t^2) dt$ – функція помилок;

r – віддаль від центру рухомої плями, нормована до півширини статичної плями;

$V_d = \tau \cdot V/d$ – відносна швидкість сканування, виражена в півширинах статичної плями, пройдених рухомою прямою за час τ .

Розрахований за (2.32) розподіл яскравості в рухомій світній плямі (центральне січення в напрямку сканування) для низки значень V_d , наведено на рис. 2.10. Як видно з рисунка, зміни закону розподілу є незначними для $V_d < 0,5$.

Розв'язуючи числовими методами рівняння $B'(d') = \exp(-1)$, можна одержати відносну півширину рухомої світної плями d' (власне це ширина згасаючої частини плями за рівнем $\exp(-1)$, (див. рис. 2.9) для заданої швидкості сканування. Відтак на основі цих даних розраховано залежність відношення апертур (за рівнем $\exp(-1)$) рухомої (a') та нерухомої (a) світних плям від відносної швидкості сканування, як $a'/a = (d' + 1)/2$. Цю залежність наведено на рис. 2.10, вона характеризує погіршення роздільної здатності. Як видно, відношення апертур має лінійну залежність від відносної швидкості сканування.

На основі отриманих співвідношень визначено, на скільки впливає інерційність загасання люмінофора та швидкість сканування на роздільну здатність ТСМ.

Вихідні параметри ЕПТ:

- діаметр статичної плями на екрані – 20 мкм;
- постійна часу післясвічення люмінофора – 50 нс;
- максимальний розмір растру на екрані – 50×50 мм;
- тривалість прямого ходу рядкової розгортки (ТВ розклад) – 54 мкс.

Враховуючі ці дані, одержано відносну швидкість сканування

$$V_d = \frac{50 \cdot 10^{-9} \cdot 50 \cdot 10^{-3} / 54 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-6}} = 4,62.$$

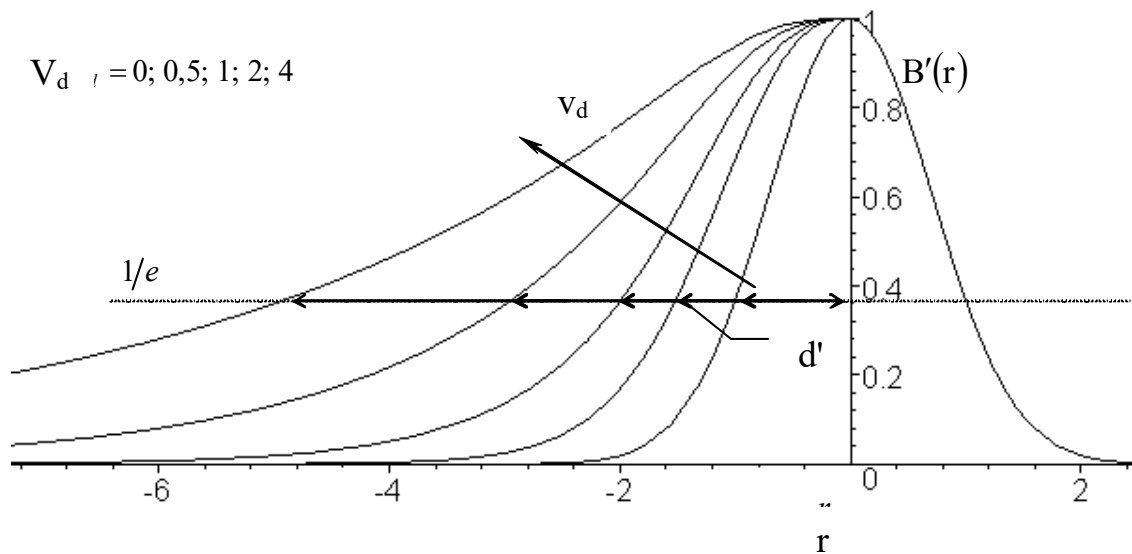


Рисунок 2.9 – Розрахований з урахуванням інерційності згасання люмінофора, розподіл яскравості в рухомій світній плямі для ряду значень відносної швидкості сканування. Віддаль від центру плями r нормована до півширини нерухомої плями

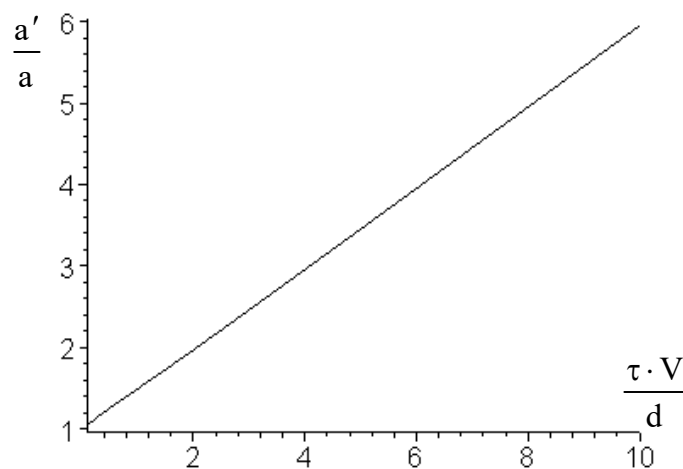


Рисунок 2.10 – Залежність відношення апертур рухомої та нерухомої плями від відносної швидкості сканування

З рис. 2.10 видно, що такій швидкості сканування відповідає приблизно трикратне збільшення апертури плями. Це свідчить про те, що навіть при розкладі зображення у телевізійному стандарті роздільна здатність суттєво погіршується.

З використанням розгортки із збільшеною до 160 Гц частотою полів, швидкість сканування зростає більше, ніж в 3 рази, а апертура сканувальної плями тоді збільшиться в 2,5 рази порівняно з апертурою при телевізійному розкладі [72]. Для запобігання цьому сканувати доцільно не в телевізійному, а малокадровому режимі, а для забезпечення потрібної частоти оновлення зображення на моніторі – застосовувати перетворювач параметрів розкладу зображення.

2.3. Особливості роботи перетворювача напруга-струм

З метою забезпечення високої точності перетворення вхідної напруги в струм котушок відхилювальної системи перетворювач напруга-струм (ПНС) виконано за схемою підсилювача постійного струму з глибоким від'ємним зворотним зв'язком за струмом [36, 37]. Сигнал від'ємного зворотного зв'язку формується на прецизійному резисторі, ввімкненому послідовно з індуктивним навантаженням, яким є котушки відхилювальної системи.

Під швидкодією ПНС розуміють час, необхідний для встановлення струму в навантаженні в межах заданої похибки відносно ідеального значення у відповідь на стрибкоподібне вхідне збудження [36, 37]. Вхідний сигнал розгортки сканувального променя формується цифро-аналоговим перетворювачем, тому вважають, що він здійснюється стрибкоподібно. При цьому миттєве значення амплітуди сигналу відповідає переміщенню сканувального елемента в сусідню адресовану точку на екрані ЕПТ.

При аналізі швидкодії прийнято такі припущення [36, 79]:

1) підсилювач подано у вигляді інерційної ланки з передавальною функцією $K/(1 + p\tau_{II})$;

2) власна ємність індуктивного навантаження мала і не враховується;
 3) власний опір індуктивного навантаження враховується спільно з опором резистора R_3 , на якому формується сигнал від'ємного зворотного зв'язку;

4) напруга живлення вихідного каскаду ПНС вища, ніж напруга, яка встановлюється на індуктивному навантаженні в перехідному режимі. Структурну схему такого ПНС для аналізу часу встановлення струму в індуктивному навантаженні наведено на рис. 2.11, а функціональну – на рис. 2.12.

Передавальну функцію цього ПНС згідно [73] можна подати у вигляді:

$$W(p) = \frac{nK}{K + (1+n) \cdot (1 + p\tau_{II}) \cdot (1 + p\tau_H)}, \quad (2.33)$$

де $n = R_2 / R_1$ – коефіцієнт зворотного зв'язку;

$\tau_H = L_H / R_H$ – стала часу навантаження,

R_H – активний опір індуктивного навантаження з урахуванням опору резистора R_3 , на якому формується сигнал від'ємного зворотного зв'язку,

K – коефіцієнт підсилення ПНС без урахування дії від'ємного зворотного зв'язку.

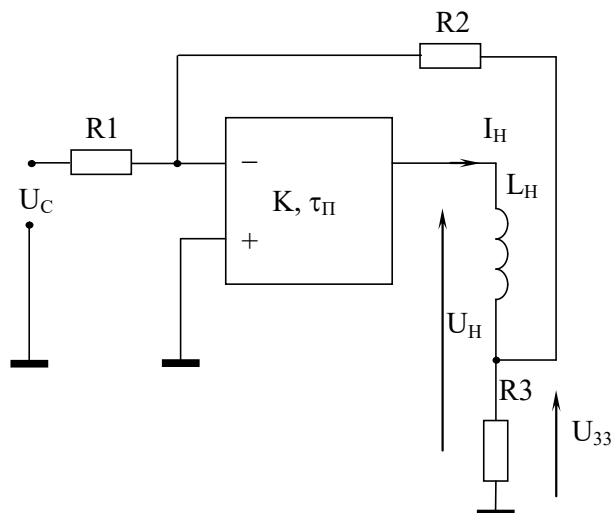


Рисунок 2.11 – Структурна схема ПНС для аналізу часу встановлення

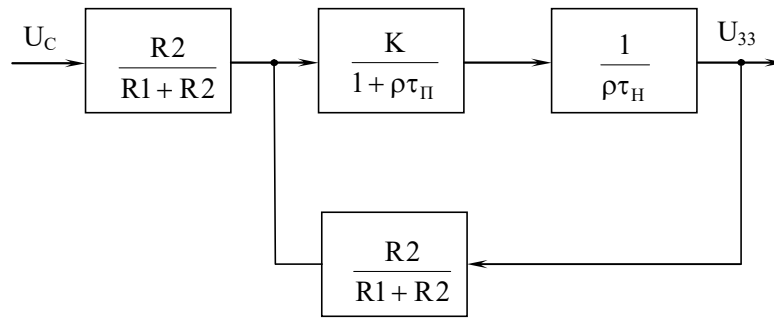


Рисунок 2.12 – Функціональна схема ПНС для аналізу часу встановлення струму в індуктивному навантаженні

Реакція такої системи на вхідний сигнал U_C/p (скачок з амплітудою U_C) запишеться у вигляді:

$$U_{33} = \frac{U_C \cdot K \cdot n}{1 + K + n} \cdot \frac{1}{p \cdot \left[p^2 \cdot \frac{(1+n) \cdot \tau_{II} \cdot \tau_H}{1 + K + n} + p \cdot \frac{(1+n) \cdot (\tau_{II} + \tau_H)}{1 + K + n} + 1 \right]} \quad (2.34)$$

що при переході до оригіналів дає

$$U_{33}(t) = \frac{U_C \cdot K \cdot n}{1 + K + n} \cdot \left[1 + \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi \omega t} \sin(\omega \sqrt{1 - \xi^2} t - \chi) \right], \quad (2.35)$$

де $\xi = (1 + m)/2\sqrt{m}$ – коефіцієнт вгамівності;

$\omega = \sqrt{\frac{1 + K + n}{(1 + n) \cdot \tau_{vco} \cdot \tau_{KO}}}$ – кругова частота власних коливань;

$$m = \tau_H / \tau_{II}.$$

При цьому еквівалентна стала часу складає:

$$\tau_E = 1/\xi \cdot \omega = 2\tau_H \cdot \tau_{II} / (\tau_H + \tau_{II}). \quad (2.36)$$

Аналіз виразів (2.35) та (2.36) показує, що швидкість наростання сигналу на резисторі формування сигналу зворотного зв'язку R3 або струму, який йому відповідає, при роботі підсилювача ПНС у лінійному режимі не залежить від коефіцієнта підсилювача і величини зворотного зв'язку (ці параметри визначають частоту коливань системи і коефіцієнта вгамівності) і визначаються тільки сталою часу підсилювача і ланки індуктивне навантаження – формування сигналу зворотного зв'язку R3 з урахуванням активного опору індуктивного навантаження. Однак, на практиці необхідно найчастіше

розраховувати ПНС на відпрацювання лінійно-наростаючих сигналів за час від нульового значення до амплітуди U_C . Аналіз такого випадку, виконано в [35]. Згідно з [17], зображення сигналу має вигляд: $U_C(p) = U_C / p^2 / t$, а реакцію замкнутої системи на нього можна показати так:

$$U_{33}(p) = \frac{U_C \cdot K \cdot n}{t \cdot (1 + K + n)} \cdot \frac{1}{p^2 \cdot (p^2 + pa + d)}, \quad (2.37)$$

При переході до оригіналів, якщо $d < a^2 / 4$ одержимо:

$$U_{33} = \frac{U_C \cdot K \cdot n}{t(1 + K + n)} \cdot \left\{ t - \frac{1}{2b} \left[e^{(b-\frac{a}{2})t} - e^{-(b+\frac{a}{2})t} \right] - \frac{a}{d} \times \left[1 - \frac{1}{4b} \left[\frac{(2b+a) \cdot e^{(b-\frac{a}{2})t} + (2b-a) \cdot e^{-(b+\frac{a}{2})t}}{(2b-a) \cdot e^{-(b+\frac{a}{2})t}} \right] \right] \right\}, \quad (2.38)$$

а для $d > a^2 / 4$:

$$U_{33} = \frac{U_C \cdot K \cdot n}{t(1 + K + n)} \cdot \left\{ t - \frac{1}{\omega} e^{-\frac{a}{2}t} \cdot \sin \omega t - \frac{a}{2} \cdot \left[1 - e^{-\frac{a}{2}t} \cdot \cos \omega t + \frac{a}{2\omega} \cdot \sin \omega t \right] \right\}, \quad (2.39)$$

де $a = (\tau_{II} + \tau_H) / (\tau_{II} \cdot \tau_H)$; $b = \sqrt{(a^2/4) - d}$; $\omega = \sqrt{d - (a^2/4)}$.

Проаналізувавши (2.38) і (2.39) можна визначити час затримки підсилювача. В реальних пристроях $K \gg 1$, $\tau_H / \tau_{II} \gg 1$.

Після спрощення час затримки визначається так:

$$t_{3AT} = (1 + n) \cdot \tau_{KO} / K. \quad (2.40)$$

Визначимо реакцію замкнутої системи, якщо на вхід пристрою подати імпульс згідно рис.2.13, який можна записати відповідно до [17] так:

$$F(p) = U_{CO} \cdot (1 - e^{-pt_0}) / p^2 t_0. \quad (2.41)$$

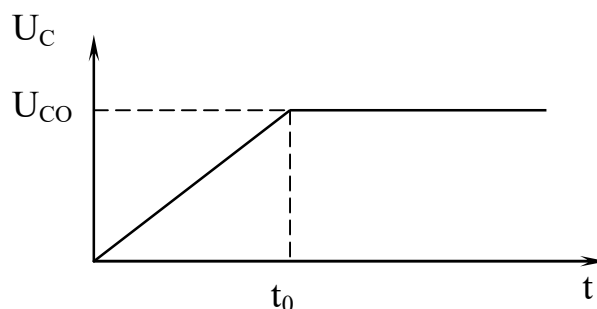


Рисунок 2.13 – Форма вхідного імпульсу для аналізу часу встановлення

Реакція на цей імпульс буде аналогічна (2.37). При переході до оригіналів отримаємо:

$$U_{33} = \frac{U_{CO} \cdot K \cdot n}{t_0(1+K+n)} \cdot \left\{ t_0 - \frac{1}{2b} \cdot \left[e^{\frac{(b-a)}{2}t} \cdot (1 - e^{-\frac{(b-a)}{2}t_0}) - e^{-\frac{(b+a)}{2}t} \cdot (1 - e^{\frac{(b+a)}{2}t_0}) \right] + \right. \\ \left. + \frac{a}{4bd} \cdot \left[(2b+a) \cdot e^{-\frac{(b+a)}{2}t} \cdot (1 - e^{-\frac{(b-a)}{2}t_0}) + (2b-a) \cdot e^{-\frac{(b-a)}{2}t} \cdot (1 - e^{-\frac{(b+a)}{2}t_0}) \right] \right\}, \quad (2.42)$$

якщо $d < a^2 / 4$, або

$$U_{33} = \frac{U_{CO} \cdot K \cdot n}{t_0(1+K+n)} \cdot \left\{ t_0 - \frac{1}{\omega} \cdot e^{-\frac{a}{2}t} \left[\sin \omega t - e^{-\frac{a}{2}t_0} \cdot \sin \omega(t-t_0) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{a}{d} \left\langle e^{-\frac{a}{2}t} \cdot \left\{ e^{\frac{a}{2}t_0} \cdot [\cos \omega(t-t_0) + \frac{a}{2\omega} \cdot \sin \omega(t-t_0)] - (\cos \omega t + \frac{a}{\omega} \cdot \sin \omega t) \right\} \right\rangle \right] \right\}, \quad (2.43)$$

якщо $d > a^2 / 4$.

Вирази (2.42) і (2.43) дозволяють визначити час встановлення струму в індуктивному навантаженні з заданою точністю. Наприклад, якщо використовувати підсилювач ПНС з коефіцієнтом підсилення $K = 1000$, верхньою граничною частотою $F_t = 5$ МГц, навантажений на індуктивність $L = 100$ мкГн, величину резистора формування сигналу зворотного зв'язку вибрати рівною 1 Ом (тобто $\tau_H = 1 \times 10^{-4}$; $\tau_H / \tau_{II} = 500$), тоді при подачі на вхід пристрою імпульсу з амплітудою $U_{CO} = 10$ мВ і переднім фронтом $t_0 = 1$ мкс, струм в котушці через час $t = 1$ мкс встановиться з точністю 5%, а через час $t = 10$ мкс з точністю 0,1%.

Залежно від амплітуди вхідного сигналу каскади підсилювача ПНС можуть працювати як в лінійному режимі, так і в режимі насичення внаслідок розриву петлі зворотного зв'язку через велику різницю амплітуд вхідного сигналу і сигналу від'ємного зворотного зв'язку [12, 14]. Часові діаграми, які пояснюють роботу ПНС, наведено на рис. 2.14. У першому випадку амплітуда вхідного сигналу в момент t_1 (рис. 2.14,а) настільки мала, що викид напруги на індуктивному навантаженні (рис. 2.14,б) не перевищує величини напруги живлення і весь тракт підсилювача працює в лінійному режимі, а встановлення струму складається з двох фаз. Перша фаза триває з моменту подачі на вхід

сигналу t_1 до встановлення на індуктивному навантаженні максимальної величини в момент t_3 , коли починає працювати зворотний зв'язок, тобто $\tau_I = t_3 - t_1$. До того ж необхідно відзначити, що початок формування струму в навантаженні буде відповідати часу t_2 , який визначається затримкою $t_{ЗАТ}$, згідно (2.38).

Під час другої фази напруга на котушці за рахунок дії зворотного зв'язку зменшується до величини необхідної для підтримання в навантаженні струму заданої величини з заданою точністю Δ : $t_{III} = t_{II} - t_3$. Час встановлення струму визначається так:

$$\tau_Y = \tau_I + \tau_{III}. \quad (2.44)$$

Якщо напруга живлення обмежена, тоді при обробці схемою сигналів прямокутної форми великої амплітуди можна виділити три фази [76]. Перша фаза триває з моменту подачі сигналу (час t_5) до встановлення на котушці напруги майже рівній напрузі джерела живлення (момент t_6). А час початку формування струму майже співпадає з часом t_6 . Під час другої фази τ_{II} напруга на навантаженні залишається майже незмінною, а струм змінюється відповідно до виразу:

$$U_L = L \cdot dI / dt + IR_{BC}. \quad (2.45)$$

У першому наближенні можна вважати, що $LdI / dt \gg IR_{BC}$, що дає можливість стверджувати: струм у навантаженні буде змінюватися практично лінійно. Виконуючи мову

$$U_C - U_H \cdot R2 / R1 \leq E_{ЖИВ} / K \quad (2.46)$$

в час t_7 вступає в дію зворотний зв'язок, напруга на навантаженні починає спадати і схема вступає в третю фазу, яка триває від моменту t_7 до моменту t_8 , тобто до встановлення струму з заданою точністю. Повний час встановлення струму визначається так:

$$\tau_Y = \tau_I + \tau_{II} + \tau_{III}. \quad (2.47)$$

Тривалість першої фази τ_I визначається еквівалентною постійною часу системи згідно (2.36), тривалість другої фази $\tau_{II} = LI / U$, тривалість третьої фази τ_{III} залежить від того, яка динамічна точність вимагається, і визначається з

виразів (2.40), або (2.43) при подачі на вхід пристрою імпульсу згідно з рис. 2.13, або з виразу (2.35), якщо фронт вхідного імпульсу практично відповідає одиничному скачку.

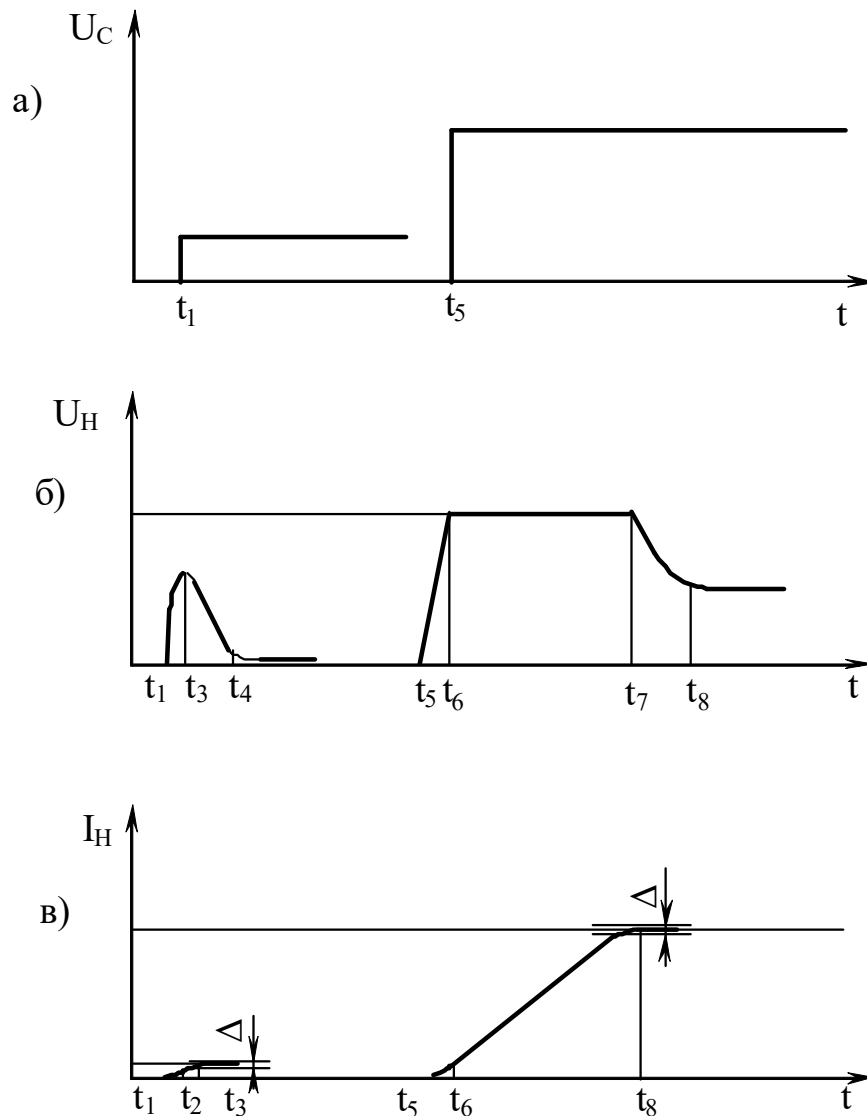


Рисунок 2.14 – Часові діаграми роботи ПНС

Аналіз вимог до ПНС показує, що вимоги до швидкодії можуть бути різними залежно від способу формування освітлювального растра. Так, наприклад, при формуванні повноформатного освітлювального растра максимальної роздільної здатності основну увагу слід скерувати на фазу з часом встановлення τ_{III} . Ця фаза визначається сталими τ_{II} і τ_H . При формуванні растра низької роздільної здатності основну увагу слід скерувати на фазу з часом встановлення τ_{II} та τ_{III} . При роботі сканувального мікроскопа в

пасивному режимі час встановлення для кожного розташування сканувального елемента на екрані необхідно визначати програмно відповідно до віддалі, на яку переміщується промінь у сусідню адресовану точку. Час обчислення затримки за рахунок розрахунку (близько 10 мкс) значно перевищує час, необхідний для переміщення сканувального елемента в сусідню адресовану точку з заданою точністю з урахуванням часу підсвічування (1 – 2 мкс).

2.4. Пасивний та активний режим роботи телевізійного сканувального мікроскопа

Суть пасивного режиму роботи ТСМ полягає в тому, що код наступної координати елемента освітлювального растра видається через час, який перевищує суму тривалості перехідного процесу встановлення струму в навантаженні при його максимальній зміні та тривалості імпульсу підсвічування. Максимальний час встановлення визначається відповідно до (2.47). Суть активного режиму роботи ТСМ полягає в тому, що код наступної координати елемента освітлювального растра видається через час, який визначається відповідно до (2.44) або (2.47) після того, як з ПНС надходить імпульс готовності, який формується після закінчення імпульсу підсвічування.

Пропонуються дві структурні схеми ПНС, які в активному режимі роботи ТСМ формують імпульси нормованої величини, тривалість яких дорівнює тривалості перехідного процесу встановлення струму в індуктивному навантаженні. На рис. 2.15 наведено структурну схему формувача імпульсів перехідного процесу, яка складається з двох компараторів К1 та К2, двох джерел опорної напруги ДОН1 і ДОН2 та логічної схеми АБО. Перші входи обох компараторів паралельно підімкнені до виходу ПНС, який з'єднаний з індуктивним навантаженням. Джерела опорної напруги ДОН1 та ДОН2 формують на своїх виходах напругу, значення якої перевищує суму напруг на резисторі формування сигналу зворотного зв'язку та активному опорі навантаження при протіканні по них струму максимального значення [34]. При цьому на виході схеми АБО формується імпульс перехідного процесу незалежно від полярності струму в навантаженні [35].

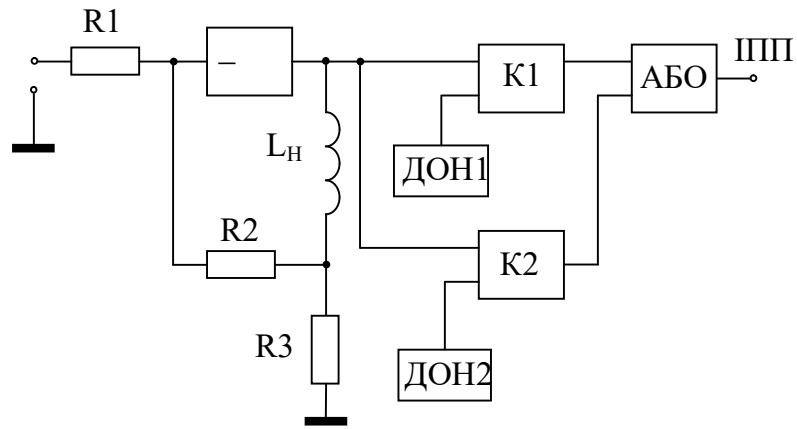


Рисунок 2.15 – Структурна схема формувача імпульсів перехідного процесу при підімкненні компараторів до виходу ПНС

На рис. 2.16 наведено структурну схему формувача імпульсів перехідного процесу, яка складається з двох компараторів К1 та К2 та логічної схеми АБО. Характерна особливість цієї схеми та, що обидва входи компараторів підімкнені безпосередньо до індуктивного навантаження. Поріг спрацьовування цих компараторів перевищує спад напруги на активному опорі індуктивного навантаження при протіканні по ньому струму максимального значення.

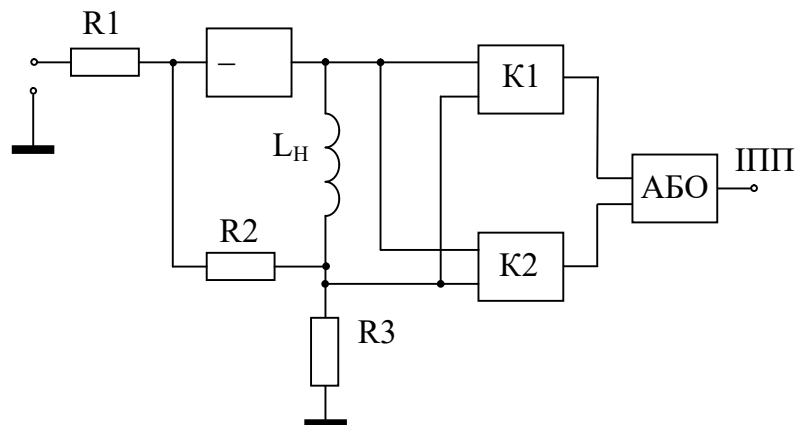


Рисунок 2.16 – Структурна схема формувача імпульсів перехідного процесу при підімкненні компараторів до індуктивного навантаження

Поріг спрацьовування компараторів у другому випадку повинен бути значно меншим, оскільки спад напруги на активному опорі індуктивного навантаження (1–2 В) є значно меншим максимального сигналу від'ємного зворотного зв'язку (5–10 В). Час перехідного процесу встановлення струму в

індуктивному навантаженні відповідно до (2.41) при переміщенні сканувального елемента в сусідню адресовану точку становить 3 мкс. У першому випадку тривалість імпульсу перехідного процесу становитиме 1 мкс, а у другому – 2,5 мкс, що майже співпадає з реальним часом встановлення струму з високою точністю. При використанні першого варіанту схеми необхідно передбачати додаткову схему розширення імпульсу перехідного процесу [106].

2.5. Функціональна схема телевізійного сканувального мікроскопа з урахуванням тривалості перехідного процесу в активному режимі роботи

Структурну схему такого ТСМ наведено на рис. 2.17. До складу структурної схеми входять цифро-аналоговий перетворювач [18] формування сигналу відхилення сканувального елемента по координаті X ЦАПХ відповідно до коду відхилення Код X, цифро-аналоговий перетворювач формування сигналу відхилення сканувального елемента по координаті Y ЦАПУ відповідно до коду відхилення КОД Y, два перетворювачі напруга-струм ПНС, які перетворюють сигнал напруги відхилення в струм відхилення з високою точністю, кожен ПНС навантажений на відповідні котушку відхилення KBX та KBY, формувач імпульсів перехідного процесу ФППХ та ФППУ, три схеми АБО – АБО1, АБО2, АБО3, схему I, генератор тактових імпульсів ТГІ, лічильник Л, формувач відеосигналу ФВС, цифро-аналоговий перетворювач ЦАП, нелінійний перетворювач НП, перетворювач напруга-час ПНЧ, а також розширювач імпульсів РІ. На вхід ТСМ поступає імпульс видачі коду ІВК, а на вихід подається імпульс дозволу видачі наступного коду ІДВК.

Принцип роботи мікроскопа такий.

У вихідному стані сигнали на вхідних шинах “Код X” та “Код Y” та імпульс видачі коду “ІВК” відсутні. На виходах формувачів імпульсу перехідного процесу ФППХ та ФППУ, розширювача імпульсів РІ, першої схеми АБО1, другої схеми АБО2, третьої схеми АБО3 та схеми I також відсутні. При цьому електронно-променева трубка ЕПТ закрита по модулятору.

На виході лічильника встановлюється код, який відповідає виключенню всіх розрядів, а на вихідній шині ІДВК встановлюється потенціал, який дозволяє видачу коду наступного елемента освітлювального растра.

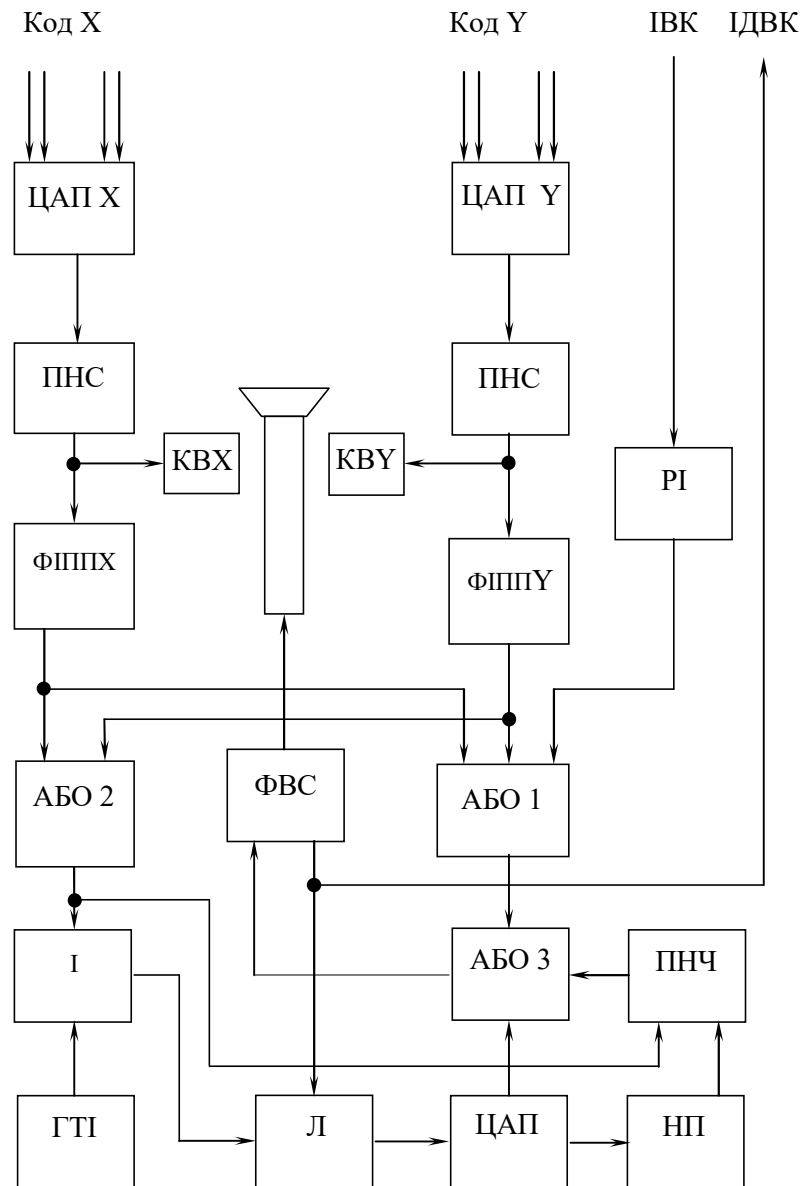


Рисунок 2.17 – Структурна схема ТСМ в активному режимі роботи

На входні шини Код X та Код Y подається код розташування сканувального елемента освітлювального растра, а на входну шину ІВК імпульс видачі коду. На виходах ЦАПХ та ЦАПУ формуються напруги, які відповідають входним кодам і подаються на відповідні входи ПНС. Під час перехідного процесу встановлення струму в індуктивному навантаженні на виходах ПНС встановлюються напруги, амплітуда та тривалість яких величиною зміни струму в КВХ або КВУ. При цьому на виходах формувачів

імпульсу перехідного процесу ФППХ та ФППУ формуються нормалізовані за амплітудою імпульси, тривалість яких відповідає тривалості перехідного процесу встановлення струму в індуктивному навантаженні [19, 28]. На третій вхід першої схеми АБО1 з розширювача імпульсів РІ подається імпульс, тривалість якого перевищує тривалість перехідного процесу встановлення струму в індуктивному навантаженні, що відповідає такому переміщенню сканувального елемента по екрану растра, при якому внаслідок наявності порогу спрацювання ФППХ та ФППУ останні ще не спрацювають. Пороги спрацювання ФППХ та ФППУ вибирають рівними сумі максимальних напруг на активному опорі індуктивного навантаження та резисторі формування сигналу зворотного зв'язку при протіканні по них струму максимальної величини в статичному режимі. Якщо прирости струмів в індуктивних навантаженнях відносно малі, то ФППХ та ФППУ не спрацювають. При цьому на виході другої схеми АБО2 імпульс буде відсутній, а на виході першої схеми АБО1 формується сигнал, тривалість якого дорівнює тривалості вихідного імпульсу РІ. Цей сигнал через третю схему АБО3 подається на вхід формувача відеосигналу ФВС. На першому виході ФВС формується нормований за амплітудою та тривалістю імпульс підсвічування, початок якого відповідає закінченню імпульсу на виході третьої схеми АБО3.

На другому виході ФВС формується нормований за амплітудою імпульс дозволу видачі коду, початок якого співпадає з початком імпульсу третьої схеми АБО3, а кінець – з кінцем імпульсу підсвічування. Сигнал з виходу другої схеми АБО2 подається на керуючий вхід перетворювача напруга-час, встановлюючи його в робочий режим. При цьому за час вихідного імпульсу другої схеми АБО2 на виході схеми І формуються імпульси з частотою генератора тактових імпульсів ГТІ, які поступають на лічильник Л, вихідний код якого відповідає кількості імпульсів. На виході ЦАП формується напруга, пропорційна тривалості вихідного імпульсу другої схеми АБО2 [18]. На виході нелінійного перетворювача НП і, відповідно, на виході перетворювача напруга-час формується імпульс, тривалість якого дорівнює тривалості встановлення магнітного потоку, який встановлює сканувальний елемент з заданою точністю.

Оскільки тривалість встановлення магнітного потоку більша тривалості перехідного процесу встановлення струму в індуктивному навантаженні, то на виході третьої схеми АБОЗ формується імпульс, тривалість якого дорівнює тривалості встановлення магнітного потоку з заданою точністю. Точність формування вихідного імпульсу ПНЧ визначається розрядністю ЦАП та лічильника L і частотою ГТІ.

Застосування діалогового режиму роботи ТСМ дозволяє, з однієї сторони, значно спростити програмне забезпечення, оскільки відпадає необхідність програмного врахування часу виведення сканувального елемента в точку з заданими координатами з заданою точністю, а з другої сторони – значно збільшити швидкодію, оскільки координати наступного положення сканувального елемента видаються практично без затримки.

2.6. Глибина різкості зображення досліджуваного мікрооб'єкта в телевізійному сканувальному мікроскопі

Різкість зображення характеризує якість відтворення меж в зображенні між малими фрагментами [27, 40]. Для одержання зображення з доброю різкістю необхідно, щоб перетворювач світло-сигнал міг створювати електричний сигнал у вигляді прямокутних імпульсів з крутими фронтами при достатньому розмаху між рівнями чорного та білого, а канал формування повного відеосигналу та передавання не спотворював форму такого сигналу.

Об'єktiv ТСМ є одним з найважливіших елементів, від роздільної здатності якого залежить роздільна здатність i , відповідно, різкість мікроскопа в цілому. Проаналізовано, якою повинна бути роздільна здатність використовуваного проєкційного об'єктива, щоб забезпечити необхідну різкість відтворюваного зображення ДО з урахуванням підвищення коефіцієнта збільшення мікроскопа внаслідок зменшення розмірів раstra на екрані ЕПТ. Як відомо, теоретична роздільна здатність об'єктива обмежена дифракцією світла. Відповідно до [31] мінімальний радіус світної плями на ДО, який може забезпечити об'єktiv, визначається виразом: $r = 1,22 \cdot \lambda \cdot f / D$. Об'єктиви з малим робочим відрізком вимагають використання імерсійної рідини, яка

розташовується між досліджуваним МО та об'єктивом. Якщо відомий коефіцієнт заломлення використовуваної імерсійної рідини n , значення числової апертури A можна визначити відповідно до виразу: $A = n \cdot \sin u$. При відомій числовій апертурі радіус світної плями на ДО, який може забезпечити об'єktiv за відсутності сферичних та хроматичних аберацій, астигматизму, неоднорідності скла, похибки виготовлення та інших втрат, визначається відповідно до виразу: $R = 0,61 \cdot \lambda / A$ [31].

Необхідно визначити максимально допустиму величину коефіцієнта збільшення внаслідок зміни розміру растра на ЕПТ, при якому об'єktiv не погіршує роздільної здатності мікроскопа. Вибираючи тип ЕПТ, потрібно, щоб виконувалася умова $q_1 = b_{ПСК_{max}} / b_{ПСК_{min}}$. При розрахунку параметрів орієнтуватимемося на використання монітора з розміром діагоналі 47 см і у сканувальній частині – проекційної ЕПТ типу 4ЛК7Т, яка має робочий розмір екрана $d = 30$ мм і діаметр світної плями $D_{ПСК} = 10$ мкм. Коефіцієнт збільшення мікроскопа внаслідок використання об'єктива М-42 $q_0 = 8$. Знайдемо максимально допустиму величину коефіцієнта q_1 , при якому об'єktiv не погіршує роздільної здатності мікроскопа:

$$\begin{aligned} q_{1_{ЕКВ}} &= D_{ПК} / q \cdot D_{ПСК_{ЕКВ}} = 565 \text{ мкм} / 13,3 \cdot 13,6 \text{ мкм} = 3,12 \text{ мкм}, \\ D_{ПК} &= b_E / k \cdot z = 470 \text{ мм} / 1,33 \cdot 625 = 565 \text{ мкм}. \\ D_{ПСК_{ЕКВ}} &= r_{СВ.ПЛ.} \cdot q_0 = 1,71 \text{ мкм} \cdot 8 = 13,6 \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Визначено, який коефіцієнт збільшення можна отримати в ТСМ через зменшення розмірів растра і використання фактора роздільної здатності ЕПТ $q_1 = D_{ПК} / q \cdot D_{ПСК} = 565 \text{ мм} / 13,3 \cdot 10 \text{ мм} = 4,25$. Оскільки, $q_{1_{ЕКВ}} = 3,12 < q_1 = 4,25$, то об'єktiv М-42 впливає на роздільну здатність мікроскопа загалом. Використовуючи такий об'єktiv, можна досягнути максимального збільшення мікроскопа без погіршення різкості зображення $q_{max} = q_{1_{ЕКВ}} \cdot q_0 \cdot q = 3,12 \cdot 8 \cdot 13,3 = 332$. Для об'єктива ОМ-27 відповідні величини становитимуть: $q_0 = 20$; $D_{ПСК_{ЕКВ}} = 17,08 \text{ мкм}$; $q_{1_{ЕКВ}} = 1,69$; $q_{1_{ЕКВ}} = 1,69 < q_1 = 2,88$; $q_{max} = 449$, а для об'єктива МЩ відповідні величини такі: $q_0 = 40$;

$D_{ПСК_{ЕКВ}} = 21 \text{ мкм}$; $q_{1_{ЕКВ}} = 1,38$; $q_{1_{ЕКВ}} = 1,38 < q_1 = 2,88$; $q_{\max} = 734$. Для об'єктива ОМ-23: $q_0 = 40$; $D_{ПСК_{ЕКВ}} = 18,2 \text{ мкм}$; $q_{1_{ЕКВ}} = 1,59$; $q_{1_{ЕКВ}} = 1,59 < q_1 = 2,88$; $q_{\max} = 846$. Для об'єктива 02-60 максимальний коефіцієнт збільшення ТСОМ без втрати різкості та роздільної здатності складатиме $q_{\max} = 958$, а при використанні об'єктива ОМ-41 – $q_{\max} = 1796$.

Проведені розрахунки показують, що основним фактором, який впливає на різкість формування зображення в ТСОМ при зміні розмірів растра на екрані ЕПТ, є використання мікроскопні об'єктиви. Максимальну зміну коефіцієнта збільшення внаслідок зміни розмірів растра без втрати роздільної здатності можна отримати при використанні об'єктива типу М-42. При цьому коефіцієнт зменшення растра може складати $q_{1_{ЕКВ}} = 2,11$ рази.

Можливим є використання в ТСОМ ЕПТ високої роздільної здатності типу 13ЛК8Б, яка має робочий розмір екрана 130 мм, а діаметр світної плями – $D_{ПСК} = 20 \text{ мкм}$. На екрані такої трубки можна вписати растр, ширина якого становитиме $B_{СК_{\max}} = 104 \text{ мм}$. При цьому мінімальне збільшення телевізійної частини мікроскопа буде $q_0 = 3,08$.

Визначено, який коефіцієнт збільшення можна одержати внаслідок зменшення розмірів растра без погіршення різкості і втрати роздільної здатності зображення ДО: $q_1 = 6,25$. Максимальний коефіцієнт збільшення мікроскопа внаслідок використання об'єктива М-42: $q_{\max} = 154$. Проведений розрахунок показує, що розмір растра можна зменшити у 5,32 рази при збереженій різкості зображення. Максимальний коефіцієнт збільшення, який дорівнює 131, є меншим порівняно з використанням трубки типу 4ЛК7Т.

Розраховано максимальний коефіцієнт збільшення мікроскопа при використанні об'єктива типу ОМ-41: $q_{\max} = 1732$, що є дещо меншим порівняно з використанням ЕПТ типу 4ЛК7Т, однак коефіцієнт регулювання масштабу зображення внаслідок зміни розміру є значно вищим (5,32 рази у порівняно з 1,5 рази для попереднього випадку).

Всі проведені розрахунки виконано для реальних параметрів об'єктів, які враховують погіршення роздільної здатності внаслідок сферичної та хроматичної аберацій, астигматизму, неоднорідності скла та неточності виготовлення. Втрати роздільної здатності розглянемо на прикладі об'єктива типу М-42. Ідеальне апертурне число A для цього об'єктива становитиме: $A = D_{OB}/2 \cdot I_{PB} = 8\text{мм}/2 \cdot 8,57\text{мм} = 0,467$. Ідеальна числова апертура об'єктива М-42 більше, ніж у два рази перевищує реальну числову апертуру об'єктива. Це свідчить про те, що реальна роздільна здатність об'єктива приблизно в два рази є гіршою. Крім цього, необхідно відзначити, що втрати роздільної здатності для об'єктів з більшою кратністю є меншими і для об'єктива типу ОМ-42 складають 30%.

Гранична роздільна здатність оптичної системи для зображення об'єктів з власним свіченням та об'єктів, освітлених стороннім світлом, є різною. При формуванні зображення МО, які не мають власного свічення, роздільна здатність мікроскопа суттєво змінюється залежно від характеру освітлюваності ДО. Якщо дві точки, які самі світяться, розташовані на дуже близькій віддалі одна від одної, то їх кільця Ейрі на площині зображення частково накладаються один на одного, і освітленість в кожній точці фігури розсіювання внаслідок некогерентного випромінювання дорівнює сумі освітлюваностей. Можливе також злиття дифракційних фігур розсіювання і тоді розрізняваність цих двох фігур буде відсутня. На практиці при оцінці роздільної здатності об'єктива часто користуються критерієм Релея, згідно з яким два зображення світних точок знаходяться на межі розрізнення тоді, коли віддаль між центром фігур розсіювання дорівнює радіусу кільця Ейрі, який відповідає $W=3,83$ оптичним одиницям, і освітленість посередині між цими точками в зображенні відрізнятиметься на 22,5% (рис. 2.18).

Найменшу розрізнявальну об'єктивом мікроскопа віддаль між двома світними точками на ДО [25] визначають як $X = 0,61 \cdot \lambda / A$. На практиці встановлено, що здебільшого око ще здатне розрізнити два зображення, якщо

падіння освітленості між двома максимумами становитиме не менше 5%, що і відповідає величині $W = 3,3$.

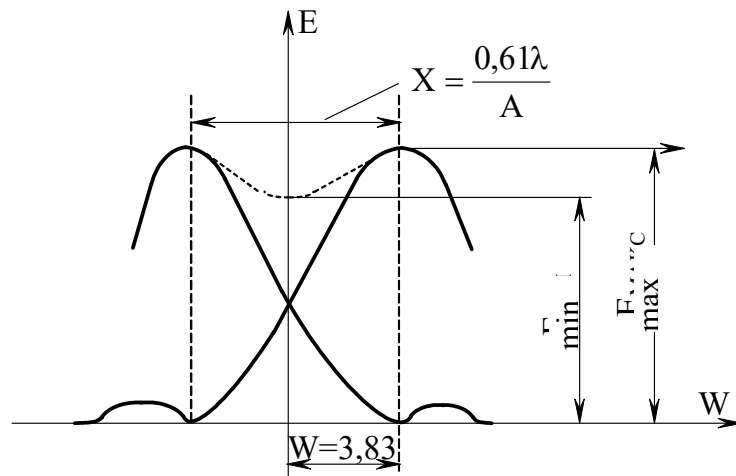


Рисунок 2.18 – Розподіл освітленості в дифракційному зображенні двох точок, розташованих на віддалі, яка відповідає умовам Релея

Якщо дві точки об'єкта освітлюються точковим джерелом, яке знаходиться в безмежності, то сумування дифракційних зображень цих точок слід виконувати з урахуванням інтерференції хвиль, тобто спочатку потрібно сумувати амплітуди, а потім шляхом піднесення до квадрата результуючої амплітуди визначати освітленість. Криву розподілу освітленості в зображенні двох точок для попереднього випадку наведено на рис. 2.19. З цього рисунка видно, що зображення двох точок без власного свічення, зливаються в одну пляму з одним максимумом, і тому їх не можна розрізнити. Розрахунок показує, що для того, щоб дві точки були розрізнені, слід віддаль між ними збільшити приблизно на 30-40%.

Іншим важливим параметром, який впливає на різкість формованого зображення досліджуваного МО є глибина різкості проєкційного об'єктива. При спостереженні ДО звичайним оптичним мікроскопом глибина різкості зображення T – сума трьох величин – акомодативної T_{AK} , геометричної T_G та хвильової глибини T_{XB} : $T = T_{AK} + T_G + T_{XB}$.

В ТСМ акомодативна глибина дорівнює нулю, оскільки віддаль, на яку акомодоване око фіксується площиною екрана монітора, на екрані якого формується зображення ДО.

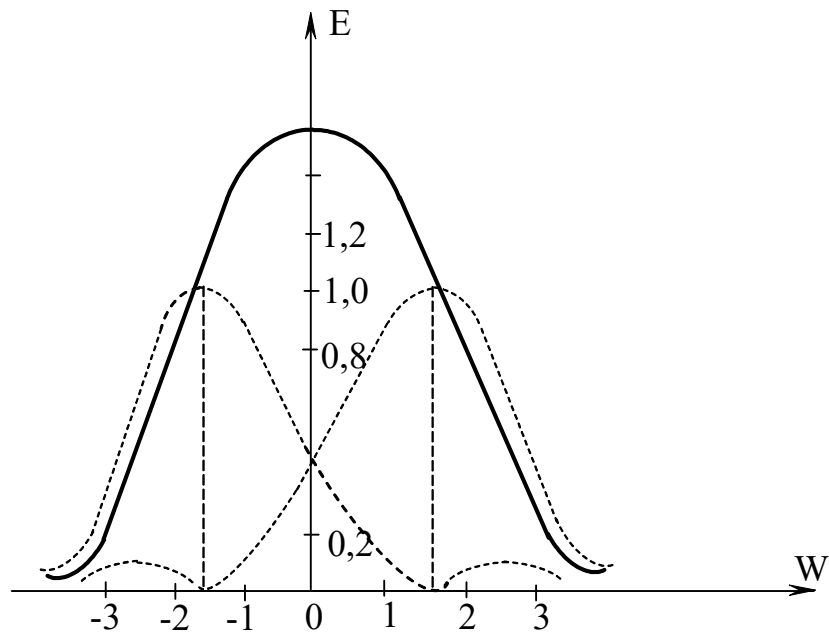


Рисунок 2.19 – Розподіл освітленості в зображенні двох точок без власного свічення і освітленість плоскою хвилею, коли аргумент $W = 3,83$

Глибину різкості ДО визначено відповідно до рис. 2.20 [73]. Якщо проєкційний об'єктив наведено на площину N , то екрану сканувальної ЕПТ, яка розташована на площині N' , відповідає лише різке зображення точки B , яке збігається з площиною N . У цьому випадку точка A та C ДО дадуть зображення у вигляді кругів розсіювання. На практиці немає необхідності одержувати ідеальне різке зображення, оскільки сам ТСМ має обмежену роздільну здатність. Якщо прийняти, що основною ланкою, яка обмежує роздільну здатність, є монітор, то зображення здаватиметься різким, якщо збільшення елементів об'єкта внаслідок нерізкості не перевищуватиме роздільної здатності монітора. Цій роздільній здатності відповідатиме деякий елемент з діаметром z' на екрані ЕПТ, який визначатиметься як $z' = D_{ПК} / q_1$.

Якщо нерізкість не перевищуватиме межі z' , то зображення здаватиметься однаково чітким. При цьому глибину простору, зображення якого утримується достатньо різким, називають глибиною різкості. Очевидно, що ця глибина залежить від діаметра допустимого круга нерізкості z' .

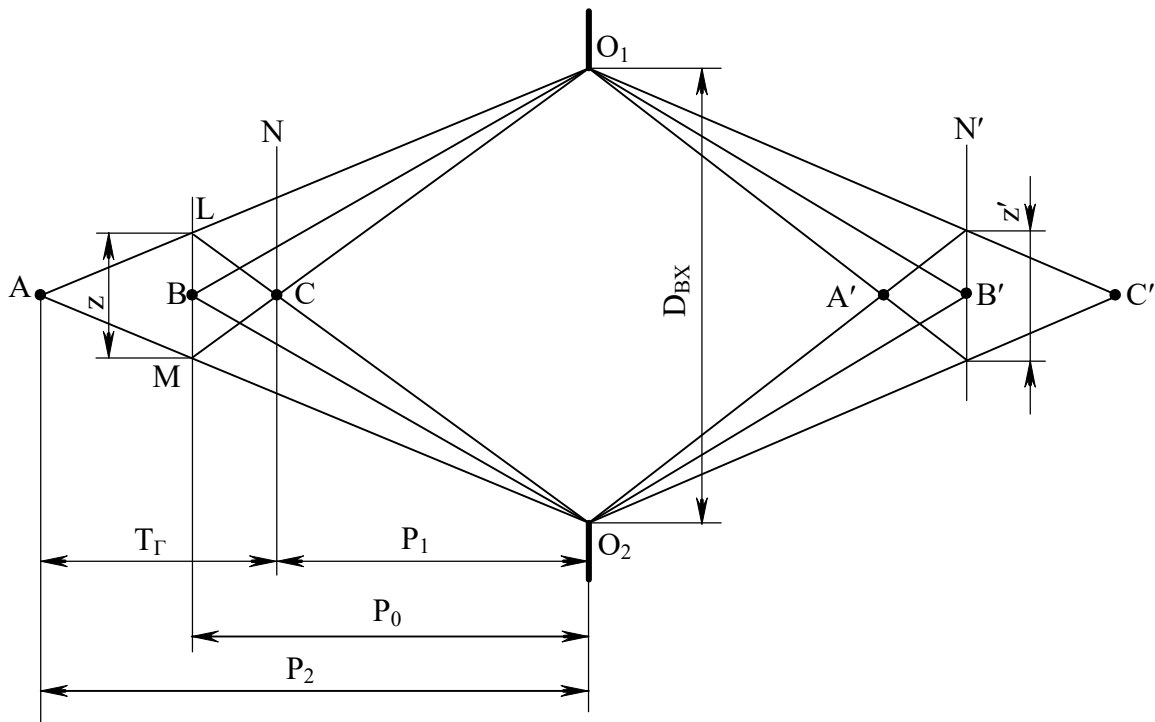


Рисунок 2.20 – До визначення глибини різкості зображення ДО

Знайдемо зв'язок глибини відтвореного простору, що зображується різко, з величиною круга нерізкості z' та параметрами об'єктива. Припустимо, що ЕПТ знаходиться в площині N' , яка проходить через точку B' , тоді площина, яка проходить через точку B' , буде площиною наведення на різкість. Якщо точки A та C розташовані відносно площини N таким чином, що в площині N' їх уявне зображення має вигляд круга діаметром z' , то віддаль $AC = T_{\Gamma}$ є глибиною різкого зображення простору, в якому розташований МО. Кругу нерізкості з діаметром z' у площині наведення відповідає круг з діаметром z . Віддалі до ближньої та дальньої точок ДО, які ще різко відображаються на екрані монітора, будуть:

$$P_1 = \frac{P_0 \cdot D_{BX}}{z + D_{BX}} = \frac{P_0 \cdot D_{BX} \cdot k}{z' + kD_{BX}} = \frac{P_0}{1 + \frac{z'}{k \cdot D_{BX}}}; \quad (2.49)$$

$$P_2 = \frac{P_0 \cdot D_{BX}}{D_{BX} - z} = \frac{P_0}{1 - \frac{z}{D_{BX}}} = \frac{P_0}{1 - \frac{z'}{k \cdot D_{BX}}}. \quad (2.50)$$

Значення глибини різкості зображення знаходиться так:

$$T_{\Gamma} = P_Z - P_1 = P_0 \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{z'}{k \cdot D_{BX}}} - \frac{1}{1 + \frac{z'}{k \cdot D_{BX}}} \right) = P_0 \cdot \frac{2 \frac{z'}{k \cdot D_{BX}}}{1 - \left(\frac{z'}{k \cdot D_{BX}} \right)^2}; \quad (2.51)$$

$$T_{\Gamma} = P_0 \cdot k \cdot q \cdot D_{BX} / (1 - (D_{ПК} / (k \cdot q \cdot D_{BX}))^2). \quad (2.52)$$

Значення впливу на глибину різкості T_{XB} внаслідок хвильових властивостей світла, знаходимо відповідно до виразу: $T_{XB} = \lambda / 2A^2$.

З проведених розрахунків видно, що для мікроскопних об'єктів з великим коефіцієнтом збільшення значним є вплив на глибину різкості хвильових властивостей об'єктива до спотворень.

Проведений аналіз можливого використання різних мікроскопних об'єктів та ЕПТ у відбивному стерео-ТСМ [10] показав, що:

- тип ЕПТ практично не впливає на максимальний коефіцієнт збільшення при збереженні різкості зображення;
- використання ЕПТ з більшим розміром растра дозволяє отримати більшу глибину різкості;
- найбільшу глибину різкості можна отримати при використанні мікрооб'єктів малої кратності збільшення;
- найбільше відношення глибини різкості до діаметра сканувального елемента на ДО можна отримати при використанні мікрооб'єктів типу М-42 та ОМ-23.

Розглянуто вплив неточності наведення об'єктива на різкість на розфокусування елемента досліджуваного об'єкта на екрані монітора (рис. 2.21). У вихідному стані наведення на різкість здійснюється в площині N. На моніторі різко відображається круг діаметром z. Глибина різкості для точок при цьому визначається віддаллю AC. Віддаль від площини об'єктива до площини наведення на різкість – P_0 , віддаль від площини об'єктива до ближньої точки наведення на різкість – P_1 . Припустивши, що наведення на різкість здійснюється в точці N', тобто віддаль до площини наведення на різкість збільшилась на величину ΔP_0 , при розрахунку розфокусування круга діаметром z в площині N враховуємо, що розмір круга сфокусованого

зображення в площині N' також буде z . При наведенні на різкість у площині N' зображення круга z у площині N збільшиться до $z_{maxД}$, а розмір круга, який ще відобразатиметься різко зменшиться до $z_{minД}$.

$$z_{minД} = z \cdot \left(1 - \frac{\Delta P_0}{P_0 - P_1}\right), \quad z_{maxД} = z \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_0}{P_0 - P_1}\right). \quad (2.53)$$

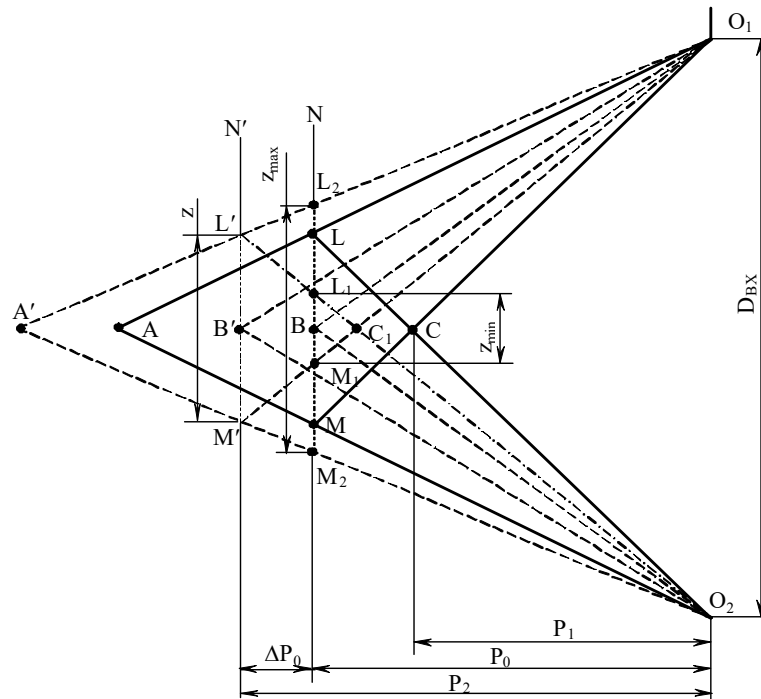


Рисунок 2.21 – До визначення впливу неточності наведення на різкість об'єктива на розфокусування зображення

Якщо нова площина наведення на різкість N' розташована перед площиною N на віддалі P_0 , то значення $z_{minБ}$, та $z_{maxБ}$ становитимуть:

$$z_{minБ} = z \cdot \left(1 - \frac{\Delta P_0}{P_2 - P_0}\right), \quad z_{maxБ} = z \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_0}{P_2 - P_0}\right). \quad (2.54)$$

З урахуванням (2.49), (2.50), отримано:

$$z_{minБ} = z_{minД} = z \cdot \left(1 - \frac{\Delta P_0}{P_0} \cdot \frac{D_{BX} - z}{z}\right); \quad (2.55)$$

$$z_{maxБ} = z_{maxД} = z \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_0}{P_0} \cdot \frac{D_{BX} - z}{z}\right). \quad (2.56)$$

Графіки залежності збільшення розміру елемента зображення у вигляді круга від розфокусування K_{Φ} та відношення неточності наведення на різкість ΔP_0 , до+ максимального діаметра елемента зображення z наведено на рис. 2.22.

З графіків видно, що найбільше розфокусування при неточності наведення на різкість дають мікрооб'єктиви з великим коефіцієнтом збільшення – МЩ та ОМ-41. Найменше розфокусування елемента зображення одержують з використанням об'єктива М-42.

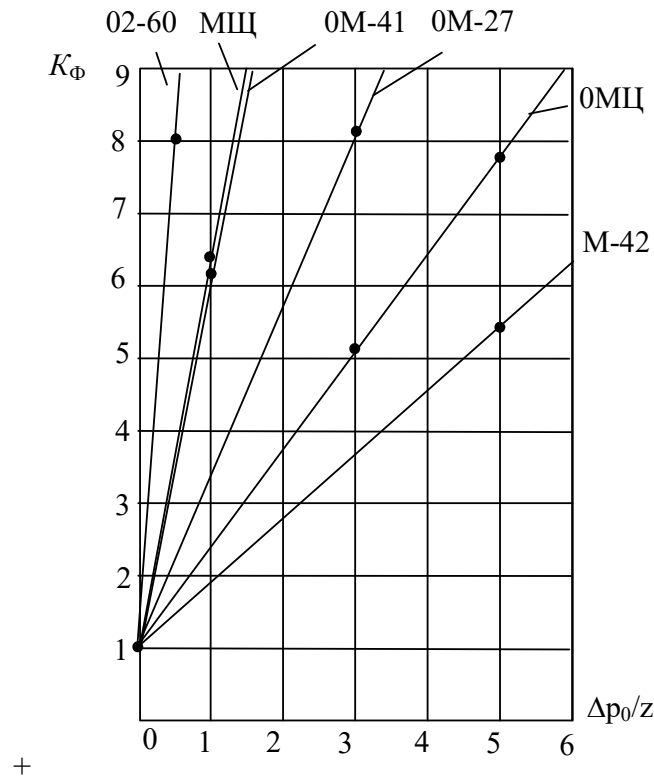


Рисунок 2.22 – Залежності збільшення розміру елемента зображення внаслідок розфокусування K_ϕ при неточності наведення на різкість від відношення $\Delta\rho_0/z$

Графіки залежності необхідного діаметра світної плями ЕПТ від коефіцієнта зміни розміру растра q_1 при різних коефіцієнтах збільшення мікроскопа q наведено на рис. 2.23.

З графіків видно, що при $q = 10$ діаметр світної плями на екрані ЕПТ повинен бути не більшим 4 мкм. З використанням ЕПТ типу 4ЛК7Т максимальний коефіцієнт зміни растра $q_1 = 10$ можна отримати при $q \leq 4$, тобто можливе зменшення розміру растра в 4 рази без втрат різкості зображення.

Розглянуто вплив яскравості свічення світної плями ЕПТ на діаметр світної плями i , відповідно, на різкість формованого зображення на екрані монітора з таких міркувань. Розмір світної плями можна визначити наближено на основі теореми Лагранжа-Гемгольца так:

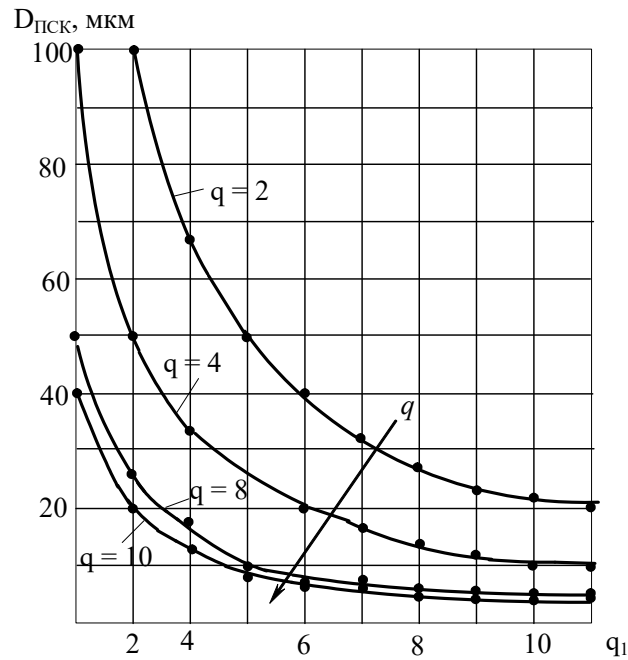


Рисунок 2.23 – Залежність необхідного діаметра світної плями ЕПТ від масштабування растра при різних коефіцієнтах збільшення мікроскопа q

$$r_k = \sqrt{U_k} \cdot \operatorname{tg} \gamma_1 = r_{II} \cdot \sqrt{U_{II}} \cdot \operatorname{tg} \gamma_2, \quad (2.57)$$

де r_k – радіус кросовера;

U_k – потенціал в площині кросовера;

γ_1 – апертурний кут зі сторони кросовера;

r_{II} – радіус світної плями;

U_{II} – потенціал в площині світної плями;

γ_2 – апертурний кут зі сторони світної плями.

Оскільки апертурний кут в ЕПТ є дуже малим, то:

$$r_{II} = a \cdot \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \cdot \sqrt{\frac{U_0}{U_{II}}}. \quad (2.58)$$

З виразу (2.58) видно, що радіус світної плями в першому наближенні не залежить від потенціалу біля кросовера, і його можна зменшити внаслідок зменшення початкових швидкостей електронів. Радіус світної плями можна зменшити також внаслідок підвищення потенціалу в площині екрана трубки, яке є вигідним також з таких причин: зменшення просторового заряду, збільшення яскравості свічення екрана ЕПТ, зменшення впливу зовнішніх електростатичних та магнітних полів тощо. Тому в ЕПТ доцільно

використовувати максимально допустиму анодну напругу для отримання максимальної різкості формованого зображення ДО.

+На практиці крива розподілу яскравості в світній плямі збігається з кривою розподілу струму в перерізі кросовера лише тоді, коли весь пучок електронів, що виходить з кросовера, доходить до екрана. Практичні дослідження розподілу яскравості по перерізу світної плями ЕПТ високої роздільної здатності показали, що крива розподілу яскравості описується тим же експоненціальним законом, якому підпорядковується розподіл густини струму в кросовері:

$$B = B_0 \cdot e^{\frac{-r^2}{b^2}}, \quad (2.59)$$

де B_0 – яскравість в центрі світної плями;

b – постійна.

+Наведена ідеалізована теорія формування світної плями, як відображення кросовера, приводить до висновку про незалежність роздільної здатності від абсолютної величини струму променя. Однак, експериментальні дослідження показують, що теоретично очікувана незалежність радіуса плями від струму променя не спостерігається при дуже малих струмах ЕПТ, які не перевищують декілька мкА, тобто, якщо можна знехтувати впливом просторового заряду в ділянці формування світної плями. Вплив просторового заряду є помітним при збільшенні струму променя, крім того, ще збільшуються апертурні кути, що призводить до збільшення аберацій і, як наслідок, до зменшення роздільної здатності. Аналітичний розрахунок залежності роздільної здатності від струму променя є дуже громіздким, і тому аналіз цієї залежності доцільно проводити на основі експериментальних даних. Експериментально побудовано дослідну криву залежності роздільної здатності від струму променя для ЕПТ високої роздільної здатності типу 13ЛК8Б, де за 100% прийнято роздільна здатність при струмі 1 мкА (рис. 2.24).

Аналогічний графік залежності зміни роздільної здатності від струму ЕПТ можна подати аналітичним виразом з точністю 1% таким чином:

$$+ \frac{R}{R_0} = \left(1,07 - 0,018 I_{\text{ЕПТ}} - \frac{0,07}{2^{0,4 \cdot I_{\text{ЕПТ}}}} \right), \quad (2.60)$$

де R_0 – роздільна здатність ЕПТ при струмі трубки $I_{\text{ЕПТ}} = 1$ мкА; $R_0 = 1/r_0$;

де r_0 – радіус світної плями при струмі трубки $I_{\text{ЕПТ}} = 1$ мкА;

R – роздільна здатність сканувальної трубки, при довільному струмі $I_{\text{ЕПТ}}$ в робочому режимі, більшому від 1 мкА;

$I_{\text{ЕПТ}}$ – струм електронно-променевої трубки в мкА.

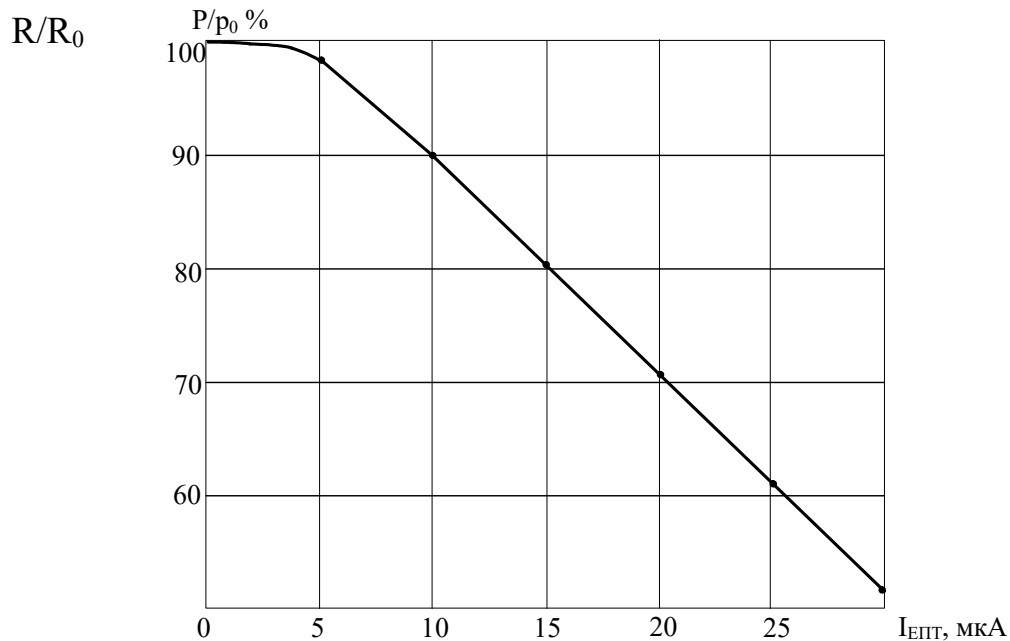


Рисунок 2.24 – Відносна залежність роздільної здатності ЕПТ високої роздільної здатності від струму променя

З графіка видно, що роздільна здатність ЕПТ погіршується на 30% при збільшенні струму до 22 мкА. Оскільки ЕПТ в ТСМ працюють при великих рівнях яскравості, які забезпечуються великими струмами, то вплив яскравості на зміну різкості зображення на екрані монітора може бути суттєвим.

Необхідно розглянути можливість використання імпульсного режиму підсвічування світної плями. При цьому реальними є два варіанти використання імпульсного режиму підсвічування: сигнал типу "меандр" при безперервному русі світної плями (типова телевізійна розгортка) та імпульсами при формуванні розгортки сигналом сходинчатої форми, коли імпульс підсвічування подається в той момент, коли світна пляма є нерухома. У першому варіанті частота імпульсів підсвічування повинна бути такою, щоб світна пляма за час підсвічування переміщалася не більше, ніж на половину свого діаметра. Тоді, відповідно до рис. +2.24, при максимальному струмі ЕПТ

– 30 мкА роздільна здатність погіршується до 53% від максимальної, а якщо використовувати імпульс струму 30 мкА для підсвічування світної плями, то середній струм ЕПТ становитиме 25 мкА, що відповідає погіршенню роздільної здатності лише до 81%. Це означає, що з використанням імпульсного підсвічування можна отримати вигаш у роздільній здатності. Для наведеного вище конкретного випадку вигаш у покращенні роздільної здатності становитиме більше, ніж у 1,5 рази ($0,81R_0/0,53R_0 = 1,52$). Однак, такий режим вимагатиме значного розширення смуги пропускання відеопідсилювача. При необхідній роздільній здатності по рядку $N = 500$ елементів і тривалості прямого ходу рядкової розгортки $t_{ПХР} = 52$ мкс частота імпульсів підсвічування в режимі меандра складатиме $F_{П} = 2N/t_{ПХР} = 19,2$ МГц, що відповідає тривалості імпульсу підсвічування 52 нс. Ці імпульси повинні мати форму, близьку до прямокутної, тобто виконуватися умова тривалості фронтів, які не повинні бути меншими $t_{\phi} < 0,2t_i = 0,2 \cdot 52$ нс = 10 нс, що відповідає верхній граничній частоті підсилювача імпульсів підсвічування 35 МГц. Таке значення верхньої частоти підсилювача імпульсів підсвічування значно перевищує верхню граничну частоту сигналу, що дорівнює 6,5 МГц, і викликає додаткові ускладнення під час реалізації схеми підсилювача імпульсів підсвічування.

Використання покрокової розгортки вздовж рядка призводить до значного зменшення частоти рядкової розгортки внаслідок того, що тривалість одного кроку не може бути меншою від часу тривалості переміщення світної плями в сусідню адресовану точку з великою точністю. Цей час для сучасних перетворювачів напруга-струм, які використовуються для формування струму в котушках відхилення, є не меншим за 0,5 мкс. При тривалості імпульсу підсвічування 0,5 мкс і роздільній здатності 500 елементів, тривалість формування одного рядка розгортки буде не меншою, ніж 500 мкс, а її частота становитиме не більше, ніж 2 кГц. Однак, такий режим перспективніший для використання в ТСМ з метою забезпечення великого відношення сигнал/шум при формуванні відеосигналу після ФЕП.

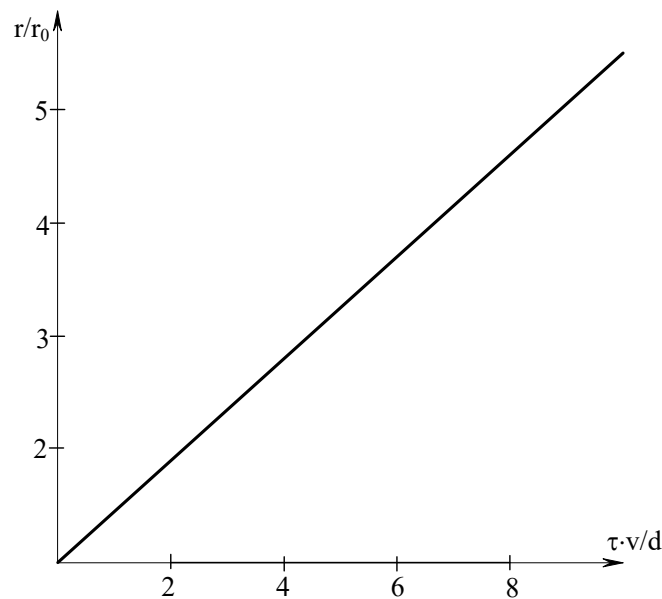


Рисунок 2.25 – Залежність відношення розмірів рухомої та нерухомої світної плями від відносною швидкості сканування

Необхідно зазначити, що у разі зменшенні розміру сканувального растра вздовж рядка швидкість сканування також зменшується. При зменшенні розмірів растра в 10 разів розмір рухомої світної плями майже збігатиметься з розміром світної плями в статичному режимі. За необхідності зміни діаметра світної плями при відомій швидкості сканування можна знайти розмір світної плями з графіка, наведеного на рисунку 2.25, де r/r_0 – відносна зміна розміру світної плями; τ – час післясвічення люмінофора; v – швидкість сканування, $d = r/2$ – півширина статичної плями.

Для отримання збільшення ТСМ 10000^x необхідно збільшувати розміри екрана монітора зі збереженням його роздільної здатності. Застосовуючи мікрооб'єктив ОМ-41, із збільшенням 90^x та ЕПТ типу 13ЛК необхідним є розмір екрана монітора не менший за 90', тобто 2,35 м, що вимагає використання поліекранів великих розмірів.

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано метод визначення стійкості перетворювача напруга-струм з комплексним навантаженням. Наведено аналітичні вирази для розрахунку полюсів амплітудно-частотної характеристики, які забезпечать

стійку роботу перетворювача. Показано, як збільшити стійкість роботи перетворювача внаслідок використання для операційного підсилювача корекції “вперед”. Наведено вираз для розрахунку опору резистора шунтування з точки зору забезпечення стійкості.

2. Досліджено граничну швидкість переміщення сканувального елемента з точки зору збільшення його розмірів. Встановлено, що при використанні розгортки із збільшеною до 160 Гц частотою полів, швидкість сканування зростає більше, ніж в 3 рази, тоді апертура сканувальної плями збільшиться в 2,5 рази порівняно з апертурою при телевізійному розкладі. Для запобігання цьому доцільно сканувати в телевізійному чи малокадровому режимі, а для забезпечення потрібної частоти оновлення зображення на моніторі – застосовувати перетворювач +параметрів розкладу зображення.

3. Запропоновано метод формування освітлювального растра в телевізійному сканувальному мікроскопі, який дозволить значно підвищити швидкодію формування сканувального растра. Збільшення швидкості досягнуто через врахування часу переміщення сканувального елемента в точку з заданими координатами з заданою точністю при різних величинах переміщення.

4. Визначено глибину різкості зображення досліджуваного мікрооб’єкта в телевізійному сканувальному мікроскопі. Досліджено вплив неточності наведення різкості об’єктива на розфокусування зображення. Наведено графіки залежності необхідного діаметра сканувального елемента від коефіцієнта зміни розміру растра при різних коефіцієнтах збільшення мікроскопа. Розглянуто вплив неточності наведення різкості об’єктива на розфокусування елемента досліджуваного об’єкта на екрані монітора. Показано, що із застосуванням ЕПТ типу 4ЛК7Т максимальний коефіцієнт зміни растра можна отримати при зменшенні розміру растра в 4 рази без втрат різкості зображення.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СКАНУВАЛЬНОГО МІКРОСКОПА

3.1. Визначення вимог до сканувальної електронно-променевої трубки, придатної до використання в ультрафіолетовій мікроскопії

Використовувана як джерело освітлення ЕПТ, в телевізійному сканувальному мікроскопі повинна забезпечувати:

- необхідний спектр свічення екрана в УФ діапазоні;
- необхідну яскравість свічення екрана сканувальної ЕПТ для отримання якісного зображення досліджуваного МО у видимому діапазоні спектра на екрані монітора;
- необхідну роздільну здатність для забезпечення можливості масштабування зображення досліджуваного МО на екрані монітора шляхом зміни розміру сканувального растра на екрані трубки в широких межах без погіршення якості зображення.

Вся область УФ випромінювання для досліджень в біології поділяється на ближню (400...200 нм) і дальню або вакуумну (200...10 нм); остання назва обумовлена тим, що дослідження проводять за допомогою вакуумних спектральних приладів. Оптичні властивості речовин в УФ області спектра значно відрізняються від їх оптичних властивостей у видимій області. Характерною рисою її є зменшення прозорості (збільшення коефіцієнта поглинання) більшості тіл, прозорих у видимій області. Наприклад, звичайне скло – непрозоре при довжині хвилі $\lambda < 320$ нм; в більш короткохвильових УФ-променях непрозорими стають всі відомі речовини, зокрема і повітря.

Враховуючи необхідність проведення досліджень біологічних МО, спектр випромінювання використовуваної ЕПТ в ТСМ повинен знаходитися в ближній області (довжина хвилі 400...200 нм). Аналіз виконуваних робіт на оптичних мікроскопах показує, що найчастіше використовується при

біологічних дослідженнях УФ випромінювання з довжиною хвилі 400...350 нм. Тому спектр свічення сканувальної ЕПТ повинен відповідати ближній області УФ-випромінювання.

Для визначення необхідної яскравості свічення сканувальної ЕПТ з метою отримання якісного зображення досліджуваного МО у видимому діапазоні спектра на екрані монітора використано методику, наведену в [23]. У цій роботі показано, що якість відтворюваного на екрані зображення значною мірою залежить від помітності шумів, основними джерелами яких у ТСМ є формувач повного відеосигналу, фотоелектронний помножувач та ЕПТ.

У свою чергу, помітність шумів визначається відношенням сигнал-шум на виході формувача відеосигналу [23]. Як відомо, у телевізійних системах відношення сигнал-шум є тим більше, чим вищою є освітленість об'єкта за умови, що джерело світла можна вважати таким, що не шумить. Відомим є метод визначення необхідної освітленості об'єкта для такого випадку [23]. Однак, використовуваним у ТСМ джерелом світла, як згадувалось вище, є ЕПТ. Для всіх ЕПТ характерний значний рівень шуму і, отже, до вибору ЕПТ треба підходити з урахуванням шумів ЕПТ.

Структурна схема ТСМ з точки зору формування відеосигналу наведена на рис. 1.2. Якщо на фотокатод ФЕП за допомогою конденсорної лінзи в оптичному каналі потрапляє світловий потік $\Phi_{ДО}$ від елемента досліджуваного об'єкта, то струм, який буде протікати на виході перетворювача, складатиме:

$$I_{ФЕП} = \varepsilon \cdot \Phi_{ДО} \cdot P_{ОК2} \cdot \Omega_{ОК2} = \frac{\varepsilon \cdot \Phi_{ДО} \cdot P_{ОК2} \cdot S_{ОК2}}{L_{ОК2}^2}, \quad (3.1)$$

де ε – анодна чутливість ФЕП;

$P_{ОК2}$ – коефіцієнт пропускання конденсорної лінзи в оптичному каналі;

$\Omega_{ОК2}$ – тілесний кут, в межах якого світловий потік від об'єкта потрапляє на конденсорну лінзу;

$L_{ОК2}$ – віддаль від досліджуваного об'єкта до конденсорної лінзи.

Відношення сигнал/шум на виході фотоелектронного помножувача і, відповідно, на вході формувача відеосигналу $\Psi_{ВХФС}$ з урахуванням лише власних шумів формувача сигналу можна визначити як

$$\Psi_{ВХФС} = \frac{\varepsilon \cdot \Phi_{ДО} \cdot P_{ОК2} \cdot S_{ОК2} \cdot \sqrt{R_H}}{L_{ОК2}^2 \cdot \sqrt{4k \cdot T \cdot \Delta F}}, \quad (3.2)$$

де R_H – опір навантаження фотоелектронного помножувача,

k – постійна Больцмана;

T – температура, К;

ΔF – смуга пропускання відеосигналу;

$S_{ОК2}$ – площа вхідної зіниці конденсорної лінзи.

З виразу (3.2) можна знайти світловий потік від досліджуваного МО $\Phi_{ДО}$, який необхідний для виконання заданого відношення сигнал/шум на виході ФЕП, яке надалі забезпечуватиме задану якість зображення на екрані монітора:

$$\Phi_{ДО} = \frac{\Psi_{ВХФС} \cdot L_{ОК2}^2 \cdot \sqrt{4k \cdot T \cdot \Delta F}}{\varepsilon \cdot P_{ОК2} \cdot S_{ОК2} \cdot \sqrt{R_H}}. \quad (3.3)$$

З іншого боку, світловий потік від досліджуваного МО $\Phi_{ДО}$, залежить від яскравості свічення сканувального елемента ЕПТ $B_{ЕПТ}$, площі цього елемента $S_{ЕПТ}$, коефіцієнта оптичного пропускання мікроскопного об'єктива $P_{ОК1}$, розташованого в першому оптичному каналі ОК1, тілесного кута $\Omega_{ОК1}$, в якому світло від сканувальної ЕПТ потрапляє через мікроскопний об'єктив на досліджуваний МО:

$$\Phi_{ДО} = B_{ЕПТ} \cdot S_{ЕПТ} \cdot P_{ОК1} \cdot \Omega_{ОК1} = \frac{B_{ЕПТ} \cdot S_{ЕПТ} \cdot P_{ОК1} \cdot S_{ОК1}}{L_{ОК1}^2}, \quad (3.4)$$

де $S_{ОК1}$ – площа вхідної зіниці мікроскопного об'єктива;

$L_{ОК1}$ – віддаль від площини екрана ЕПТ до мікроскопного об'єктива.

Прирівнюючи праві частини виразів (3.3) і (3.4), можна знайти мінімальну величину яскравості свічення елемента сканувальної ЕПТ $B_{ЕПТ}$, необхідну для забезпечення заданого відношення сигнал-шум на вході формувача сигналу:

$$B_{EПТ} = \frac{\Psi_{ВХФС} \cdot L^2_{ОК1} \cdot L^2_{ОК2}}{\varepsilon \cdot P_{ОК1} \cdot P_{ОК2} \cdot S_{ОК1} \cdot S_{ОК2} \cdot S_{EПТ}} \sqrt{\frac{4k \cdot T \cdot \Delta F}{R_H}}. \quad (3.5)$$

Цей вираз дозволяє визначити мінімально необхідну величину яскравості свічення ЕПТ, яка забезпечить вибране відношення сигнал/шум на виході формувача ел+ектронного сигналу зображення.

Очевидно, що визначене у такий спосіб значення яскравості свічення елемента світного растра не дає остаточного розв'язку поставленої задачі, оскільки ще не враховані шуми ЕПТ, ФЕП та резистора навантаження ФЕП. Врахувати вплив ЕПТ на якість формованого зображення досліджуваного об'єкта можна скориставшись [8]:

$$\bar{U}_{ШЕПТ}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_0}{2\pi \cdot \nu \cdot \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-r^2 \cdot \omega^2}{\nu}\right) d\omega \quad (3.6)$$

де $\bar{U}_{ШЕПТ}$ – середньоквадратичне значення напруги шуму на виході ФЕП, спричинене шумом ЕПТ за умови, що шуми ФЕП відсутні; B_0 – коефіцієнт, який визначається від+повідно до виразу:

$$B_0 = J_0^2 \cdot A \cdot R_H^2 \cdot \delta^3 \cdot P_{ОК1}^2, \quad (3.7)$$

де J_0 – середня густина емісійного струму катода;

A – коефіцієнт, який враховує зміну світловіддачі люмінофора по полю екрана ЕПТ (при малих кутах відхилення, близький до 1);

δ – коефіцієнт вторинної емісії ФЕП;

r – радіус кросовера ЕПТ;

ω – просторова частота;

ν – швидкість сканування екрана ЕПТ.

Вплив ФЕП на якість формованого зображення досліджуваного об'єкта можна визначити, скор+иставшись виразом для середньоквадратичного значення шумового струму на виході ФЕП:

$$\bar{I}_{ШФПТ}^2 = 2e \cdot I_0 \cdot \Delta F \cdot \frac{\delta^{2p+1}}{\delta-1} - 2e \cdot \frac{I_{ФЕП}}{\delta^2} \cdot \Delta F \cdot \frac{\delta^{2p+1}}{\delta-1}, \quad (3.8)$$

де e – заряд електрона;

I_0 – струм першого диноду +ФЕП;

$I_{ФЕП}$ – струм на виході ФЕП за умови, що шуми останнього відсутні;

ΔF – смуга частот,

p – число динодів ФЕП.

Вплив опору резистора навантаження R_H на якість формованого зображення врахуємо за допомогою відомого виразу

$$\bar{U}_{ШR_H}^2 = 4k \cdot T \cdot R_H \cdot \Delta F, \quad (3.9)$$

де k – постійна Больцмана; T – температура.

Враховуючи (3.6), (3.7) і (3.8), середньоквадратичне значення струму на виході ФЕП визначимо як:+

$$\bar{I}_{ФЕП\Sigma}^2 = \bar{I}_{ФЕП}^2 + (\bar{U}_{ШR_H}^2 + \bar{U}_{ШЕПТ}^2) / R_H^2, \quad (3.10)$$

а відношення сигнал/шум на виході ФЕП:

$$\begin{aligned} \Psi_{ФЕП} &= I_{ФЕП} / \sqrt{\bar{I}_{ФЕП\Sigma}^2} = \\ &= \frac{I_{ФЕП} \cdot R_H \cdot \sqrt{\delta - 1}}{\sqrt{2e \cdot I_{ФЕП} \cdot \Delta F \cdot R_H^2 \cdot \delta^{p+1} + (4k \cdot T \cdot R_H \cdot \Delta F + U_{ШЕПТ}^2) \cdot (\delta - 1)}}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Для забезпечення заданої якості відтворення зображення досліджуваного об'єкта повинна виконуватися умова: $\Psi_{ФЕП} > \Psi_{ВХФС}$.

Кількісна оцінка доданків під коренем у знаменнику виразу (3.11) показує, що найбільший вплив на значення відношення сигнал/шум $\Psi_{ФЕП}$ має середньоквадратичне значення шуму струму ФЕП при відповідному значенні коефіцієнта вторинної емісії δ . Графік залежності $\Psi_{ФЕП} = f(\delta)$ з опором навантаження $R_H = 100$ кОм і смузі пропускання $\Delta F = 6,5$ МГц, наведений на рис. 3.2 [8]. Якщо коефіцієнт шуму формувача сигналу $\Psi_{ФС} = 1,2$ і $\Psi_{ВХФС} = 30$, (добра якість зображення) $\Psi_{ВХФС} = 36$. Для забезпечення $\Psi_{ФЕП} > \Psi_{R_H}$ відповідно до рис. 3.2 [24] значення коефіцієнта вторинної емісії ФЕП δ не повинно перевищувати 1,8. Цей розрахунок показує, що для забезпечення вибраної якості відтворення зображення досліджуваного об'єкта необхідно

використовувати фотоелектронні помножувачі при знижених напругах живлення.

Якщо, наприклад, орієнтуватись на використання фотоелектронного помножувача типу R3896 виробництва японської фірми HAMAMATSU [11], у якого анодна чутливість $\varepsilon = 500$ А/лм, то відповідно до (5) мінімально необхідна яскравість свічення сканувальної ЕПТ при $\Psi = 30$; $\Psi_{\text{ВХФС}} = 1,2$; $L_{\text{OK1}} = 0,5$ м; $L_{\text{OK2}} = 0,01$ м; $P_{\text{OK1}} = 0,8$; $P_{\text{OK2}} = 0,8$; $S_{\text{OK1}} = 2 \times 10^{-5}$ м² (діаметр вхідної зіниці мікроскопного об'єктива 5 мм); $S_{\text{OK2}} = 8 \times 10^{-5}$ м² (діаметр вхідної зіниці конденсора 10 мм); $S_{\text{ЕПТ}} = 1 \times 10^{-10}$ м² (площа одного елемента світного растра при розмірі світного растра на екрані сканувальної ЕПТ 10×10^{-6} мм і роздільній здатності 2000×2000 елементів); $\Delta F = 6,5$ МГц; $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/град; $T = 290$ К; $R_{\text{НФЕП}} = 100$ кОм, складатиме 18000 кд/м². Спеціальні сканувальні проєкційні ЕПТ, зазвичай, забезпечують таку яскравість. Однак, такі ЕПТ, які можна використати в сканувальному мікроскопі, наприклад, У4ТП1И, мають значно меншу яскравість свічення екрана. Тому для забезпечення необхідної якості, формованого на екрані відео-контрольного пристрою зображення МО, необхідно зменшувати швидкість сканування і збільшувати опір навантаження ФЕП. Внаслідок переходу роботи сканувального мікроскопа в малокадровий режим (наприклад, період повтору кадрової розгортки 20 с) необхідна смуга пропускання тракту формування відеосигналу зменшиться до 6,5 кГц, а резистор навантаження ФЕП збільшиться до 1 МОм. Це приведе до зменшення необхідної яскравості свічення екрана ЕПТ до 180 кд/м² ($180/683 = 0.259$ Вт/ср · м²). Отже, за необхідності забезпечення вищої якості відтворення зображення досліджуваного мікрооб'єкта необхідно вибирати ФЕП з більшою катодною чутливістю, збільшувати опір резистора навантаження ФЕП у межах, дозволених з точки зору смуги пропускання ФС та зменшувати швидкість розгортки променя сканувальної ЕПТ.

При визначенні необхідної роздільної здатності сканувальної ЕПТ необхідно врахувати:

- роздільну здатність відтворюваного зображення досліджуваного об'єкта на екрані монітора;

- необхідний діапазон зміни масштабу зображення шляхом зміни розмірів сканувального растра;
- мінімально можливий діаметр сканувальної плями на екрані трубки при вибраному коефіцієнті модуляції яскравості свічення;
- максимально можливі розміри сканувального растра на екрані сканувальної трубки;
- роздільну здатність елементів, що входять до складу оптичного каналу.

Мінімально можливі розміри сканувального растра на МО визначаються розмірами растра на екрані сканувальної ЕПТ, а також використовуваним об'єктивом та конструктивними розмірами оптичного каналу ОК, який формує сканувальний растр на МО. При виборі ЕПТ потрібно передбачити, щоб її роздільна здатність не погіршувала необхідної роздільної здатності загалом, тобто повинна виконуватися умова:

$$D_{ПСК} \leq D_{ПК} / q \cdot q_1, \quad (3.12)$$

де $D_{ПСК}$ – діаметр світної плями сканувальної трубки;

$D_{ПК}$ – діаметр світної плями кінескопа, використовуваного ВКП;

q – лінійне збільшення телевізійної системи мікроскопа, яке дорівнює відношенню ширини растра в площині об'єкта до ширини зображення на моніторі;

q_1 – коефіцієнт телевізійного збільшення внаслідок зменшення растра на екрані сканувальної трубки (зменшення розмірів растра сканувальної трубки дозволяє пропорційно збільшувати загальний коефіцієнт збільшення мікроскопа):

$$q_1 = b_{ПСК_{MAX}} / b_{ПСК_{MIN}}, \quad (3.13)$$

де $b_{ПСК_{MAX}}$ – максимальний розмір ширини растра на екрані сканувальної трубки;

$b_{ПСК_{MIN}}$ – мінімальний розмір ширини растра на екрані сканувальної трубки.

Орієнтуючись на використання у відео-контрольному пристрої екрану з діагоналлю 21' (54 см), а у сканувальній частині – проєкційної трубки, яка має робочий розмір екрана $d = 30$ мм, діаметр світної сканувальної плями $D_{ПСК} = 10$

мкм та формат растра $k = 4/3$, який вписується в екран сканувальної трубки, то розміри растра на екрані сканувальної трубки при форматі, який вписується в задане робоче поле, будуть:

для ширини растра

$$b_{СК_{MAX}} = \frac{d \cdot k}{\sqrt{1+k^2}} = \frac{30 \cdot 1,33}{\sqrt{1+1,33^2}} = 24 \text{ мм.} \quad (3.14)$$

для висоти растра

$$h_{СК_{MAX}} = b_{СК_{MAX}} / k = 24 / 1,33 = 18 \text{ мм.} \quad (3.15)$$

Горизонтальний розмір растра монітора з використанням екрана з діагоналлю 21" (54 см), складає $b_E = 340$ мм. Мінімальне збільшення телевізійної частини мікроскопа при цьому буде:

$$q = b_E / b_{СК_{MAX}} = 340 / 24 = 14. \quad (3.16)$$

За необхідності з виразу (3.12) можна знайти діапазон зміни растра на екрані сканувальної трубки без погіршення якості формованого зображення МО на екрані монітора.

3.2. Визначення вимог до оптичного каналу телевізійного сканувального оптичного мікроскопа

Ультрафіолетовий ТСМ, який, завдяки закладеному принципу сканування мікрооб'єкта зондом електромагнітного випромінювання в ультрафіолетовому та видимому діапазонах, дозволяє перевищити класичну дифракційну межу роздільної здатності [77], може з успіхом функціонувати замість багатьох згаданих вище модифікацій. Для цього відповідно повинні бути сформульовані вимоги до оптичного каналу мікроскопа, а саме: забезпечення прямого та інвертованого режиму роботи мікроскопа; роботу в режимі світла, яке проходить через досліджуваний МО та відбитого світла; роботу в режимі темного поля та режимі наведеної люмінесценції.

Відповідно до вибраних режимів роботи структурні схеми оптичного каналу виглядають так (рис. 3.1):

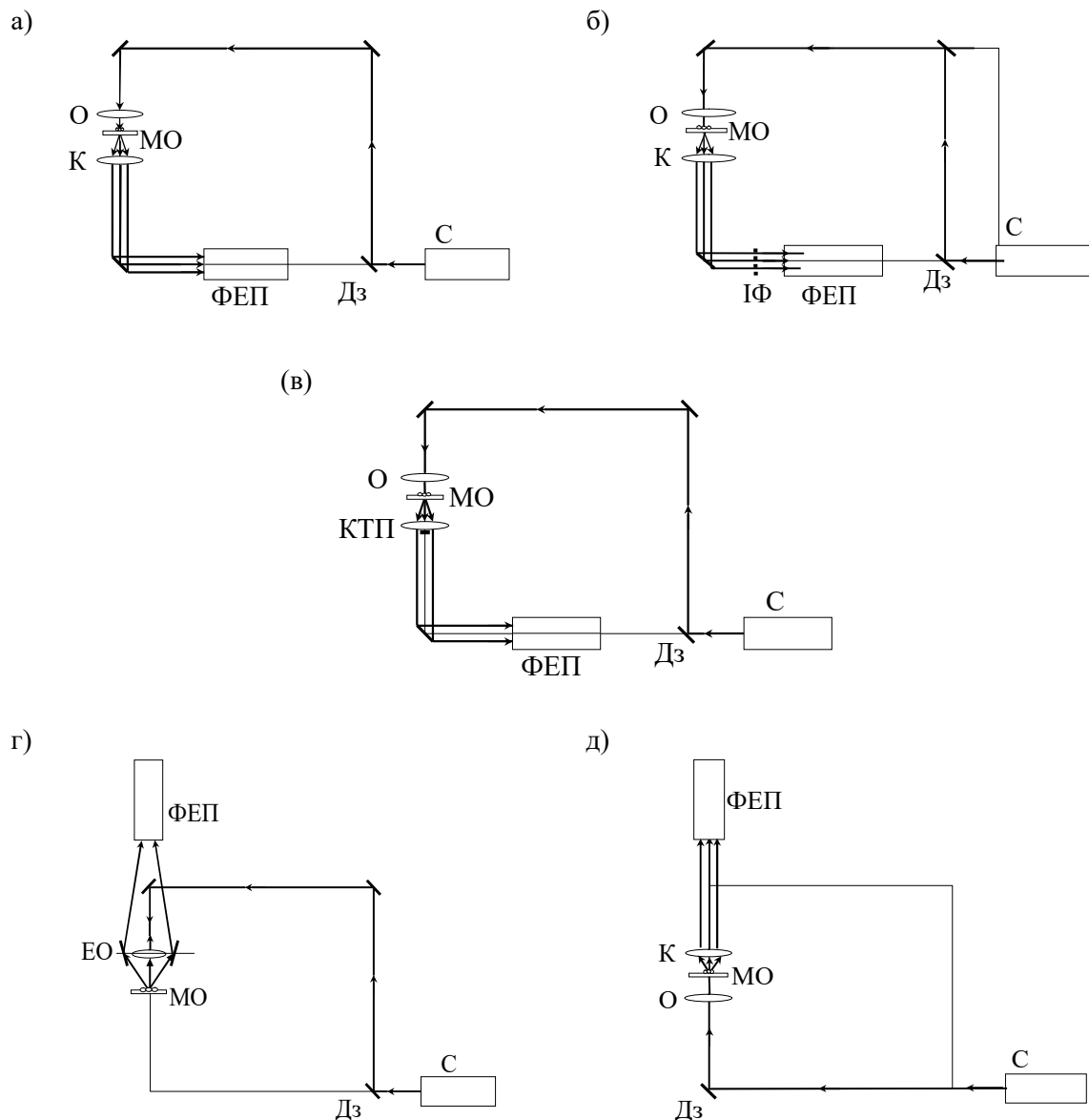


Рисунок 3.1 – Варіанти структурної схеми оптичного каналу ТСМ: а) при роботі в прямому режимі; б) при роботі в режимі наведеної люмінесценції; в) при роботі в режимі темного поля; г) при роботі в режимі відбитого світла; д) при роботі в інвертованому режимі

– робота в прямому режимі (рис. 3.1,а): світло від джерела випромінювання С (монокристалічний екран ЕПТ сканера) через комутуючі та стаціонарні дзеркала Дз опромінює зверху через об'єтив О сфокусованим світловим зондом досліджуваній об'єкт МО на предметному столі. Світло, що

пройшло крізь препарат, через конденсор К потрапляє на дзеркало під ним і спрямовується на перетворювач випромінювання–сигнал (ФЕП);

– робота в режимі наведеної люмінесценції (рис. 3.1,б): в прямому режимі після штатного конденсора розташовуються вузькосмугові інтерференційні фільтри ІФ на довжину хвилі досліджуваної люмінесценції. У випадку використання перетворювачів випромінювання-сигнал з вузькими смугами спектральної чутливості (при дослідженні слабких світлових потоків) оптичний канал передбачає їх оперативну заміну в залежності від досліджуваної ділянки спектра люмінесценції.

– робота в режимі темного поля (рис. 3.1,в): в прямому режимі штатний конденсор мікроскопа замінюється на конденсор темного поля КТП (ОИ-13 А-1,5). Пряме світло від зонда затримується конденсором, а розсіяне препаратом проходить через конденсор на перетворювач випромінювання-сигнал.

– робота у відбитому світлі (рис. 3.1,г): при розташуванні дзеркал у прямому режимі перед епіоб’єктивом ЕО вводиться дзеркало центральної зони світлового пучка, яке освітлює лінзову компоненту об’єктива. Розсіяне препаратом світло, збирається дзеркальною компонентою і скеровується на перетворювач світло-сигнал, розташований замість бінокулярної головки;

– робота в інвертованому режимі (рис. 3.1,д): світло при відведеному комутуючому дзеркалі через стаціонарне дзеркало скеровується на предметний столик знизу через об’єktiv, розташований замість конденсора. Світло, яке пройшло через препарат, потрапляє на перетворювач випромінювання–сигнал, розташований замість бінокулярної головки.

З точки зору забезпечення ефективності використання випромінюваного світлового потоку важливе значення має коректний вибір типу перетворювача випромінювання-сигнал. Як відомо, МО досліджуються опроміненням їх ультрафіолетовими променями в області довжин хвиль 250 – 400 нм і надалі перетворенням світла, що проходить, та відбитого світла в електричний сигнал за допомогою перетворювача випромінювання-сигнал. В зв’язку з малими значеннями величин світлових потоків перетворювачі повинні мати високу чутливість. Цей параметр і обумовив вибір типу перетворювачів –

фотоелектронних помножувачів ФЕП. З використанням ультрафіолетового спектра першим критерієм відбору повинна бути спектральна характеристика фотокатода. З конструктивних міркувань бажано мати перетворювач з рівномірною чутливістю по всьому діапазоні освітлювання МО – від 250 нм до 700 нм. Аналіз перетворювачів, поширених на теренах країн СНД, показав, що немає жодного перетворювача, який би перекривав згаданий вище діапазон з достатньою рівномірністю чутливості. Тому при виборі конкретного перетворювача для сканувального мікроскопа необхідно враховувати ті смуги спектра при максимальній чутливості, в яких будуть проводитись дослідження МО.

Найближчий до УФ діапазон спектральної чутливості має перетворювач випромінювання-сигнал типу ФЭУ-116 (діапазон спектральної характеристики 200 – 365 нм при максимальній спектральній чутливості у межах 260 – 300 нм) [2]. Серед інших перетворювачів необхідно виокремити ФЕП типу ФЭУ-99 (діапазон спектральної характеристики 150 – 320 нм при максимальній чутливості в межах 220 – 260 нм), ФЭУ-133 (діапазон спектральної характеристики 145 – 365 нм при максимальній чутливості в межах 220 – 260 нм).

Доцільно вибирати фотоперетворювачі за трьома зонами видимого спектра з точки зору можливого синтезу кольорового зображення на моніторі – попереднім спектральним аналізом світла, що проходить крізь МО або відбитого від нього. Крім того, в люмінесцентних дослідженнях при використанні “маркерів”, які мають різні кольори свічення і різну спорідненість до певних типів білків, доцільно разом з використанням вузькосмугового оптичного фільтра використовувати і відповідний ФЕП для впевненої індикації незначної люмінесценції “маркера”.

Необхідно також зазначити, що в сканувальному оптичному УФ мікроскопі потрібно передбачити оперативність заміни ФЕП з врахуванням його електричного режиму роботи залежно від поставлених дослідницьких завдань. Така процедура вимагає ускладнення конструкції певних вузлів мікроскопа.

3.3. Аналіз можливості роботи телевізійного сканувального мікроскопа в реальному масштабі часу

Для забезпечення роботи ТСМ у реальному масштабі часу він повинен забезпечувати формування сканувального растра в площині досліджуваного МО у телевізійному або малокадровому режимі роботи і формування зображення на екрані відео-контрольного пристрою, яким може бути телевізійний монітор або монітор персонального комп'ютера. При скануванні МО у телевізійному режимі електричний сигнал, який відповідає його зображенню, може вводиться в персональний комп'ютер за допомогою телевізійного відеобластера. Така реалізація є простою з точки зору технічного виконання, однак має ряд недоліків:

- при повноформатному формуванні сканувального растра на екрані сканувальної ЕПТ не повністю використовується роздільна здатність застосовуваної сканувальної ЕПТ, яка є значно вищою від роздільної здатності використовуваного стандартного телевізійного монітора (роздільна здатність сканувальної ЕПТ не менше 2000 елементів по кожній координаті: діаметр сканувальної плями не перевищує 10 мкм при розмірі сканувального растра на екрані сканувальної трубки 22×22 мм);

- при формуванні мінірастра на екрані сканувальної ЕПТ на екрані телевізійного монітора формується зображення лише фрагмента досліджуваного МО, якщо він має великі розміри. Орім того, формування мінірастра з наступним його зміщенням у будь-яку точку екрана ЕПТ вимагає складних схемотехнічних рішень. При цьому необхідно зазначити, що є велика перевага при формуванні мінірастра, яка полягає в тому, що на екрані телевізійного монітора можна спостерігати зображення досліджуваного МО малих розмірів у збільшеному масштабі без погіршення роздільної здатності зображення;

- при введенні телевізійного зображення досліджуваного МО у персональний комп'ютер погіршується зображення внаслідок того, що

стандартні відеобластери мають обмежену смугу пропускання тракту відеосигналу, що погіршує передачу дрібних деталей зображення досліджуваного МО. Відомі відеобластери спеціального призначення, які мають значно кращі характеристики з роздільної здатності передавального сигналу, однак їх вартість здебільшого перевищує на порядок вартість самого персонального комп'ютера;

– проведений аналіз відповідно до (3.11) показує, що при скануванні досліджуваного МО у телевізійному стандарті складно забезпечити необхідне відношення сигнал-шум через недостатню максимальну яскравість свічення використовуваної сканувальної ЕПТ та широкої смуги пропускання сигнального тракту.

Переваги використання малокадрового режиму роботи СТМ такі [7]:

– можливість використання значно меншої швидкості сканування МО, що дозволить підвищити якість формованого зображення;

– можливість формування сканувального растра внаслідок використання цифрового способу формування сигналів розгортки з кроком, який відповідає реальній роздільній здатності використовуваної сканувальної ЕПТ, наприклад, 2048×2048 елементів розкладу зображення досліджуваного МО;

– можливість використання персонального комп'ютера для формування сканувального растра зменшених розмірів з високою роздільною здатністю:

– можливість введення зображення в персональний комп'ютер через USB – порт, що значно спростить задачу введення великих масивів інформації в реальному масштабі часу.

Недоліком використання малокадрового режиму роботи є неможливість при малій швидкості сканування виводити зображення на екран стандартного телевізійного монітора. Такий варіант можливий лише з використанням двопортової пам'яті, в яку інформація записується повільно зі швидкістю сканування, а зчитується швидко згідно параметрів телевізійного стандарту [8].

3.4. Метод масштабування зображення досліджуваного об'єкта при збереженні роздільної здатності формованого зображення

Роздільна здатність використовуваних в ТСМ ЕПТ (більше 4000 елементів розкладу зображення по кожній координаті з використанням ЕПТ типу У4ТПІИ) значно перевищує роздільну здатність формованих зображень ДО як на екрані телевізійного монітора (не більше 780×575 елементів розкладу зображення [10]), так і на екрані монітора ПК – 1280×1024 елементів розкладу зображення [10]). Висока роздільна здатність ЕПТ дозволяє збільшувати зображення ДО або його фрагмента без погіршення роздільної здатності формованого зображення, яка є характерною для цифрового збільшення. Збільшення зображення здійснюється в ТСМ зменшенням розмірів растра, а вибір збільшеного фрагмента зображення – зміщенням зменшеного сканувального растра [11, 102].

Така процедура вимагає формування струмів у котушках відхилення пилкоподібної форми змінних розмірів у дуже широких межах (збільшення розмірів ДО на екрані телевізійного монітора майже без втрати роздільної здатності можливе майже в 10 разів) та змінювати постійну складову пилкоподібного струму для переміщення зменшеного растра в будь-яку точку екрана ЕПТ, що унеможлиблює використання для формування растра економних основних способів формування пилкоподібних струмів у рядкових та кадрових котушках відхилення [104].

Тому формування растра в ТСМ здійснюється генераторами сигналів відхилення та перетворенням цих сигналів у струм за допомогою прецизійних ПНС, +виконаних за схемою підсилювача постійного струму з глибоким зворотним зв'язком за струмом, для забезпечення високої точності та стабільності формування сканувального растра на екрані ЕПТ. Генераторами сигналів відхилення в телевізійному режимі є генератори пилкоподібних напруг [6] з малими нелінійними спотвореннями (коефіцієнт нелінійності не може перевищувати 0,2%) для усунення надалі похибки визначення координат

ДО. При цифровому способі пилкоподібні напруги формуються дванадцятирозрядними ЦАП [18].

Точність визначення координат ДО визначається точністю і стабільністю параметрів растра на екрані ЕПТ. Якщо зображення складається з 4096×4096 елементів розкладу, то точність та стабільність формування сканувального растра повинні бути не гіршими $1,2 \cdot 10^{-4}$. Це вимагає використання прецизійного ПНС, здатного з відповідною точністю перетворювати вхідну напругу в струм котушок відхилення і підтримувати його із заданою стабільністю [10, 11].

Враховуючи різку зміну температурних режимів окремих вузлів ПНС, пов'язаних з великим діапазоном змін струму в навантаженні, забезпечення стабільності струму є одним з найбільш складних завдань у сканувальній частині ТСМ. При рівнозначній нестабільності задаючих генераторів та ПНС відносна нестабільність величини струму при, наприклад, 2^{12} елементів дискретизації зображення в одному рядку, не повинна перевищувати $6 \cdot 10^{-5}$ [13].

Ці вимоги стосуються тільки короткочасної нестабільності позиціонування елемента сканування на екрані ЕПТ, тобто зміни параметрів ТСМ за час, необхідний для введення одного кадру зображення ДО в ПК, у якому потрібна ідентифікація координат елементів зображення. Якщо все зображення розбите, наприклад, на $2^{12} \times 2^{12}$ елементів, то при вводі одного елемента з $t_a = 1$ мкс, для вводу всього зображення необхідно приблизно 16 с. Це означає, що час короткочасної нестабільності буде не меншим, ніж 16 с.

Довгочасна нестабільність – це зміна параметрів ТСМ за час хоча б однієї зміни. Так, наприклад, допустиме велике зміщення растра на екрані ЕПТ, якщо за характером розв'язуваних завдань не потрібно зіставляти окремі елементи декількох зображень. Якщо ж потрібна повторюваність вимірювань, то вимога до стабільності така, щоб растр зміщувався не більше, ніж на половину елемента зображення по кожній координаті.

Для одержання максимальних функціональних можливостей ТСМ при дослідженні МО блок формування сканувального растра (БФСР) повинен забезпечувати:

- формування сигналів розгортки растра в телевізійному стандарті;
- формування сигналів розгортки растра в покроковому режимі;
- зміну розмірів растра в телевізійному та покроковому режимах для масштабування зображення досліджуваного МО зміною амплітуди сигналу розгортки при подачі його на ПНС, який забезпечує прецизійне перетворення сигналу розгортки в струм котушок відхилення [5, 6, 18];
- незалежне зміщення растра зменшених розмірів по будь-якій координаті у довільну точку екрана ЕПТ;
- зміну розмірів растра в дискретному режимі для масштабування зображення досліджуваного МО зміною кількості елементів розкладу зображення в растрі при збереженні його роздільної здатності;
- зміну частоти формування растра в дискретному режимі через зміну тривалості формування одного елемента розкладу зображення;
- зміну частоти формування растра в дискретному режимі зміною кількості елементів розкладу зображення в сканувальному растрі;
- зміщення растра зменшених розмірів зміною координат початку і кінця растра при дискретному його формуванні;
- зміну розмірів растра при дискретному його формуванні зміною амплітуди сигналу розгортки.

Розроблену структурну схему цифро-аналогового методу формування сканувального растра високої роздільної здатності з широкими функціональними можливостями, який забезпечує необхідні режими роботи ТСМ, наведено на рис. 3.2.

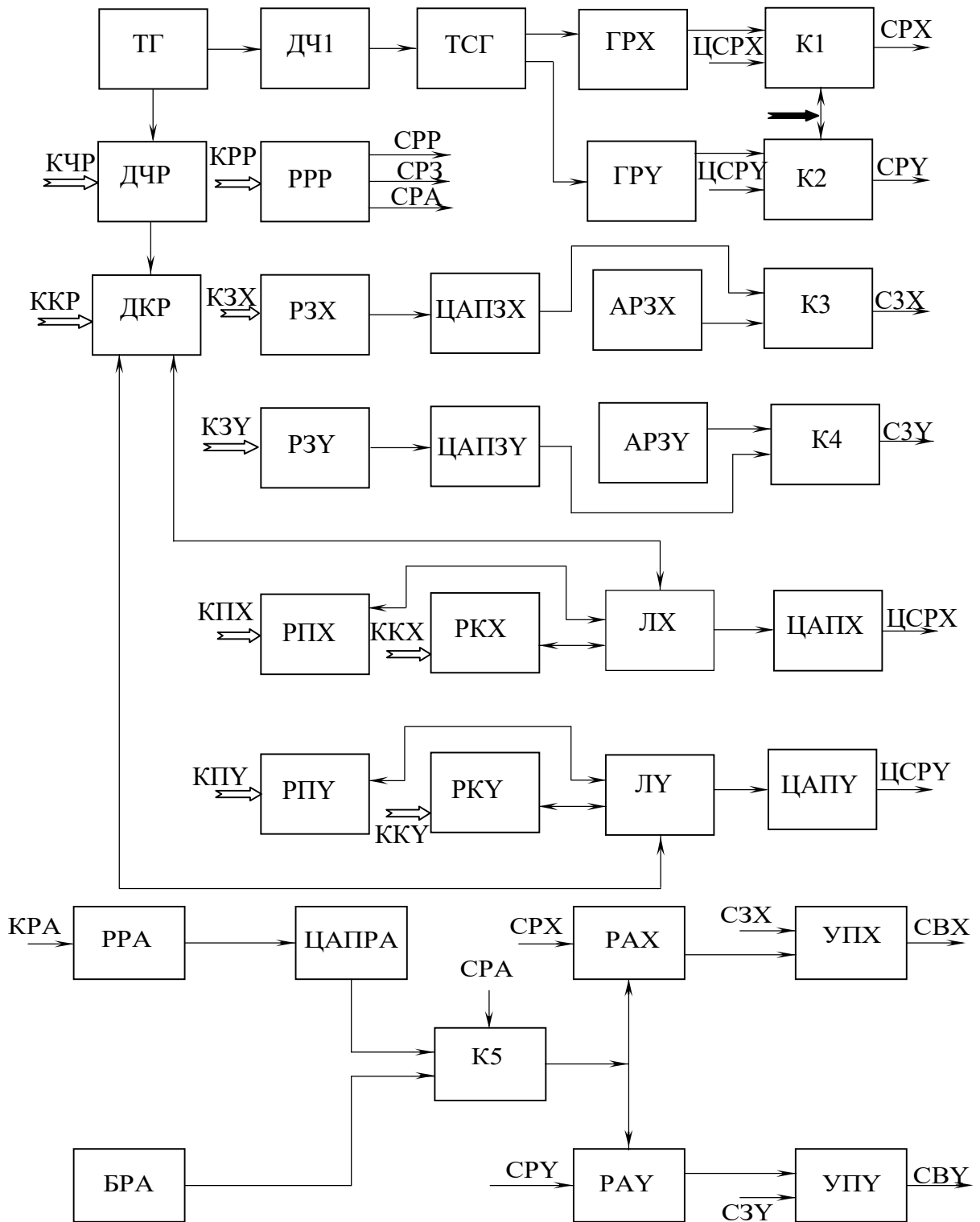


Рисунок 3.2 – Структурна схема методу формування скнувального растра з широкими функціональними можливостями

До її складу входять: тактовий генератор ТГ, дільник частоти ДЧ1, телевізійний синхрогенератор ТСГ, генератори формування сигналу розгортки в телевізійному режимі по координатах X та Y ГРХ та ГРУ, п'ять комутаторів

К1, К2, К3, К4, К5, дешифратор частоти розгортки ДЧР, дешифратор крок+у розгортки ДКР, регістри коду сигналу зміщення по координатах Х та Y РЗХ та РЗУ, цифро-аналогові перетворювачі сигналу зміщення по координатах Х та Y ЦАПЗХ та ЦАПЗУ, аналогові регулятори зміщення по координатах Х та Y АРЗХ та АРЗУ, регістри коду початку розгортки по координатах Х та Y РПХ та РПУ, регістри коду кінця розгортки по координатах Х та Y РКХ та РКУ, лічильники кодів місцеположень світної плями по координатах Х та Y ЛХ та ЛУ, цифро-аналогові перетворювачі формування дискретного сигналу розгортки по координатах Х та Y ЦАПХ та ЦАПУ, регістр коду регулювання амплітуди сигналу відхилення РРА, цифро-аналоговий перетворювач сигналу регулювання амплітуди сигналу розгортки ЦАПРА, блок аналогово+о регулювання амплітуди БРА, регулятори амплітуди сигналу відхилення по координатах Х та Y РАХ та РАУ, узгоджувальні підсилювачі по координатах Х та Y УПХ та УПУ.

Вхідними сигналами блока формування сканувального растра БФСР є:

- код режиму роботи мікроскопа КРР;
- код частоти розгортки растра КЧР;
- код кроку розгортки растра ККР; ++
- коди зміщення растра по координатах Х та Y КЗХ та КЗУ;
- коди початку розгортки по координатах Х та Y КПХ та КПУ;
- коди кінця розгортки по координатах Х та Y ККХ та ККУ.

Вихідні сигнали блока формування сканувального растра БФСР:

- сигнал відхилення по координаті Х СВХ;
- сигнал відхилення по координаті Y СВУ.

Внутрішні сигнали блока формування сканувального растра БФСР:

- сигнал режиму роботи СРР;
- сигнал регулювання зміщення растр+a СРЗ;
- сигнал регулювання амплітуди розгортки СРА;
- цифрові сигнали розгорток по координатах Х та Y ЦСРХ та ЦСРУ.

Формування сигналів растра в телевізійному стандарті здійснюється так: сигнал тактового генератора ТГ, частота якого стабілізована кварцом, через дільник частоти розгортки ДЧ1 подається на телевізійний синхрогенератор ТСГ, який формує на своїх виходах рядкові та кадрові імпульси синхронізації, рядкові та кадрові імпульси гасіння світної плями під час зворотного ходу розгорток, а також їх суміші.

Рядкові імпульси гасіння використовують також для формування пилкоподібного сигналу відхилення по координаті Х генератором рядкової розгортки ГРХ з часовими параметрами, які відповідають телевізійному стандарту, та амплітудою, що забезпечує максимальне відхилення світної плями по рядку. Сигнал з виходу генератора рядкової розгортки ГРХ подається на перший вхід першого комутатора К1. На другий вхід комутатора К1 надходить цифровий сигнал рядкової розгортки ЦСРХ. Відповідно до сигналу режиму роботи СРР на виході комутатора К1 формується відповідний сигнал рядкової розгортки растра СРХ. Сигнал кадрової розгортки СРУ формується аналогічно.

Код зміщення центра растра по координаті Х КЗХ записується в реєстр коду зміщення РЗХ, який надалі за допомогою ЦАП сигналу зміщення по координаті Х ЦАПЗХ перетворюється в аналоговий сигнал зміщення по координаті Х і надходить на перший вхід третього комутатора К3. Аналоговий регулятор зміщення по координаті Х АРЗХ формує на своєму виході керівний потенціал відповідно до положенням регулювального елемента на передній панелі мікроскопа. Цей потенціал надходить на другий вхід третього комутатора К3. Код зміщення центра растра по координаті Y КЗУ записується в реєстр коду зміщення РЗУ, який потім за допомогою ЦАП сигналу зміщення по координаті Y ЦАПЗУ перетворюється в аналоговий сигнал зміщення по координаті Y і надходить на перший вхід четвертого комутатора К4. Аналоговий регулятор зміщення по координаті Y АРЗУ формує на своєму виході керівний потенціал відповідно до положення регулювального елемента на передній панелі мікроскопа. Цей потенціал надходить на другий вхід

четвертого комутатора К4. Відповідно до сигналу регулювання зміщення на виході комутаторів К3 та К4 з'являються сигнали зміщення растра СЗХ та СЗУ згідно із вибраним режимом роботи мікроскопа зі зменшеним розміром растра на екрані ЕПТ.

Сигнал розгортки по координаті Х СРХ надходить на регулятор амплітуди по координаті Х РАХ, де змінюється його амплітуда відповідно до сигналу, який подається з п'ятого комутатора К5. На перший вхід п'ятого комутатора К5 надходить сигнал від блока ручного регулювання амплітуди сигналу відхилення БРА, а на другий вхід п'ятого комутатора К5 надходить сигнал з виходу ЦАП сигналу регулювання амплітуди ЦАПРА, вхідний код якого записується в регістр регулювання за командою з ПК. Вихідний сигнал п'ятого комутатора К5 одночасно надходить як на регулятор амплітуди по координаті Х РАХ, так і на регулятор амплітуди по координаті Y PAУ. Таке регулювання забезпечує плавну зміну масштабу формованого зображення досліджуваного МО одночасно по обох координатах, що усуває масштабні спотворення при зміні масштабу зображення.

Формування сигналу розгортки при дискретному способі здійснюється так: сигнал з тактового генератора надходить на дешифратор частоти розгортки ДЧР. Дешифратор змінює частоту сигналу тактового генератора і, відповідно, частоту розгортки згідно з кодом частоти розгортки КЧР, який надходить з ПК. Зміна частоти розгортки здійснюється за двійковим законом. Сигнал з виходу дешифратора частоти розгортки ДЧР надходить на вхід дешифратора кроку розгортки ДКР, який працює відповідно з кодом кроку розгортки ККР, що надходить з ПК. Зміна кроку розгортки здійснюється за двійковим законом шляхом зміни відповідного розряду лічильника. Мінімальний крок розгортки відповідає подачі сигналу тактового генератора на наймолодший розряд лічильника по будь-якій координаті. Зміна порядкового номера розряду лічильника одночасно здійснюється по обох координатах. При досягненні лічильником по координаті Х максимального значення коду розгортки сигнал з його виходу через дешифратор кроку розгортки ДКР подається на відповідний

розряд лічильника по координаті Y. Вихідні коди лічильників по координатах X та Y – LX та LY перетворюються за допомогою цифро-аналогових перетворювачів ЦАПХ та ЦАПУ у дискретні сигнали розгортки по координатах X та Y – ЦСРХ та ЦСРУ.

Формування неповноформатного растра при цифровому способі формування здійснюється так. Код початку розгортки по координаті X КПХ записується в реєстр початку розгортки по координаті X РПХ. Код кінця розгортки по координаті X ККХ записується в реєстр кінця розгортки по координаті X РКХ. Код початку розгортки по координаті Y КПУ записується в реєстр початку розгортки по координаті Y РПУ. Код кінця розгортки по координаті Y ККУ записується в реєстр кінця розгортки по координаті Y РКУ. Вихідний код реєстра РПХ є кодом початку рахунку лічильника LX, вихідний код реєстра РКХ є кодом кінця рахунку лічильника LX, вихідний код реєстра РПУ є кодом початку рахунку лічильника LY, вихідний код реєстра РКУ є кодом кінця рахунку лічильника LY. Таким чином реєстри РПХ, РКХ, РПУ та РКУ задають розміри зменшеного растра при дискретному способі його формування.

Приклад ТСМ зі зміною масштабу зображення наведено на рис. 3.3 [63]. До складу ТСМ входять: проєкційна електронно-променева трубка ПЕПТ, об'єктив О, досліджуваний об'єкт ДО, фотоелектронний помножувач ФЕП, перший відеопідсилювач ВП1, індикаторна електронно-променева трубка ІЕПТ, синхрогенератор СГ, генератор рядкової розгортки ГРР, генератор кадрової розгортки ГКР, котушки відхилення по координаті X КВІХ індикаторної електронно-променевої трубки ІЕПТ, котушки відхилення по координаті Y КВІУ індикаторної електронно-променевої трубки ІЕПТ, формувач сигналу розгортки по координаті X ФСРХ, формувач сигналу розгортки по координаті Y ФСРУ, блок керування розміром по координаті X БКРХ, блок керування розміром по координаті Y БКРУ, блок керування зміщенням по координаті X БКЗХ, блок керування зміщенням по координаті Y БКЗУ, перетворювач напруга-струм по координаті X ПНСХ, перетворювач напруга-струм по координаті Y ПНСУ, котушки відхилення по координаті X

КВПХ проекційної електронно-променевої трубки ПЕПТ, котушки відхилення по координаті Y КВПУ проекційної електронно-променевої трубки ПЕПТ, другий відеопідсилювач ВП2.

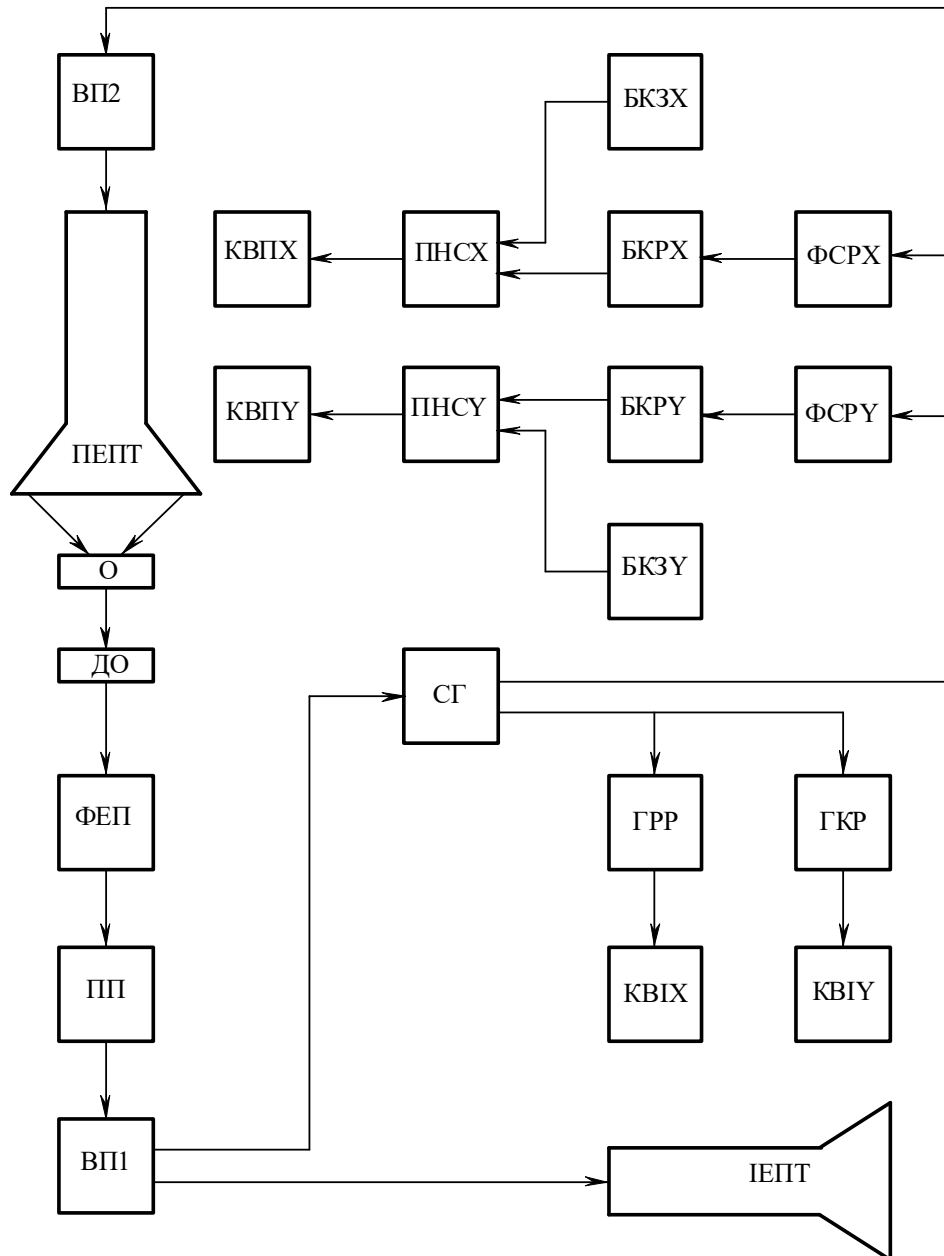


Рисунок 3.3 – Структурна схема ТСМ зі зміною масштабу зображення

Синхрогенератором СГ формуються: 1) по першому виходу суміш рядкових та кадрових імпульсів гасіння; 2) по другому виходу – суміш імпульсів гасіння та кадрових імпульсів синхронізації.

ФСРХ виділяє рядкові імпульси гасіння і на своєму виході формує лінійно наростаючий сигнал високого ступеня лінійності та лінійно спадаючий

сигнал, тривалість якого дорівнює тривалості рядкового імпульсу гасіння. Сигнал з виходу ФСРХ через БКРХ, який підтримує на своєму виході амплітуду сигналу, необхідну для забезпечення вибраного розміру розгортки по координаті X, подається на перший вхід ПНСХ. Другий вхід ПНСХ підімкнений до БКЗХ, на виході якого формується постійна напруга, яка відповідає величині зміщення по координаті X відносно центру ПЕПТ. Струм в КВПХ відповідає сумі сигналу зміщення та сигналу розгортки. ФСРУ формує сигнали аналогічно до ФСРХ.

Світний сигнал з екрана ПЕПТ через об'єktiv О проектується на ДО. Сигнал від ДО подається на фотокатод ФЕП, на виході якого формується електричний сигнал, пропорційний яскравості елемента ДО. Цей сигнал підсилюється до нормованої величини порогового пристрою ПП і подається на вхід ВП1, формуючи повний відеосигнал, який підсилюється і подається на керуючий електрод ІЕПТ.

Якщо на екрані ПЕПТ формується світний растр максимального розміру без зміщення, то на екрані ІЕПТ відтворюється зображення ДО мінімального масштабу збільшення. При зменшенні розміру світного растра на екрані ПЕПТ масштаб відображення фрагмента ДО на екрані ІЕПТ відповідно збільшується. Зменшення світного растра на екрані ПЕПТ, наприклад, в 10 разів приводить до збільшення масштабу відтворюваного зображення ДО на екрані ІЕПТ в 10 разів. Зміщення зменшеного світного растра на екрані ПЕПТ по координаті X та Y дозволяє відтворити на екрані ІЕПТ в збільшеному масштабі будь-який фрагмент ДО. Якщо ПЕПТ має роздільну здатність, яка на порядок перевищує роздільну здатність ІЕПТ, то збільшений фрагмент зображення відтворюватиметься без погіршення якості формованого зображення.

3.5. Розроблення та дослідження методів покращення якості зображення за рахунок підвищення відношення сигнал/шум

Використання малокадрового режиму. Збільшення контрастності зображення внаслідок збільшення коефіцієнта підсилення підсилювача сигналу

ФЕП обмежується допустимим відношенням сигнал/шум $U_C/U_{Ш}$. Відношення сигнал/шум ψ_C на виході підсилювача визначається формулою [23]:

$$\psi_C = \left(\frac{U_C}{U_{Ш}}\right)^2 = \frac{I_C^2}{2I_C \cdot e \cdot \Delta f + \frac{4k \cdot T \cdot \Delta f}{R} + 4k \cdot T \cdot R_{Ш} \cdot \Delta f \cdot \left[\frac{1}{R^2} + \frac{1}{3}(2\pi \cdot \Delta f \cdot C_{ВХ})^2\right]}, \quad (3.17)$$

де R – опір резистора навантаження ФЕП;

$C_{ВХ}$ – сумарна ємність навантаження ФЕП;

I_C – струм сигналу ФЕП;

e – заряд електрона;

k – стала Больцмана;

Δf – смуга частот;

$R_{Ш}$ – опір шумів першого каскаду підсилювача.

Очевидно, чим більша смуга частот Δf , тим меншим стає відношення $U_C/U_{Ш}$. Суттєво збільшити це відношення можна через зменшення швидкості рядкової та кадрової розгортки і відповідного зменшення смуги частот (якщо частота кадрової розгортки, наприклад, 1 Гц, то смуга частот – 130 кГц). При малокадровому режимі вихідний сигнал легко оцифрувати, заносити в пам'ять і зчитувати надалі в телевізійному стандарті. Подання відеоінформації в цифровій формі дозволяє використати цифрові методи фільтрації, придушення шумового фону та накопичення, що значно покращує якість зображення статичного ДО та його автоматичну обробку.

Метод модуляції яскравості світлового потоку. В ТСМ типу біжучого променя при малокадровій розгортці суттєвого збільшення відношення $U_C/U_{Ш}$ можна досягти при використанні модуляції електронного променя ЕПТ з частотою $F_H > 2F_B$, де F_B – верхня гранична частота корисного сигналу. Цей метод дозволяє компенсувати основну складову низькочастотного шуму, яка пропорційна до $1/F_C$.

Якщо світловий потік Φ змінювати в часі за косинусоїдним законом з частотою, рівною допоміжній несівній частоті F_H , то

$$\Phi = (\Phi_0 / 2)(1 + \cos F_H t), \quad (3.18)$$

і передавати постійну складову ρ'_0 та деякий компонент коефіцієнта відбиття k , m то

$$\rho' = \rho'_0 + \rho'_{KM} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} \cdot V_X \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda_m} \cdot V_Y \cdot t + \Theta_{KM}\right), \quad (3.19)$$

де ρ' – коефіцієнт відбиття світлового потоку;

ρ'_0 – постійна складова коефіцієнта відбиття світлового потоку;

ρ'_{KM} – амплітуда змінного коефіцієнта пропускання;

V_X – швидкість руху сканувального елемента по координаті X;

V_Y – швидкість руху сканувального елемента по координаті Y;

λ_k, λ_m – довжина просторової хвилі компонентів k та m ;

Θ_{KM} – початковий кут.

При переміщенні світної плями, світловий потік якої змінюється в часі вздовж лінії розгортки, світловий потік на виході ФЕП Φ_P дорівнюватиме:

$$\Phi_P = \Phi(\rho'_{CEP}) = 0,5 \cdot \Phi_0 (1 + \cos F_H \cdot t) \cdot x \left[\rho_0 + \lambda_{KM} \cdot \rho_{KM} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} \cdot V_X \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda_m} \cdot V_Y \cdot t + \Theta_{KM}\right) \right], \quad (3.20)$$

де Φ_0 – середнє значення світлового потоку;

λ_{KM} – коефіцієнт відбиття.

При цьому електричний сигнал на виході ФЕП становитиме:

$$U_C = [U_0 + U_{KM} \cdot \mathbf{v}_{KM} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} \cdot V_X \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda_m} \cdot V_Y \cdot t + \Theta_{KM}\right)] \cdot (1 + \cos F_H \cdot t). \quad (3.21)$$

Після розкриття дужок та перетворень отримаємо:

$$U_C = U_0 + U_{KM} \cdot \mathbf{v}_{KM} \cdot \cos(F_{KM} \cdot t + \Theta_{KM}) + U_0 \cdot \cos F_H \cdot t + 0,5 \cdot U_{KM} \cdot \mathbf{v}_{KM} \cdot \cos[(F_H - F_{KM}) \cdot t - \Theta_{KM}] + 0,5 \cdot U_{KM} \cdot \mathbf{v}_{KM} \cdot \cos[(F_H + F_{KM}) \cdot t + \Theta_{KM}], \quad (3.22)$$

де:

$$F_{KM} = \frac{2\pi}{\lambda_k} \cdot V_X + \frac{2\pi}{\lambda_m} \cdot V_Y. \quad (3.23)$$

З цього виразу випливає, що при електрооптичному аналізі компонент яскравості на фоні постійної складової ρ'_0 елементом розгортки, світловий

потік якого модулюється з частотою F_H сигнал, що формується на виході ФЕП, окрім несівної частоти та двох бокових частот, має також складові модулюючої частоти сигналу. Використання надалі вузькосмугового підсилювача дозволяє позбавитися від зайвих сигналів, а заодно – і від низькочастотних шумів.

Відомий растровий оптичний мікроскоп, у якому застосовано модуляцію світлового променя з частотою 100 кГц при спектрі сигналу в кадровому режимі 0 – 10 кГц. Після вузькосмугового підсилювача встановлено діодний модулятор та низькочастотний підсилювач з малим рівнем шумів. Вихідний сигнал подавався на модулятор ЕПТ пристрою відображення інформації. Така схема дозволила більше, ніж на два порядки підвищити відношення $U_C/U_{\text{ш}}$ порівняно із звичайною системою в малокадровому режимі.

Метод усереднення дробового шуму ФЕП. Ефективним методом покращення відношення сигнал/шум може стати використання усереднення дробового шуму внаслідок сумування сигналів від багатьох ФЕП, кожен з яких перетворює в сигнал свою частку світлового потоку, який несе інформацію про об'єкт [39, 40]. Інтегральний світловий потік розподіляється прозорими ахроматичними дзеркалами різної щільності на окремі ФЕП, опори навантаження яких з'єднані послідовно. Величини окремих світлових потоків та опори навантаження вибираються такими, щоб значення шумової складової кожного з ФЕП були однаковими. Оскільки кожен з ФЕП в один і той же момент часу дає випадковий розподіл амплітуд і фаз шумових викидів та один і той же корисний сигнал, то сумарне відношення сигнал/шум зростає. Недоліком такого з'єднання навантажень є різні постійні часу, оскільки складовими частинами навантаження наступних ФЕП є навантаження попередніх і, таким чином, останній ФЕП має найбільший опір навантаження. Цього недоліку позбавлена схема паралельного з'єднання навантажень, проте вона вимагає використання широкосмугового суматора великої кількості сигналів.

Розглянемо можливість використання ФЕП в ТСМ з очки зору забезпечення його максимальної чутливості та умови необхідного відношення

сигнал/шум на виході ФЕП без урахування шумів використовуваної ЕПТ та шумів наступного підсилювача сигналу ФЕП.

У ФЕП електрони, звільнені під дією світла, скеровуються на диоди. Диоди мають властивість при електронному бомбардуванні емітувати значно більше електронів, ніж отримувати. Відношення середнього числа вторинних електронів, які емітуються мішенню, до числа первинних електронів, сприйнятих нею, позначається δ . Вторинні електрони, які емітуються першим диодом, можна направити на другий диод, який діє так само, як і перший. Цей процес може повторюватися багаторазово. Якщо ФЕП має n диодів, коефіцієнт множення кожного з яких рівний δ , то загальне підсилення, або коефіцієнт множення ФЕП буде $M = \delta^n$.

Розглянемо переваги ФЕП над фотоелементом, який перетворює світловий сигнал в електричний, з підсилювачем. Хай фотокатод, який має фотоемісійні властивості, опромінюється потоком випромінювання Φ_0 , який викликає струм насичення I_0 . Цей струм, часто незначний ($\sim 10^{-7}$ А), тому він повинен бути підсилений. Струм I_0 перетворюється в спад напруги $I_0 \cdot R$ на опорі R . Чим більший R , тим вигідніше це перетворення. Однак, коли R стає надзвичайно велике, виникають труднощі: реакція підсилювача буде повільною (внаслідок входної ємності підсилювача) і, окрім того, зворотний струм першого активного елемента підсилювача буде заважати його роботі.

Необхідно зазначити, що струм I_0 не є строго постійним за величиною. Оскільки електричний струм – це потік скінченого числа окремих зарядів, його величина буде флуктувати. Ці флуктуації називаються дробовим ефектом і вперше були розглянуті Шоткі. Вони також підсилюються і тому обмежують найменшу виявлену величину світлового потоку. Є і інше, дуже важливе джерело завад – опір R , який веде себе як генератор е.р.с. абсолютно випадкового характеру, тобто він генерує напругу, в якій компоненти всіх частот рівноімовірні і мають рівні амплітуди. Якщо прийняти ширину смуги частот за Δf , то середньоквадратичні флуктуації напруги або тепловий шум, визначається за формулою [40]:

$$\langle u^2 \rangle = 4k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f, \quad (3.24)$$

де k – стала Больцмана, ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт сек/грд.);

T – абсолютна температура;

R – опір навантаження.

Середньоквадратичні флуктуації струму (дробовий ефект) складають:

$$\langle i^2 \rangle = 2e \cdot I_0 \cdot \Delta f, \quad (3.25)$$

де $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ кулона – заряд електрона.

Порівняємо величини цих двох завад.

Струм i створює спад напруги u на зовнішньому опорі навантаження R .

Якщо позначити через γ відношення дробового ефекту до теплових шумів, тоді

$$\gamma = \frac{\langle i^2 \rangle R^2}{\langle u^2 \rangle} = \frac{I_0 \cdot R}{2 \left(\frac{k \cdot T}{e} \right)}; \quad (3.26)$$

при кімнатній температурі:

$$\gamma = \frac{I_0 \cdot R}{5 \cdot 10^{-2}}. \quad (3.27)$$

Це означає, що дробовий ефект рівний тепловим шумам, якщо струм, створений ФЕП, викликає падіння напруги 0,05 В на опорі навантаження ФЕП. Отже, найменший світловий потік, який можна виміряти, обмежується тепловими шумами на зовнішньому опорі. Саме з цієї причини і були розроблені ФЕП, оскільки вони підсилюють струм без використання опорів.

Якщо I_0 – струм з фотокатода, n – число ступенів множення і δ – коефіцієнт помноження, тоді вихідний струм ФЕП буде:

$$I = I_0 \cdot \delta^n. \quad (3.28)$$

Але цей струм містить також флуктуації. Розраховуємо найменшу величину світлового потоку, яку можна виміряти в ідеальному випадку, коли єдиним джерелом завад є дискретна природа електричного струму. Припустимо, що:

1) електронна емісія з кожного помножуючого каскаду підлягає закону

$$\text{Шоткі } \langle i^2 \rangle = 2e \cdot I_0 \cdot \Delta f \text{ і}$$

2) дробові шуми множаться наступними каскадами так, як і сигнал (всі частоти підсилюються однаково).

Якщо I_0 – струм з фотокатода, то його флуктуації відповідають формулі (3.25).

На виході першого помножуючого каскаду струм рівний $I_1 = \delta I_0$, а його флуктуації $\langle i_1^2 \rangle$ становитимуть:

$$\langle i_1^2 \rangle = 2e \cdot \delta \cdot I_0 \cdot \Delta f + \delta^2 \cdot (2e \cdot I_0 \cdot \Delta f) = 2e \cdot I_0 \cdot \Delta f \cdot (\delta + \delta^2). \quad (3.29)$$

На виході n-го помножуючого каскаду загальна величина флуктуацій дорівнюватиме:

$$\begin{aligned} \langle i_n^2 \rangle &= 2I_0 \cdot e \cdot \Delta f \cdot [\delta^n + \delta^{n+1} + \dots + \delta^{2n}] = 2I_0 \cdot e \cdot \Delta f \cdot \delta^n \cdot [1 + \delta + \dots + \delta^n] = \\ &= 2I_0 \cdot e \cdot \Delta f \cdot \delta^n \cdot \left(\frac{1 - \delta^{n+1}}{1 - \delta} \right). \end{aligned} \quad (3.30)$$

Якщо S – власне сигнал на виході першого каскаду помножувача, то на виході n-го каскаду помножувача сигнал буде $S \cdot \delta^n$. Флуктуації (середньоквадратичне значення) на виході будуть рівні $\langle i_0^2 \rangle = 2 \cdot e \cdot I_0 \cdot \Delta f$; при цьому середньоквадратичні шуми на виході n-го каскаду будуть:

$$\langle i_n^2 \rangle = 2 \cdot I_{0i_n^2} \cdot e \cdot \Delta f \cdot \delta^n \cdot \left(\frac{1 - \delta^{n+1}}{1 - \delta} \right), \quad (3.31)$$

звідки:

$$\frac{(\text{сигнал/шум})_{U_{\text{ВХІД}}}}{(\text{сигнал/шум})_{U_{\text{ВИХІД}}}} = \sqrt{\left[\frac{1 - \delta^{n+1}}{\delta^n \cdot (1 - \delta)} \right]} = A. \quad (3.32)$$

Цей вираз дозволяє розрахувати величину шумів, які вносяться помножувачем. Для різних значень δ та n розраховано значення коефіцієнта A , яке дало наступні результати:

$$\begin{array}{llll} \delta = 2, & n = 1, & A = \sqrt{1,5}; & \delta = 4, & n = 1, & A = \sqrt{1,25}; \\ \delta = 2, & n = 7, & A = \sqrt{2}; & \delta = 4, & n = 7, & A = \sqrt{1,3}. \end{array} \quad (3.33)$$

Відомо, що відношення сигнал/шум на вході помножувача більший, ніж на його виході. Тому помножувач ніколи не може покращити відношення сигнал/шум саме фотоструму. Чим більше δ і менше число каскадів помножувача, тим менше помножувач знижує відношення сигнал/шум. Однак, на практиці додатковими завадами, які вводяться цим методом підсилення, можна знехтувати при $\delta > 2$ незалежно від числа каскадів (все розглядається в ідеальному випадку).

Велика зацікавленість у використанні ФЕП як перетворювачів світло-сигнал, пов'язана з їх здатністю вимірювати надзвичайно малі фотоструми без внесення помітних шумів. Однак, якщо можливо зробити потік випромінювання достатньо інтенсивним для того, щоб фотострум, викликаний ним, можна було вимірювати без додаткового підсилення або якщо фотострум викликає на зовнішньому опорі спад напруги більший, ніж 0,05 В, помножувачі втрачають свої переваги.

З іншої сторони, при вимірюванні слабких світлових потоків велика величина помноження не зможе компенсувати низьку чутливість фотокатода. Розглянемо ідеальний електронний помножувач, який містить фотокатод з точно відомим квантовим виходом. Мінімальний світловий потік, який зможе виявити цей прилад, буде ϕ_m . Якщо використовується тільки фотокатод, то його вихідний сигнал вимірюється безпосередньо за допомогою класичного підсилювача, наприклад, виконаного з використанням польових або біполярних транзисторів. Мінімальний світловий потік, який можна виявити, буде ϕ_v . Підсилення помножувача порівняно з підсилювачем визначається формулою:

$$G = \phi_v / \phi_m . \quad (3.34)$$

Хай підсилення, завдяки вторинній емісії, достатнє для вимірювання струмів без подальшого підсилення, і флуктуаціями струму, пов'язаними з вторинною емісією, можна знехтувати порівняно з дробовим ефектом фотоелектронної емісії (це справедливо, якщо коефіцієнт множення першого динода > 2). За цих умов фотокатод дає струм I_a , середньоквадратичне значення шумів якого буде:

$$\langle i^2 \rangle = 2e \cdot I_a \cdot \Delta f. \quad (3.35)$$

Струм I_a створюється не тільки фотоелектронами, які спричинені світлом і формують корисний сигнал, але і термоелектронами, які емітуються фотокатодом, а також всіма фотоелектронами, викликаними світловим потоком фону (наприклад, невелике зовнішнє опромінювання). Коефіцієнт модуляції Γ визначається для струму фотокатода виразом:

$$\Gamma = \sqrt{2} \frac{I_m}{I_a}, \quad (3.36)$$

де I_m – фотострум, який містить корисну інформацію. Якщо прийняти, що струм можна виявити, коли відношення сигнал/шум рівне ρ (приблизно 2), тоді безпосередньо отримаємо:

$$I_m = \rho \cdot \sqrt{2e \cdot I_a \cdot \Delta f}. \quad (3.37)$$

Якщо за звичайним фотоелементом розташований підсилювач, додаються шуми вхідного опору R підсилювача. Тоді середньоквадратична напруга шумів, яка генерується цим опором (теплові шуми), буде:

$$\langle \Delta E \rangle^2 = 4k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f. \quad (3.38)$$

Якщо вимагати, щоб величина відношення сигнал/шум мала таке ж значення ρ , як і раніше, то отримаємо, що струм, емітований фотокатодом, повинен бути рівний:

$$I_v = \rho \sqrt{\frac{4k \cdot T \cdot \Delta f}{R}}, \quad (3.39)$$

де I_v – струм сигналу.

Якщо C – вхідна ємність підсилювача, то можна показати, що необхідна гранична частота становитиме:

$$\Delta f \approx \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}. \quad (3.40)$$

Звідси,

$$G = \frac{I_v}{I_m} = \frac{\Gamma}{e \cdot \rho} \sqrt{\pi \cdot k \cdot T \cdot C} = 7 \cdot 10^8 \frac{\Gamma}{\rho} \sqrt{C}, \quad (3.41)$$

де Γ – числовий коефіцієнт розрахований для кімнатної температури (300°K) і C , виражена у Фарадах. Приймаючи $C = 20$ пФ і $\rho = 2$ отримаємо:

$$G = 1600\Gamma. \quad (3.42)$$

Для сигналу зі 100-відсотковою модуляцією $\Gamma = 1$, що означає: за відсутності стороннього світла за допомогою дуже добре відлагоджених ФЕП можна виявити сигнал в 1600 раз слабший, ніж за допомогою вакуумного фотоелемента з використанням підсилювача. Але, якщо на сигнал накладається термоіонна емісія, яка має такий же ефект, як і потік розсіяного світла, то коефіцієнт Γ зменшується, і характеристики ФЕП швидко наближаються до характеристик звичайного фотоелемента.

Висновки до розділу 3.

1. Визначено вимоги до сканувальної електронно-променевої трубки, придатної до використання в ТСМ. Виведено аналітичний вираз, який дозволяє визначити мінімальну величину яскравості свічення елемента сканувальної ЕПТ, необхідну для забезпечення заданого відношення сигнал-шум на вході формувача сигналу. Виведено аналітичний вираз для визначення відношення сигнал/шум на виході ФЕП з урахуванням шумів використовуваної ЕПТ, фотоелектронного помножувача та його навантаження.

2. Показано, що сканувальний телевізійний мікроскоп на базі ЕПТ високої роздільної здатності з УФ-свіченням екрана дозволить проводити дослідження біологічних МО в реальному масштабі часу при дуже малій потужності опромінювання, що відкриває широкі перспективи його використання порівняно з лазерними мікроскопами, які мають значну потужність опромінювання МО, та електронними, які дозволяють проводити дослідження лише після попередньої обробки та у вакуумі, що унеможливорює

їх застосування при дослідженні живих МО. Найдоцільнішим для практичної реалізації слід вважати використання такого сканувального мікроскопа, який може одночасно забезпечити реалізацію двох режимів роботи: телевізійного та малокадрового з малим або змінним кроком сканування.

3. Розроблено структурну схему сканувального телевізійного мікроскопа, який забезпечує метод масштабування зображення досліджуваного об'єкта при збереженні роздільної здатності формованого зображення. Масштабування зображення здійснюється внаслідок зміни розмірів сканувального растра цифровим або аналоговим способом. При застосування сканувальної електронно-променевої трубки з роздільною здатністю формованого растра 4000×4000 елементів на екрані телевізійного монітора з роздільною здатністю 575 елементів можна отримати збільшення зображення фрагмента досліджуваного об'єкта у 7 разів, без погіршення якості зображення.

4. Запропоновано метод покращення відношення сигнал/шум внаслідок використання усереднення дробового шуму при сумуванні сигналів від багатьох ФЕП, кожен з яких перетворює в сигнал свою частку світлового потоку, який несе інформацію про об'єкт. Проведено порівняльний аналіз застосування фотоелектронного помножувача та вакуумного фотоелемента з використанням підсилювача. Показано, що для сигналу зі 100-відсотковою модуляцією за відсутності стороннього світла і за допомогою добре відлагоджених фотоелектронних помножувачів можна виявити сигнал в 1600 раз слабший, ніж за допомогою вакуумного фотоелемента з використанням підсилювача. Але, якщо на сигнал накладається термоіонна емісія, яка має такий же ефект, що і потік розсіяного світла, то виграш зменшується, і характеристики фотоелектронного помножувача швидко наближаються до характеристик звичайного фотоелемента.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СКАНУВАЛЬНОГО МІКРОСКОПА

4.1. Телевізійний сканувальний мікроскоп з дослідженням мікрооб'єкта в ультрафіолетовому діапазоні і відтворенням зображення у видимому спектрі

В ультрафіолетовому ТСМ без спеціального вдосконалення оптичного каналу (рис. 4.1, а) спостерігається втрата випромінювання. ЕПТ створює на своєму екрані Е інтенсивну світну пляму малого діаметра. Джерело ультрафіолетового випромінювання у вигляді інтенсивної світлової плями малого діаметра на екрані ЕПТ через об'єктив О та імерсійну рідину ІР опромінює точку на ДО, розташованому на предметному склі ПрС. Діаграма флуоресцентного випромінювання має вигляд сфери. Частина випромінювання, яка є в межах апертури конденсора К, спрямовується ним на ФЕП. При цьому, розташований між конденсором і ФЕП, інтерференційний фільтр Ф затримує спектр випромінювання джерела світла, пропускаючи спектр флуоресценції. В такій оптичній схемі втрати світла флуоресценції складаються з втрат світла, яке не пройшло в конденсор, втрат на відбиття та поглинання в конденсорі, фільтрі та торцевому входному вікні ФЕП. Найбільші втрати, у цьому випадку, спричинені недовикористанням флуоресцентного світлового потоку, який поширюється поза межами апертури конденсора. Зарядити цьому можна змінивши форму діаграми випромінювання збудженої точки ДО і усунувши конденсор з оптичної схеми та фільтр, як окремий елемент.

Реалізація такого оптичного каналу показана на рис. 4.1, б. В оптичний канал додатково введено покривне скло ПС з нанесеним інтерференційним покриттям Ф1, яке пропускає спектр випромінювання ЕПТ, але відбиває спектр флуоресценції. Крім того, предметне скло ПрС, на якому розташований ДО, має інтерференційне покриття Ф2, яке відбиває спектр випромінювання ЕПТ та

пропускає спектр флуоресценції, чим, зокрема, досягається і захист фотокатода ФЕП від збуджуючого випромінювання. Предметне скло ПрС розташоване на торцевому входному вікні ФЕП і має оптичний контакт, завдяки прошарку імерсійної рідини ІР. Функція фільтра Ф1 полягає в доступі до об'єкта збудження флуоресценції та відбиття спрямованого на нього потоку випромінювання флуоресценції в протилежному напрямку, тобто в напрямку ФЕП.

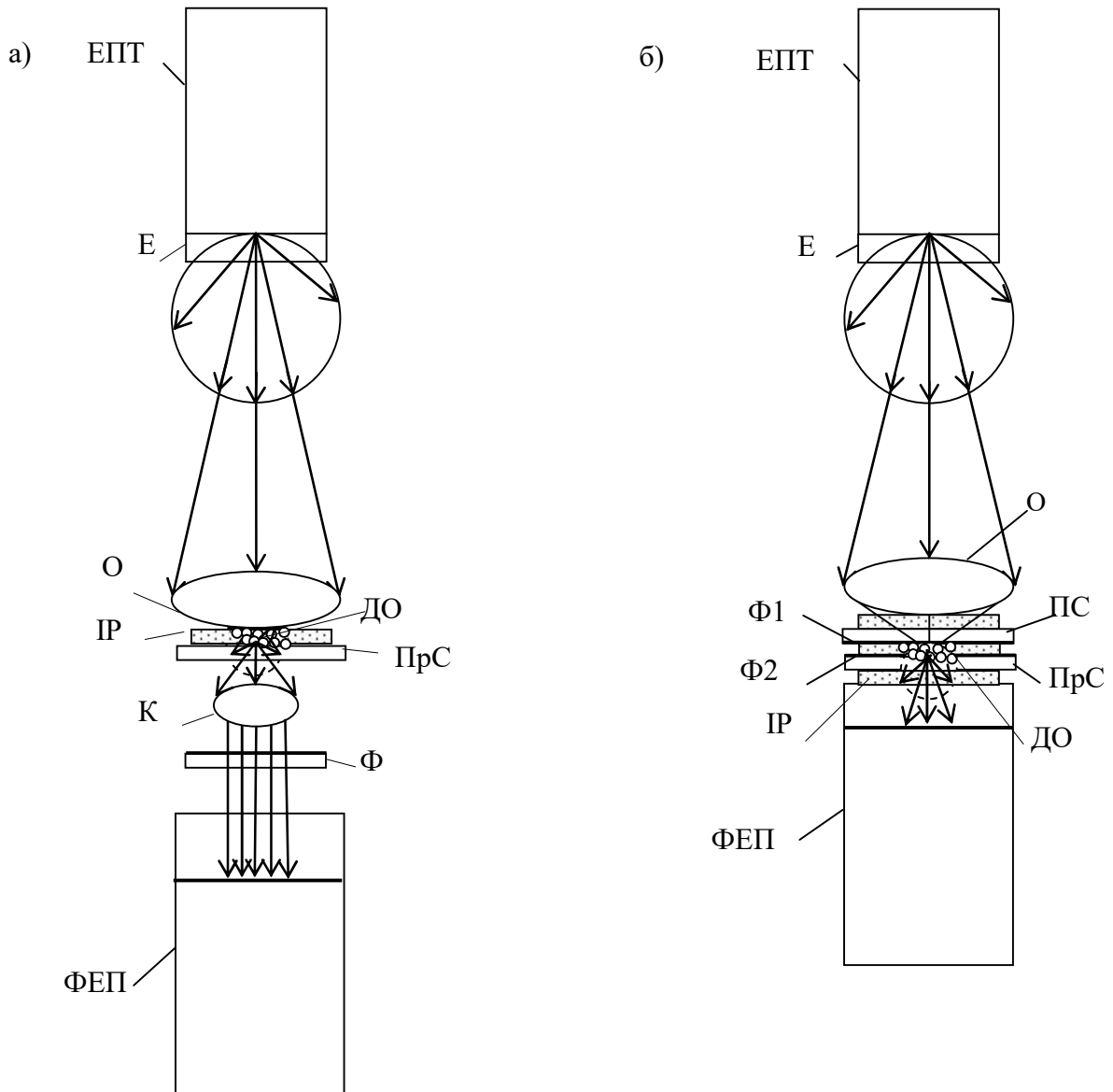


Рисунок 4.1 – Варіанти структурної схеми оптичного каналу люмінесцентного ТСМ: а) класична схема; б) схема з використанням інтерференційного дзеркала

Функція фільтра Ф2 полягає у відбитті потоку опромінювання в зворотному напрямі, тобто знову через ДО (якщо використовується частково

прозорий об'єкт, яким, зазвичай, бувають біологічні препарати), і пропусканні випромінювання флуоресценції в напрямі ФЕП. Треба скерувати увагу на те, що в цій оптичній схемі спостерігається подвійне збудження об'єкта випромінюванням ЕПТ при проходженні його в прямому і зворотному напрямі, а також на те, що випромінювання флуоресценції, яке в першому варіанті не використовувалось, тепер повністю сприймається ФЕП. Крім того, завдяки наявності імерсійної рідини ІР між оптичними компонентами об'єктива О, фільтрів Ф1 і Ф2 та торцевого вхідного вікна ФЕП усувається відбиття від їх поверхонь, що теж підвищує ефективність використання світлового потоку флуоресценції.

Описаний вище варіант оптичного каналу забезпечує максимальне освітлення ФЕП наведеним флуоресцентним випромінюванням ДО. Застосовувані в торцевих ФЕП напівпрозорі фотокатоли перетворюють в електричний сигнал лише частину падаючого світла, значна його частина зазнає відбиття від дзеркала, створеного вхідним вікном та конденсором або проходить через нього без поглинання. За даними [63], якщо конденсор типу S-20 при $\lambda = 400$ нм поглинає біля 50% випромінювання, пропускаючи 10% та відбиваючи 40%; при $\lambda = 700$ нм ці числа складають 20%, 50%, 30% відповідно. Знизити втрати на відбиття та пропускання для ФЕП з плоскопаралельним вікном можна, якщо ввести паралельний пучок в планшайбу вікна під кутом, який забезпечує повне внутрішнє відбиття на обох поверхнях. Пристроєм, який реалізує такий метод, є розміщена на вхідному вікні призма. При достатньо високій паралельності світлових променів цей метод дозволяє підняти чутливість ФЕП у декілька разів. Такий ефект досягається внаслідок того, що світловий пучок попадає в своєрідну світлову пастку: багаторазове повне внутрішнє відбиття променів від обох поверхонь планшайби приводить до багаторазового збудження фотокатола при кожному черговому відбитті променів від нього.

У процесі повного внутрішнього відбиття від поверхні, на яку напилено фотокатод, світлова хвиля частково виходить за межі цієї поверхні в

середовище з коефіцієнтом заломлення меншим, ніж матеріал планшайби (в даному випадку у вакуум колби ФЕП), не відриваючись від поверхні планшайби змінює напрям руху фронту хвилі і знову повертається в планшайбу, при цьому вибиваючи з плівки фотокатода фотоелектрони. Світлова хвиля у цій зоні повного внутрішнього відбиття має назву еванесцентна хвиля. Повне внутрішнє відбиття від протилежної до фотокатода зовнішньої поверхні ФЕП приводить тільки до зміни напрямку світлового променя в бік фотокатода.

З метою використання повного внутрішнього відбиття для одержання фотоелектронів, описаний вище метод можна модифікувати, використовуючи інший аналогічний ФЕП2 в оптичному контакті його торцевого вхідного вікна з вікном першого ФЕП1 (рис. 4.2).

Оптичний контакт можна досягнути завдяки розміщенню між зовнішніми поверхнями стикованих вікон прошарку імерсійної рідини. В результаті цього повні внутрішні відбиття відбувалися між поверхнями з напиленими на них фотокатодами. Таким чином, загальна кількість місць емісії фотоелектронів в здвоєному ФЕП суттєво збільшується. Вихідний сигнал такого перетворювача випромінювання–сигнал одержується шляхом сумування окремих сигналів з обох ФЕП. Введення світлового пучка у вхідні вікна між фотокатодами здійснюється за допомогою скляної призми Пр, розташованої в оптичному каналі на бокових стінках обох ФЕП.

Високу ефективність цього способу підвищення чутливості через ефективне використання світлового потоку можна одержати при умові забезпечення високої паралельності вхідного світлового пучка. Виходячи з принципу роботи ТСМ, джерело флуоресцентного випромінювання об'єкта є точковим і світловий потік від нього є гомоцентричним.

Моделювання проходження світлового пучка в такому оптичному каналі за допомогою лазера показує, що відбувається семикратне відбиття світлового пучка від фотокатодів, що дозволяє розраховувати на суттєве підвищення

чутливості фотоперетворювача. Використання описаного методу забезпечує підвищення чутливості одного ФЕП, в чотири рази.

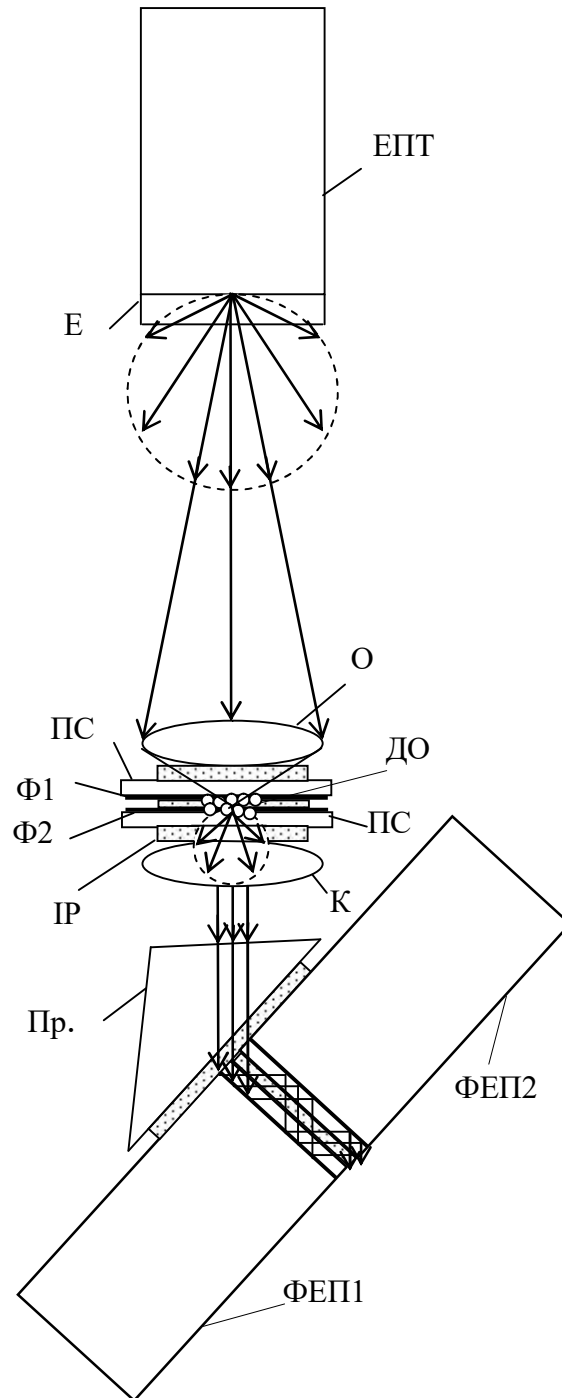


Рисунок 4.2 – Структурна схема оптичного каналу ТСМ з оптичним підсиленням чутливості ФЕП

Для перетворення гомоцентричного світлового потоку в паралельний доцільно застосовувати об'єктив з максимальною апертурою для

ефективнішого випромінювання флуоресценції. Об'єктив необхідно розташувати так, щоб точкове джерело флуоресцентного випромінювання об'єкта знаходилося в його фокусі. Застосування об'єктива з найбільшою апертурою обумовлює дуже коротку робочу відстань, тобто відстань від оправки об'єктива до точки фокусування. Це вимагає заміни товстого предметного скла, на якому розташований ДО, на тонке покривне скло ПС, з нанесеним на нього інтерференційного фільтра Ф2 та наявності імерсійної рідини ІР між об'єктивом О і тонким склом, на якому розташований ДО. Така оптична схема дає змогу розв'язати задачу забезпечення ефективності використання випромінюваного потоку в ультрафіолетовому ТСМ, яка актуальна при використанні методики флуорохромування та методу флуоресцентуючих антитіл.

Використання двох ФЕП при оптичному контакті їх фотокатодів дає ще одну перевагу – покращення відношення сигнал/шум при сумуванні анодних струмів через зменшення шумової складової в $\sqrt{2}$ разів. Природа шумової складової струму аноду ФЕП багатопричинна, деякі її аспекти пов'язані з конструктивними особливостями і не піддаються корекції, інші – можна мінімізувати зовнішніми впливами та заходами.

Термоіонна емісія з фотокатода залежить від роботи виходу в червоній області спектра – чим вона менша, тим менший термоіонний струм. Проте, навіть у цьому випадку термоіонний струм при звичайній температурі, підсилений системою диодів, досягає значень, якими не можна нехтувати. Для зменшення термоіонної емісії, а, отже, для збільшення ефективності ФЕП, останній можна охолоджувати сухим льодом або рідким азотом, проте при цьому необхідно дотримуватись певних пересторог. Надалі покращення ефективності можна одержати, зменшуючи площу фотокатода.

4.2. Телевізійний сканувальний мікроскоп з відтворенням вторинної фотолюмінесценції досліджуваного мікрооб'єкта в умовних кольорах

Для формування кольорового зображення ДО необхідно розділити світловий потік від ДО на три, які відповідають червоному, зеленому та

синьому спектру світлового сигналу від ДО [21]. Найбільшого поширення в прикладних телевізійних системах спектрального розділення світлових потоків набули три принципи:

- одночасне розділення світлового потоку (рис. 4.3);
- послідовне в часі розділення світлового потоку;
- багатозональне просторове розділення світлового потоку безпосередньо на світлочутливій поверхні перетворювача.

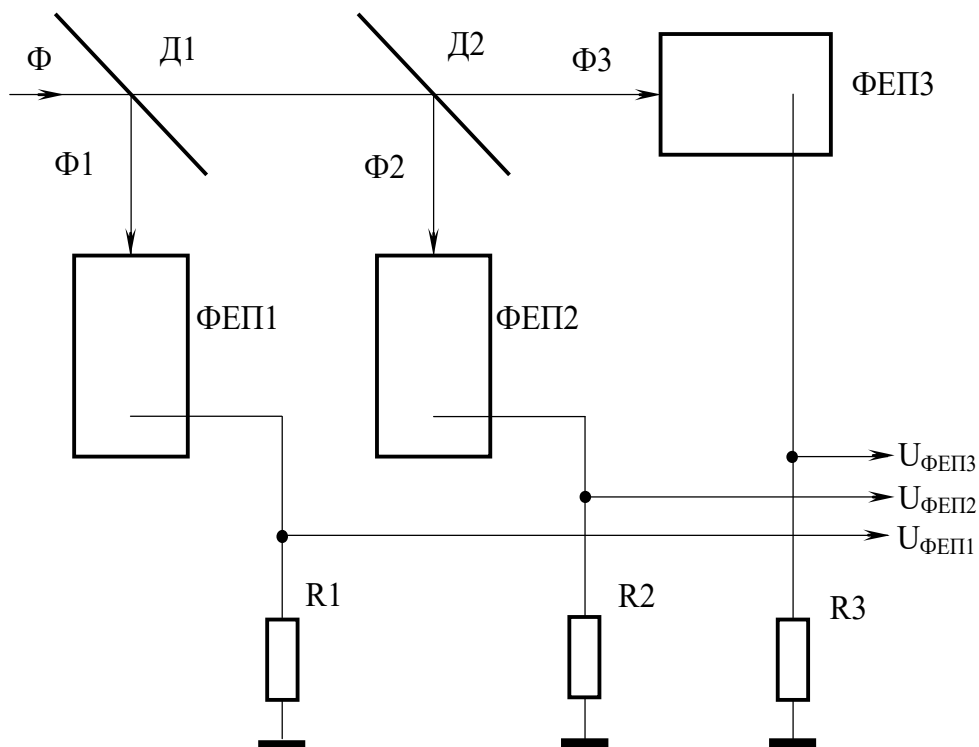


Рисунок 4.3 – Структурна схема одночасного спектрального розділення світлового потоку

Одночасне розділення світлового потоку на спектральні зони можна здійснити двома способами [15, 21]:

1. Попереднє (за ходом світла) розділення загального світлового потоку на окремі просторові відгалуження (за допомогою призм або напівпровідникових ахроматичних дзеркал) з наступним використанням у кожному з них вузькосмугових світлофільтрів, розташованих перед перетворювачами.

2. Розділення загального світлового потоку на окремі просторові відгалуження за спектральною ознакою за допомогою інтерференційних світлорозділюючих дзеркал із заданими спектральними характеристиками та з можливістю застосування коректуючих світлофільтрів (рис. 4.3).

Дзеркала Д1 і Д2, які відбивають певні спектральні смуги (їх спектральні характеристики наведено на рис. 4.4), розділяють центральний світловий потік Φ на три потоки Φ_1 , Φ_2 та Φ_3 . Кожний з виділених світлових потоків має свою спектральну смугу (рис. 4.5) і перетворюється в електричний сигнал окремим світловим перетворювачем, який можна оптимізувати за характеристиками та режимами роботи. Такий спосіб розділення завдяки малому поглинанню світла інтерференційними дзеркалами має переваги з точки зору ефективності використання світлової енергії.

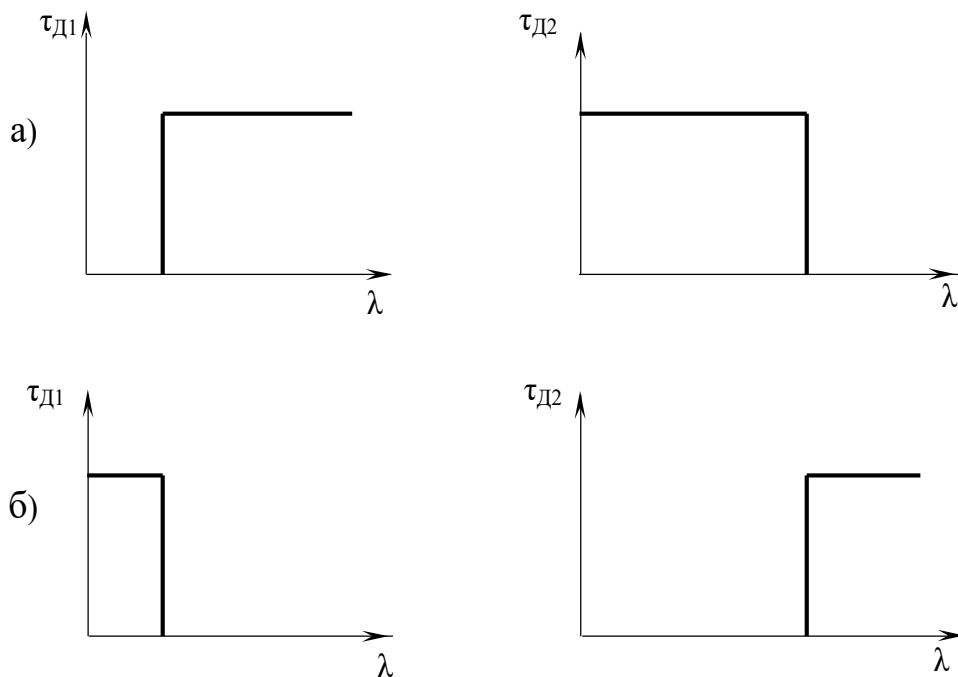


Рисунок 4.4 – Спектральні характеристики інтерференційних світлорозділювальних дзеркал: а) пропускання; б) відбиття

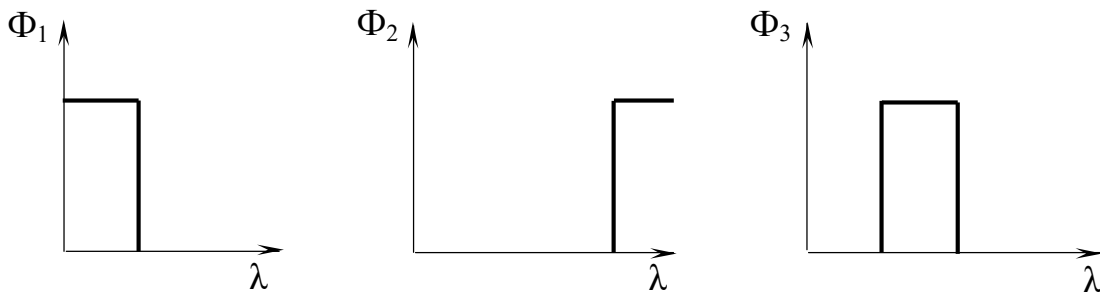


Рисунок 4.5 – Спектральні характеристики розділених світлових потоків

Послідовне в часі розділення інтегрального світлового потоку можна здійснювати за допомогою абсорбційних світлофільтрів, які періодично перекривають світловий потік на три основних кольори. Така оптична схема вимагає синхронізації роботи ЕПТ, розгортки растра та механізму заміни світлофільтрів, розташованих на диску або барабані, з метою забезпечення покадрової передачі кожного кольору. В такій схемі використовується один світлоперетворювач, спектральна характеристика якого повинна бути узгоджена з характеристиками пропускання світлофільтрів. При обробці сигналів фотоперетворювача можна застосувати оперативні накопичувачі, синхронізовані за послідовністю зміни світлофільтрів.

Багатозональне просторове розділення здійснюється за допомогою передавальних трубок або ПЗЗ-матриць з кольоровими ґратчастими світлофільтрами, розташованими безпосередньо на світлочутливій поверхні (рис. 4.6). При цьому немає необхідності в спектральному розділенні світлового потоку, проте з'являється потреба введення додаткової оптичної системи О2, яка б спряжено відображала растр на об'єкті на комірках ПЗЗ-матриці. Перевагою такого варіанту є відсутність окремих елементів розділення та фільтрації світлового потоку і змога використання ЕПТ з тривалим післясвіченням. Недоліки цього варіанту – неможливість електронного регулювання масштабу збільшення та неможливість використання при граничних збільшеннях стандартних скляних підкладок для препаратів через неузгодженість товщини скла з робочим відрізком додаткового об'єктива. При

використанні ПЗЗ-матриць інформація про просторове розділення спектральних складових одержується при обробці електричного сигналу.

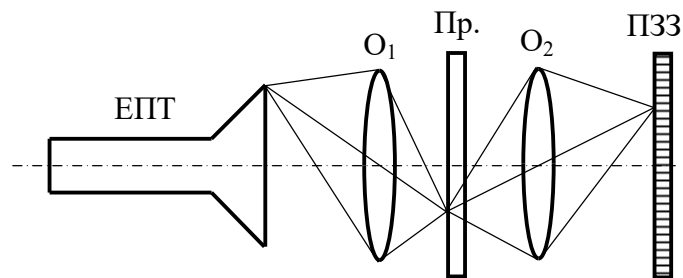


Рисунок 4.6 – Структурна схема ТСМ з багатозональним просторовим розділенням світлового потоку

Всі застосовувані оптичні схеми розділення спектральних складових можна використати в ТСМ, виходячи з конкретних завдань та функціонально-вартісних вимог. Проте, неодмінною умовою є розділення світлового потоку після його розсіювання ДО. Ця умова впливає з необхідності забезпечити максимальну роздільну здатність, яка обмежується дифракцією світла в каналі формування СЕ. Наявність у цьому каналі світлорозділяючих оптичних елементів суттєво погіршить роздільну здатність зображення.

Блок оптичного каналу ТСМ з відтворенням вторинної фотолюмінесценції досліджуваного МО в умовних кольорах повинен забезпечувати:

- вибір необхідного мікроскопного об'єктива для забезпечення заданого коефіцієнта збільшення ТСМ;
- вибір необхідного оптичного фільтра при формуванні псевдокольорового зображення (зображення в умовних кольорах);
- вибір необхідного оптичного фільтра при дослідженні наведеної фотолюмінесценції досліджуваного МО.

Структурна схема блока оптичного каналу БОК наведена на рис. 4.7.

До її складу входять реєстр об'єктів РО, блок керування об'єктами БКО, об'єкти О, реєстр оптичного фільтра РФ, блок керування фільтрами БКФ, фільтри Ф.

Вхідними сигналами блока оптичного каналу є:

- код вибору мікроскопного об'єктива КМО;
- код вибору оптичного фільтра КФ.

Вихідна дія блока полягає в механічному виборі необхідного об'єктива і оптичного фільтра при формуванні псевдокольорового зображення досліджуваного МО.

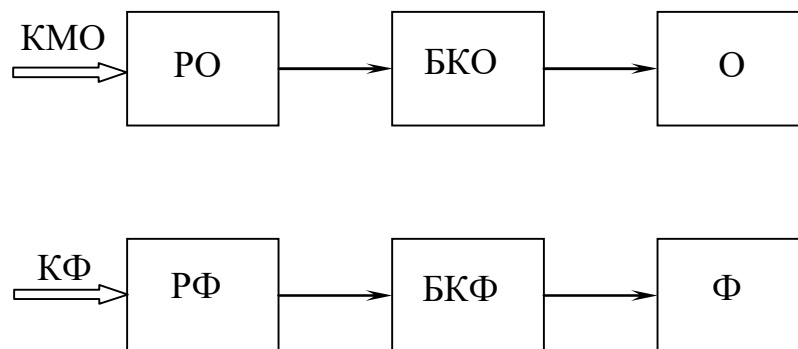


Рисунок 4.7 – Структурна схема блока оптичного каналу БОК

Особливу увагу необхідно скерувати на алгоритмічно-програмне забезпечення ТСМ для формування кольорових зображень, які відповідають наведеній фотолюмінесценції досліджуваного біологічного МО при його скануванні в ультрафіолетовому діапазоні.

Далі розглянемо вимоги до алгоритмічно-програмного забезпечення створення псевдокольорових зображень біологічних МО при скануванні в ультрафіолетовому діапазоні для мікроскопів з максимальними функціональними можливостями. Для побудови спрощених варіантів мікроскопів основні вузли і, відповідно, керування ними буде спрощуватися.

У цьому випадку ТСМ повинен мати максимально можливі функціональні можливості з метою проведення складних спеціалізованих

досліджень. Формування розгортки потрібно забезпечувати з урахуванням граничної роздільної здатності розклад зображення на 5000×5000 елементів. Для швидкого експрес-аналізу необхідно передбачити телевізійний режим формування сканувального растра для введення зображення в ПК, а для детального аналізу можна використати цифрові розгортки, які забезпечать високу точність формування сканувального мінірастра в будь-якій точці екрана ЕПТ з метою детального дослідження окремих фрагментів зображення. При цьому необхідно зазначити, що час введення повноформатного растра максимальної роздільної здатності при умові введення одного елемента зображення за одну мікросекунду буде перевищувати 25 секунд. В цьому мікроскопі необхідно передбачити широкі можливості зміни коефіцієнта збільшення, чутливості, регулювання контрасту в широких межах тощо.

Структурна схема алгоритмічно-програмного забезпечення ТСМ у режимі формування псевдокольорового зображення наведена на рис. 4.8. Вона враховує зміну застосовуваних оптичних фільтрів у оптичному каналі, а також квантування відеосигналу за рівнями, кожному з яких відповідає певний колір.

У структурній схемі використані такі позначення: КРЯ – код регулювання яскравості свічення ЕПТ; КМО – код вибору мікроскопного об'єктива; КФ – код вибору оптичного фільтра; КЖФЕП – код напруги живлення ФЕП; КРП – код регулювання рівня підсилення вхідного сигналу до нормованої величини 1 В.

В результаті проведених досліджень визначено оптимальний напрямок створення алгоритмічно-програмного забезпечення ТСМ для дослідження біологічних МО при формуванні псевдокольорового зображення досліджуваного МО, якщо він сканується в ультрафіолетовому діапазоні [93].

Досить важливими є вимоги до ФЕП, застосовуваних в ТСМ для дослідження біологічних МО при формуванні псевдокольорового зображення досліджуваного МО. Вони повинні мати найбільшу чутливість в ультрафіолетовому діапазоні дослідження та відповідні спектральні характеристики.

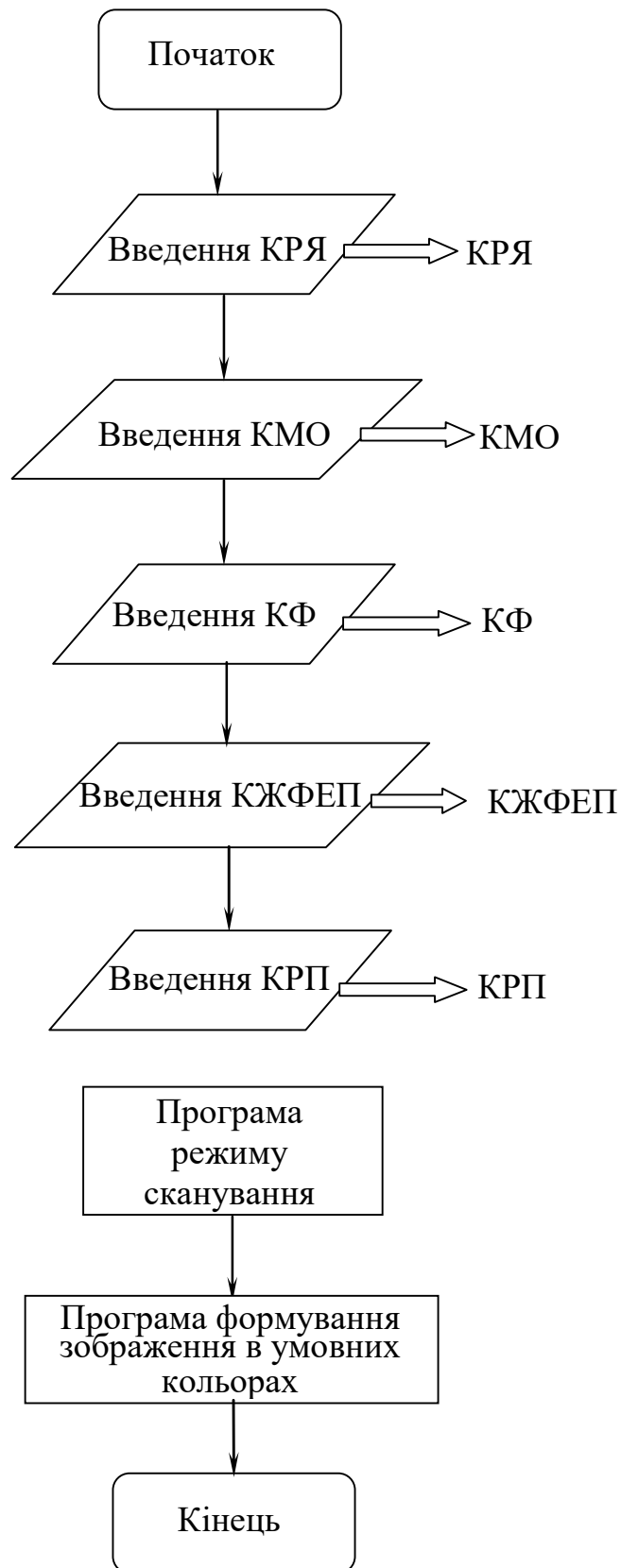


Рисунок 4.8 – Структурна схема алгоритмічно-програмного забезпечення ТСМ при формуванні сканувального растра в режимі формування псевдокольорового зображення

4.3. Телевізійний сканувальний мікроскоп для дослідження біологічних та медичних мікрооб'єктів з малим контрастом

Як відомо, люмінофори – це дрібний кристалічний порошок, який наноситься тонким шаром. Розмір окремих кристалів коливається в межах 1–6 мкм. Однак, густина покриття при нанесенні люмінофорів по полю екрана не є рівномірною. Ця нерівномірність та дискретність люмінофора приводять до того, що при збудженні однакових ділянок екрана немодульованим променем зі стабільними параметрами, світловий потік непостійний. Цю випадкову складову світлового потоку називають структурними шумами. Наявність структурних шумів екрана ЕПТ призводить до появи похибок при формуванні відеосигналу на виході ФЕП. Ці шуми мають суттєвий вплив для визначення питомої густини зображення (робота ТСМ на просвічування) [63].

Запропоновано структурну схему ТСМ [63], до якої входять: блок сканувальної електронно-променевої трубки БСЕПТ, об'єктив О, напівпрозоре дзеркало НДз, дзеркало Дз, досліджуваного об'єкта ДО, перший та другий конденсори – К1 та К2, перший та другий фотоелектронний помножувач – ФЕП1 та ФЕП2, перший та другий логарифмічний підсилювачі – ЛП1 та ЛП2, суматор С та антилогарифмічний підсилювач АЛП, причому блок сканувальної електронно-променевої трубки БСЕПТ через об'єктив О, підімкнений до напівпрозорого дзеркала НДз, перший вихід якого з'єднаний з досліджуваним об'єктом ДО, а другий вихід – з дзеркалом Дз, вихід досліджуваного об'єкта ДО через перший конденсор К1 з'єднаний з оптичним входом першого фотоелектронного помножувача ФЕП1, вихід дзеркала Дз через другий конденсор К2 – з оптичним входом другого фотоелектронного помножувача ФЕП2, вихід першого логарифмічного підсилювача ЛП1 з'єднаний з неінвертуючим входом суматора С, вихід другого логарифмічного підсилювача ЛП2 – з інвертуючим входом суматора С, вихід якого підімкнений до входу антилогарифмічного підсилювача АЛП, вихід якого є виходом пристрою (рис. 4.9).

Однак, у такому пристрої лише частково здійснюється компенсація впливу шумів люмінофора застосовуваної сканувальної ЕПТ для освітлення ДО, що приводить до збільшення відношення сигнал/шум на виході пристрою при умові, що ДО має великий контраст. Шуми люмінофора впливають на зміну яскравості свічення екрана ЕПТ по всій площі формованого світного сканувального растра, що приводить до зміни амплітуди вихідного сигналу при однаковому контрасті ДО. Зміна амплітуди вихідного сигналу при однаковому контрасті призводить до погіршення відношення сигнал/шум формованого вихідного сигналу. В такому пристрої можлива лише часткова компенсація шумів люмінофора для мало-контрастних об'єктів дослідження.

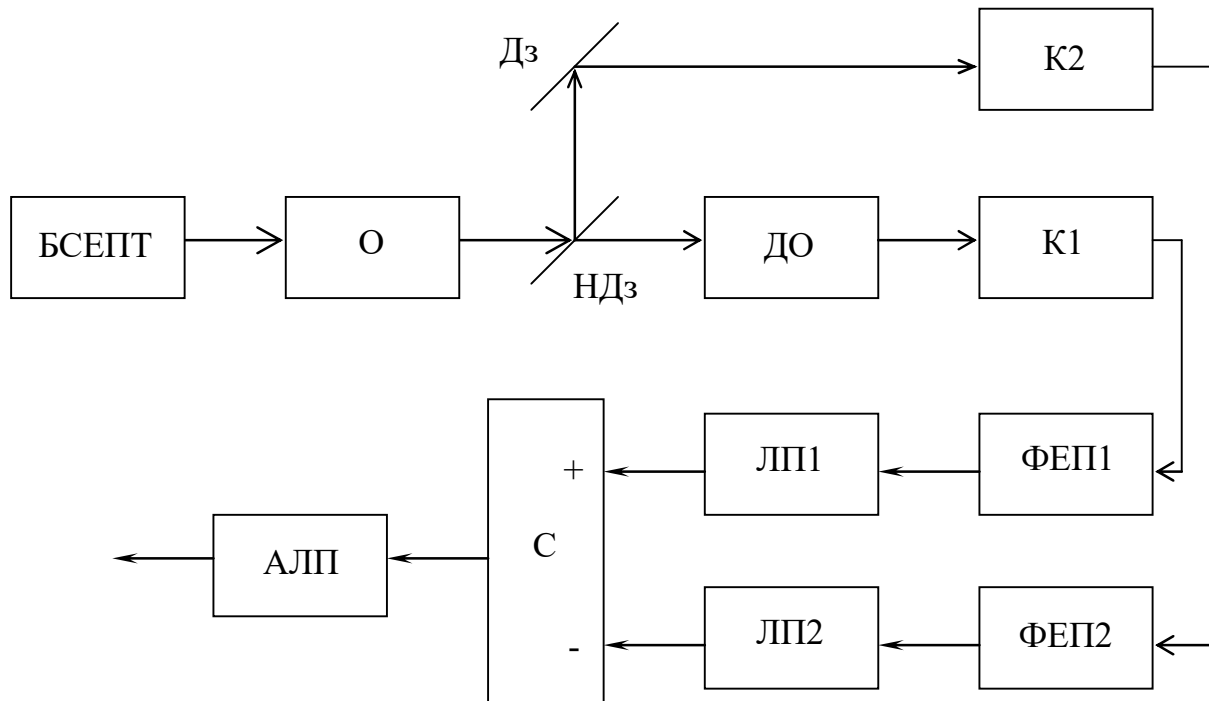


Рисунок 4.9 – Структурна схема ТСМ у режимі усунення шумів ЕПТ

У розробленому варіанті побудови структурної схеми ТСМ із застосуванням ЕПТ надвисокої роздільної здатності для дослідження, наприклад, різних біологічних та медичних МО, додатково до складу входять: підсилювач П, детектор Д, фільтр Ф та підсилювач з регульованим коефіцієнтом підсилення ПРП, причому вхід підсилювача П з'єднаний з виходом першого фотоелектронного помножувача ФЕП1, а перший вихід – з виходом першого логарифмічного підсилювача ЛП1, другий вихід підсилювача

П через послідовно з'єднані детектор Д та фільтр Ф підімкнений до другого входу підсилювача з регульованим коефіцієнтом підсилення ПРП, перший вхід якого з'єднаний з виходом другого фотоелектронного помножувача ФЕП2, а вихід – з входом другого логарифмічного підсилювача ЛП2 (рис. 4.10).

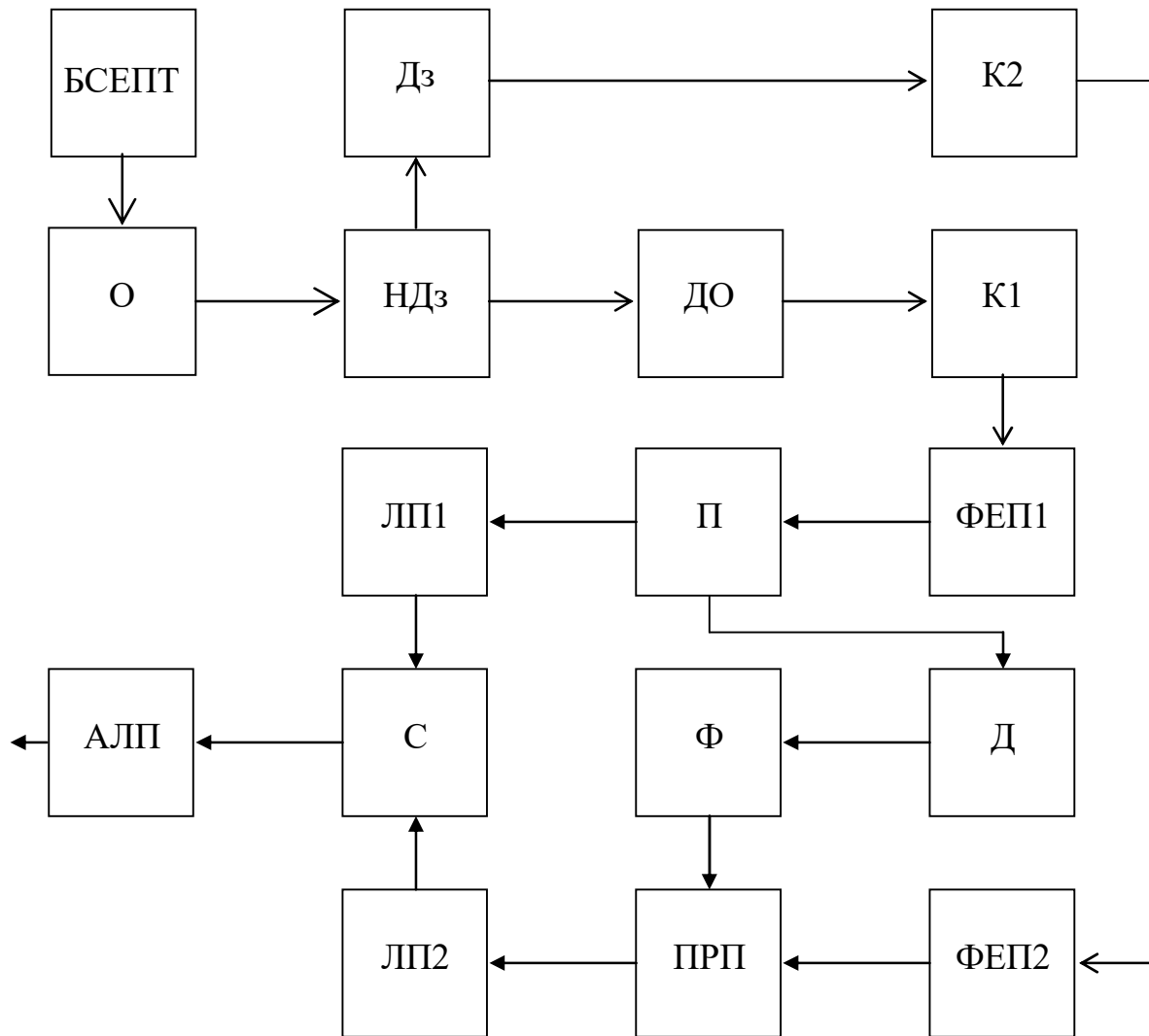


Рисунок 4.10 – ТСМ для дослідження МО з малим контрастом зображення

У результаті введення додаткових елементів та зв'язків забезпечується компенсація нерівномірності свічення сканувального растра через шуми люмінофора. Це дає змогу забезпечити дослідження різних МО, зображення яких є малоконтрастним, значним покращенням відношення сигнал/шум на виході пристрою через зменшення впливу шумів люмінофора на формування

вихідного сигналу пристрою, та, відповідно, підвищення рівня контрасту результуючого зображення [50].

Цей ТСМ також може успішно використовуватись не тільки для дослідження динамічних МО, але й для потреб, наприклад, криміналістики та мікробіології при вивченні зрізів тканин, де МО частіше є статичними або малорухомими.

До складу наведеної загальної структурної схеми входять: блок сканувальної електронно-променевої трубки БСЕПТ, об'єтив О, напівпрозоре дзеркало НДз, дзеркало Дз, досліджуваний об'єкт ДО, перший конденсор К1, другий конденсор К2, перший фотоелектронний помножувач ФЕП1, другий фотоелектронний помножувач ФЕП2, підсилювач П, детектор Д, фільтр Ф, підсилювач з регульованим коефіцієнтом підсилення ПРП, перший логарифмічний підсилювач ЛП1, другий логарифмічний підсилювач ЛП2, суматор С, антилогарифмічний підсилювач АЛП.

Мікроскоп працює так. На екрані сканувальної ЕПТ за допомогою блока сканувальної електронно-променевої трубки БСЕПТ формується світний растр. У разі переміщення світної плями в межах робочого поля світного сканувального растра світловий потік, який падає на досліджуваний об'єкт ДО, через зміну яскравості свічення сканувальної плями не залишається постійним. Флуктуаційні завади, викликані шумами люмінофора, приводять до погіршення відношення сигнал/шум. Вплив флуктуацій у запропонованій схемі усувається так. Світловий потік, який пройшов через об'єтив О, розділяється напівпрозорим дзеркалом НДз на два потоки. Перший потік використовується для освітлення досліджуваного об'єкта ДО, а другий потік через дзеркало Дз надходить через другий конденсор К2 на оптичний канал другого фотоелектронного помножувача ФЕП2. Відбитий від напівпрозорого дзеркала НДз світловий потік використовується як опорний. На виході другого фотоелектронного помножувача ФЕП2 формується електричний сигнал, зміна амплітуди якого відповідає зміні яскравості свічення сканувальної плями. Змінна складова цього сигналу подається на підсилювач з регульованим

коефіцієнтом підсилення ПРП. Зміна коефіцієнта підсилення здійснюється відповідно до електричного сигналу, який прямопропорційний амплітуді сигналу на виході підсилювача П.

Світловий сигнал від світлового потоку, відбитий від досліджуваного об'єкта ДО або який пройшов через нього, збирається першим конденсором К1 і подається на оптичний вхід першого фотоелектронного помножувача ФЕП1. Тоді електричний сигнал на виході першого фотоелектронного помножувача ФЕП1 буде пропорційний прозорості або коефіцієнту відбивання елемента досліджуваного об'єкта ДО. Чим більшим є сигнал на виході підсилювача П, тим більшою в ньому є частка зміни світлового потоку внаслідок флуктуацій зміни яскравості свічення сканувальної плями. На виході детектора Д формується сигнал, амплітуда якого пропорційна амплітуді сигналу на виході підсилювача П. Фільтр Ф усуває високочастотну складову електричного сигналу і забезпечує сталу часу, з якою необхідно регулювати коефіцієнт підсилення підсилювача з регульованим коефіцієнтом підсилення ПРП. Отож, амплітуда сигналу на виході підсилювача сигналу з регульованим коефіцієнтом підсилення ПРП є прямопропорційною амплітуді сигналу на виході підсилювача П.

Якщо отримані сигнали з виходів підсилювача П та підсилювача з регульованим коефіцієнтом підсилення ПРП прологарифмувати логарифмічними підсилювачами ЛП1 та ЛП2, знайти різницю логарифмів на виході суматора С та антилогарифмувати, то на виході антилогарифмічного підсилювача АЛП отримаємо сигнал, пропорційний до коефіцієнта пропускання або коефіцієнта відбивання досліджуваного об'єкта ДО без урахування шумів люмінофора застосовуваної ЕПТ.

Отже, запропонований ТСМ дозволить покращити відношення сигнал/шум вихідного сигналу внаслідок зменшення впливу шумів люмінофора при дослідженні об'єктів з малим контрастом формованого зображення.

4.4. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп для відстеження положення центра динамічного мікрооб'єкта

Розроблений ТСМ можна успішно використати для дослідження різних типів динамічних МО, оскільки при лабораторній діагностиці таких МО існує необхідність забезпечення утримання їх зображення в межах поля зору мікроскопа протягом всього часу дослідження. Це стосується, в першу чергу, МО з довільним (наприклад, хаотичним) характером руху та більших за розміром від СЕ [70, 71].

Найближчим за технічною суттю до запропонованого є ТСМ [45, 63], до складу структурної схеми якого входять: проекційна електронно-променева трубка ПЕПТ, об'єktiv О, досліджуваний об'єкт ДО, перший відеопідсилювач ВП1, фотоелектронний помножувач ФЕП, другий відеопідсилювач ВП2, тактовий генератор ТГ, формувач імпульсів гасіння ФІГ, формувач сигналу розгортки по координаті Х ФСРХ, перетворювач напруга-струм по координаті Х ПНСХ, котушки відхилення по координаті Х КВХ, формувач сигналу розгортки по координаті У ФСРУ, перетворювач напруга-струм по координаті У ПНСУ, котушки відхилення по координаті У КВУ, компаратор К, блок визначення координат БВК, блок пам'яті БП, блок обчислення віддалі БОВ, блок обчислення часу БОЧ, блок обчислення швидкості руху БОШ, блок формування мінірастра БФМ (рис. 4.12).

Однак, такий ТСМ не дає змоги утримувати зображення досліджуваного МО в межах поля зору мікроскопа протягом всього часу вимірювання, оскільки він призначений лише для вимірювання швидкості руху досліджуваних МО, які рухаються з великою швидкістю нерівномірно та непрямолінійно [4, 41].

У розроблений варіант побудови структурної схеми ТСМ на ЕПТ надвисокої роздільної здатності додатково входять: блок порівняння координат Х БПКХ, блок порівняння координат У БПКУ, блок визначення центра мінірастра БВЦ та блок початку сканування БПС, але відсутні – блок

обчислення часу БОЧ, блок обчислення віддалі БОВ та швидкості БОШ (рис. 4.12).

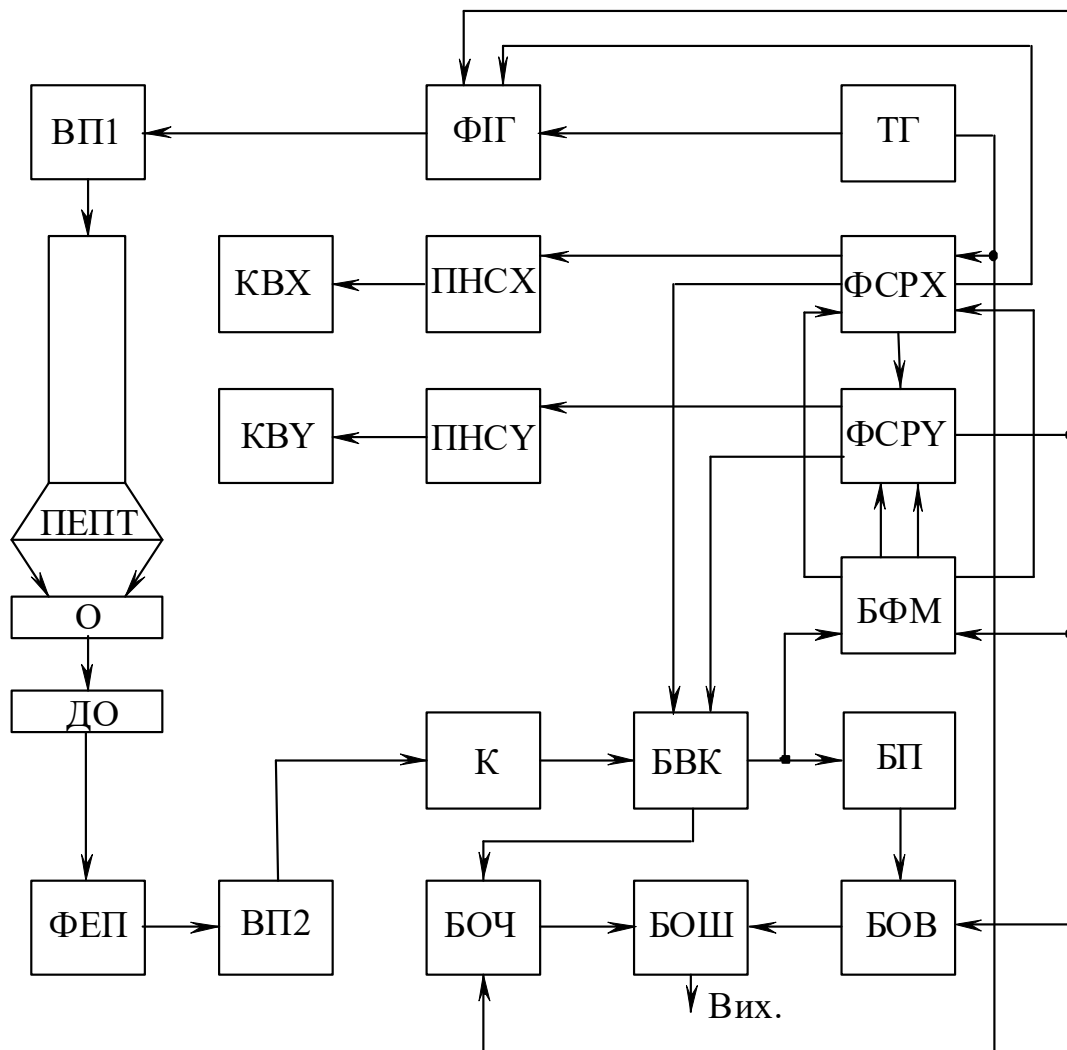


Рисунок 4.11 – Структурна схема ТСМ для вимірювання швидкості руху досліджуваних МО

У результаті введення додаткових елементів та зв'язків забезпечується можливість утримання зображення досліджуваного МО з довільним характером руху, що має розміри більші за розміри СЕ, в межах поля зору мікроскопа протягом всього часу дослідження, методом формування сканувального мінірастра, центр якого співпадає з центром МО при формуванні кожного кадру зображення. До складу наведеної загальної структурної схеми ТСМ входять: проекційна електронно-променева трубка ПЕПТ, об'єktiv О, досліджуваний

об'єкт ДО, перший відеопідсилювач ВП1, фотоелектронний помножувач ФЕП, другий відеопідсилювач ВП2, тактовий генератор ТГ, формувач імпульсів гасіння ФІГ, формувач сигналу розгортки по координаті Х ФСРХ, перетворювач напруга-струм по координаті Х ПНСХ, котушки відхилення по координаті Х КВХ, формувач сигналу розгортки по координаті Y ФСРУ, перетворювач напруга-струм по координаті Y ПНСУ, котушки відхилення по координаті Y КВУ, компаратор К, блок визначення координат БВК, блок пам'яті БП, блок порівняння координат Х БПКХ, блок порівняння координат Y БПКУ, блок визначення центра мінірастра БВЦ, блок початку сканування БПС та блок формування мінірастра БФМ.

Мікроскоп працює так. На першому виході тактового генератора ТГ формуються імпульси гасіння, тривалість яких дорівнює тривалості переміщення СЕ в сусіднє положення. На другому виході тактовий генератор ТГ формує імпульси, період яких дорівнює тривалості виводу одного елемента сканувального растра на прямому ході розгортки. Ця тривалість складається з часу переміщення СЕ з одного положення в інше та часу фіксованого положення СЕ, на протязі якого він світиться.

Формувач сигналу розгортки по координаті Х ФСРХ формує на першому виході сходячо-наростаючу напругу, яка відповідає відхиленню сканувальної плями по рядку, на другому виході – паралельний двійковий код, який відповідає миттєвому значенню положення сканувальної плями в рядку, на третьому виході – імпульс закінчення розгортки по координаті Х і початку зворотного ходу по рядку, на четвертому виході – імпульс гасіння сканувальної плями під час зворотного ходу по рядку. Перетворювач напруга-струм по координаті Х ПНСХ формує з великою точністю струм відхилення в котушках відхилення по координаті Х КВХ, який відповідає сходячо-наростаючому сигналу на першому виході формувача сигналу розгортки по координаті Х ФСРХ.

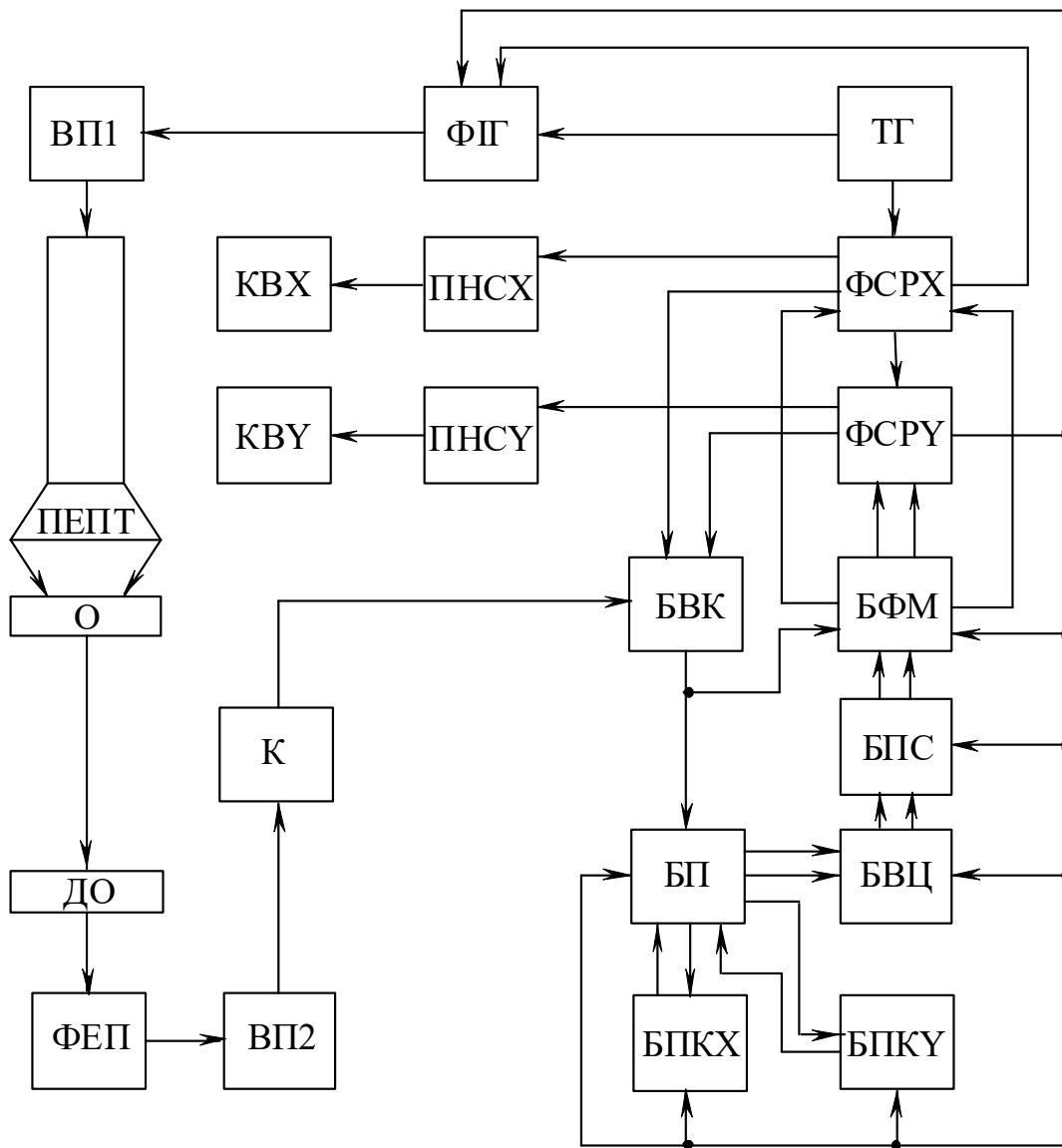


Рисунок 4.12 – ТСМ для відстеження положення центра динамічного МО

Формувач сигналу розгортки по координаті Y ФСРУ формує на першому виході сходячо-наростаючу напругу, яка відповідає відхиленню сканувальної плями по кадру, на другому виході – паралельний двійковий код, який відповідає миттєвому значенню положення сканувальної плями по кадру, на третьому виході – кадрові імпульси гасіння, які подаються на третій вхід формувача імпульсів гасіння ФІГ, другий вхід блока формування мінірастра БФМ, перший вхід блока початку сканування БПС, перший вхід блока визначення центра мінірастра БВЦ, перший вхід блока порівняння координат X БПКХ, перший вхід блока порівняння координат Y БПКУ та другий вхід блока пам'яті БП. Кадрові імпульси гасіння використовуються для синхронізації

роботи цих блоків при записі, зчитуванні та обробці інформації. Перетворювач напруга-струм по координаті Y ПНСУ формує з великою точністю струм відхилення в котушках відхилення по координаті Y КВУ, який відповідає сходячато-наростаючому сигналу на першому виході формувача сигналу розгортки по координаті Y ФСРУ.

На виході формувача імпульсів гасіння ФІГ формується імпульс, тривалість якого дорівнює тривалості найтривалішого перехідного процесу при переміщенні СЕ по екрану проекційної електронно-променевої трубки ПЕПТ. Перший відеопідсилювач ВП1 сумує імпульси гасіння з постійним зміщенням, підсилює їх, після чого вони подаються на керуючий електрод проекційної електронно-променевої трубки ПЕПТ, забезпечуючи необхідну яскравість свічення екрана трубки. Світловий сигнал з екрана проекційної електронно-променевої трубки ПЕПТ через об'єktiv O проектується на досліджуваний об'єкт ДО. Світловий сигнал від досліджуваного об'єкта ДО надходить на вхід фотоелектронного помножувача ФЕП, на виході якого формується електричний сигнал, миттєве значення якого пропорційне кількості світла, яке пройшло через досліджуваний об'єкт ДО. Цей сигнал підсилюється до нормованої величини другим відеопідсилювачем ВП2 і подається на вхід компаратора К. Якщо рівень вихідного сигналу другого відеопідсилювача ВП2 перевищує рівень спрацьовування компаратора К, то на його виході з'явиться імпульс, який подається на перший вхід блока визначення координат БВК і фіксує миттєві значення координат досліджуваного об'єкта ДО, які подаються на другий та третій входи блока визначення координат БВК.

Блок визначення координат БВК обчислює координати центру досліджуваного об'єкта ДО і подає по виходу команду запису їх кодів на перший вхід блока пам'яті БП та на перший вхід блока формування мінірастра БФМ. Розмір мінірастра є значно меншим розміру повноформатного растра ($\leq 10\%$ від розміру повноформатного растра). Центр першого формованого мінірастра співпадає з центром ДО при першому повноформатному скануванні, а центр кожного наступного мінірастра співпадає з центром ДО при його

попередньому скануванні. На першому виході блок формування мінірастра БФМ формує код початку розгортки по координаті X , на другому виході – код кінця розгортки по координаті X , на третьому виході – код початку розгортки по координаті Y , на четвертому виході – код кінця розгортки по координаті Y . Отже, кожний наступний сканувальний растр, крім першого, має малі розміри, які визначаються кодами, що надходять з блока формування мінірастра БФМ. Співпадіння коду центру мінірастра з кодом центру ДО при попередньому скануванні дозволяє відстежувати зміну положення МО [65, 66].

Після закінчення формування сканувального растра відповідно до переднього фронту кадрового імпульсу гасіння з формувача сигналу розгортки по координаті Y ФСРҮ блок порівняння координат X БПКХ та блок порівняння координат Y БПКҮ вибирають з блока пам'яті БП записані коди координат центру ДО X та Y відповідно. Відбувається порівняння отриманих координат центру МО з граничними значеннями координат повноформатного сканувального растра. Якщо є перевищення граничних значень координат X та/чи Y з виходів блока порівняння координат X БПКХ та/чи блока порівняння координат Y БПКҮ подається сигнал про припинення процесу сканування та перехід у початковий режим роботи мікроскопа. Якщо МО знаходиться в межах повноформатного сканувального растра відповідно до сигналу формувача сигналу розгортки по координаті Y ФСРҮ, блок визначення центра мінірастра БВЦ вибирає з блока пам'яті БП записані коди координат досліджуваного МО та обчислює координати центра мінірастра. Далі блок визначення центра мінірастра БВЦ по першому та другому виходах передає коди координат центра мінірастра на блок початку сканування БПС, який визначає початкові координати сканувального мінірастра та подає сигнал початку формування мінірастра по першому та другому виходах на блок формування мінірастра БФМ. Отже, запропонований ТСМ забезпечує утримання зображення досліджуваного МО в межах поля зору мікроскопа протягом всього часу дослідження.

4.5. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп для визначення прискорення руху досліджуваних мікрооб'єктів

Розроблений ТСМ можна використати для визначення прискорення руху різних типів динамічних МО, які рухаються нерівномірно та з довільною траєкторією, вимірюванням координат їх двох послідовних у часі положень у полі зору мікроскопа (відповідно до тривалості формування двох кадрів сканування) з метою визначення швидкості руху цих МО та наступного визначення прискорення їх руху (за наявності двох послідовних у часі значень швидкості руху МО) [67].

Найближчим за технічною суттю до запропонованого ТСМ, структурна схема якого наведена на рис. 4.11.

Однак, такий ТСМ не дозволяє визначати прискорення руху ДО, оскільки він призначений лише для вимірювання координат центра ДО при двох послідовних кадрах сканування і відповідного визначення швидкості його руху [20, 46]. Для визначення прискорення руху ДО необхідно отримати два послідовних у часі значення швидкості руху цього об'єкта при послідовних скануваннях і, відповідно, визначити поточне значення прискорення [46, 63].

До відомого варіанту побудови структурної схеми ТСМ на ЕПТ надвисокої роздільної здатності додатково входять: другий та третій блоки пам'яті – БП2 та БП3, перший, другий, третій та четвертий формувачі імпульсів – ФП1–ФП4 та арифметично-логічний блок АЛБ, у результаті чого забезпечується можливість визначення прискорення руху ДО (рис. 4.13).

У результаті введення додаткових елементів та зв'язків забезпечується визначення прискорення руху ДО, який рухається нерівномірно та з довільною траєкторією [47, 63]. Прискорення руху ДО визначається за наявності двох послідовних у часі значень швидкості руху ДО шляхом порівняння цих значень та визначення різниці між ними відповідно до тривалості визначення одного значення прискорення руху ДО:

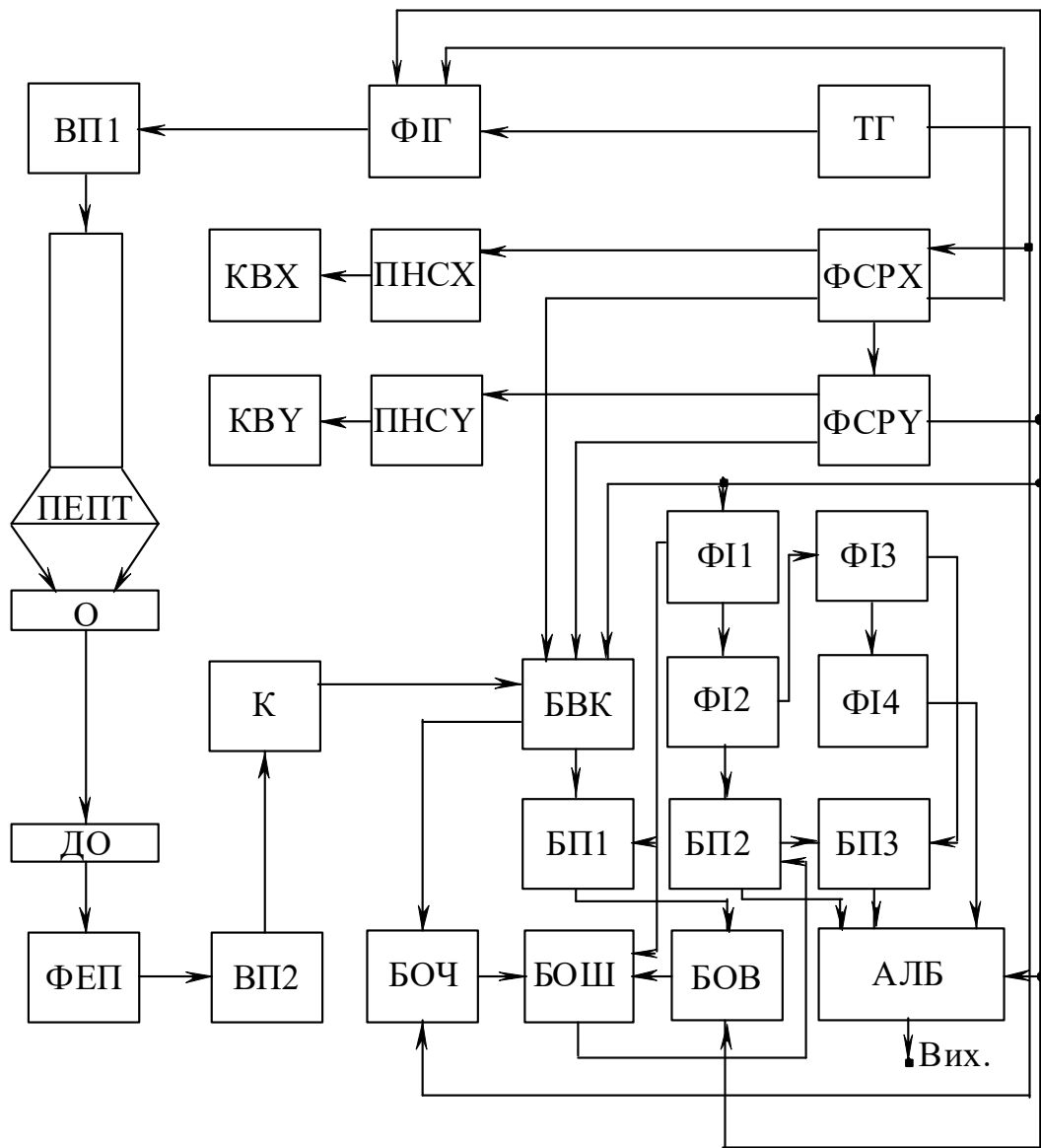


Рисунок 4.13 – ТСМ для визначення прискорення руху досліджуваних МО

$$a_{\text{МО}\langle n \rangle} = (V_{\langle n \rangle} - V_{\langle n-1 \rangle}) / T_K, \quad (4.1)$$

де $a_{\text{МО}\langle n \rangle}$ – значення прискорення руху досліджуваного МО, яке обраховане у $\langle n \rangle$ -тому кадрі, сформованого сканувальним растром зображення;

$V_{\langle n \rangle}$ та $V_{\langle n-1 \rangle}$ – значення швидкостей руху досліджуваного МО, які обраховані у $\langle n \rangle$ -тому та $\langle n-1 \rangle$ -му кадрах, сформованого сканувальним растром зображення;

T_K – тривалість формування одного кадру зображення сформованого сканувальним растром.

Визначення прискорення руху досліджуваного МО $a_{MO\langle n \rangle}$ за наявності попередньо визначених швидкостей руху МО $V_{\langle n \rangle}$ та $V_{\langle n-1 \rangle}$ відбувається протягом останнього сформованого кадру зображення, тому на це затрачається лише час у межах одного кадру зображення T_K . Зрозуміло, що протягом цього часу досліджуваній МО повинен безперервно знаходитись у межах поля зору ТСМ.

Мікроскоп працює так. На першому виході тактового генератора ТГ формуються імпульси гасіння, тривалість яких дорівнює тривалості переміщення СЕ в сусіднє положення. На другому виході тактовий генератор ТГ формує імпульси, період яких дорівнює тривалості виводу одного елемента сканувального растра на прямому ході розгортки. Ця тривалість складається з часу переміщення СЕ з одного положення в інше та часу фіксованого положення СЕ, протягом якого він світиться.

Формувач сигналу розгортки по координаті Х ФСРХ формує на першому виході сходячато-наростаючу напругу, яка відповідає відхиленню сканувальної плями по рядку, на другому виході – паралельний двійковий код, який відповідає миттєвому значенню положення сканувальної плями в рядку, на третьому виході – імпульс закінчення розгортки по координаті Х і початку зворотного ходу по рядку, на четвертому виході – імпульс гасіння сканувальної плями під час зворотного ходу по рядку. Перетворювач напруга-струм по координаті Х ПНСХ формує з великою точністю струм відхилення в котушках відхилення по координаті Х КВХ, який відповідає сходячато-наростаючому сигналу на першому виході формувача сигналу розгортки по координаті Х ФСРХ.

Формувач сигналу розгортки по координаті Y ФСРУ формує на першому виході сходячато-наростаючу напругу, яка відповідає відхиленню сканувальної плями по кадру, на другому виході – паралельний двійковий код, який відповідає миттєвому значенню положення сканувальної плями по кадру, на третьому виході – кадрові імпульси гасіння, які подаються на третій вхід

формувача імпульсів гасіння ФІГ, другий вхід блока обчислення віддалі БОВ, вхід першого формувача імпульсів ФІ1, четвертий вхід блока визначення координат БВК та перший вхід арифметично-логічного блока АЛБ. Кадрові імпульси гасіння використовуються для синхронізації роботи блока визначення координат БВК, блока обчислення віддалі БОВ, першого формувача імпульсів ФІ1 та арифметично-логічного блока АЛБ при записі, зчитуванні та обробці інформації. Перетворювач напруга-струм по координаті Y ПНСУ формує з великою точністю струм відхилення в котушках відхилення по координаті Y КВУ, який відповідає сходячато-наростаючому сигналу на першому виході формувача сигналу розгортки по координаті Y ФСРУ.

На виході формувача імпульсів гасіння ФІГ формується імпульс, тривалість якого дорівнює тривалості найтривалішого перехідного процесу при переміщенні СЕ по екрану проекційної електронно-променевої трубки ПЕПТ. Перший відеопідсилювач ВП1 сумує імпульси гасіння з постійним зміщенням, підсилює їх, після чого вони подаються на керуючий електрод проекційної електронно-променевої трубки ПЕПТ, забезпечуючи необхідну яскравість свічення екрана трубки. Світловий сигнал з екрана проекційної електронно-променевої трубки ПЕПТ через об'єktiv O проектується на досліджуваний об'єкт ДО. Світловий сигнал від досліджуваного об'єкта ДО надходить на вхід фотоелектронного помножувача ФЕП, на виході якого формується електричний сигнал, миттєве значення якого пропорційне кількості світла, яке пройшло через досліджуваний об'єкт ДО. Цей сигнал підсилюється до нормованої величини другим відеопідсилювачем ВП2 і подається на вхід компаратора К. Якщо рівень вихідного сигналу другого відеопідсилювача ВП2 перевищує рівень спрацьовування компаратора К, то на його виході з'явиться імпульс, який подається на перший вхід блока визначення координат БВК і фіксує миттєві значення координат досліджуваного об'єкта ДО, які подаються на другий та третій входи блока визначення координат БВК.

Блок визначення координат БВК обчислює координати центру досліджуваного об'єкта ДО і подає команду запису по першому виходу їх в

перший блок пам'яті БП1 та по другому виходу команду на перший вхід блока обчислення часу БОЧ. Блок обчислення часу БОЧ визначає час між двома появами координат центру досліджуваного об'єкта ДО в двох послідовних кадрах сканування і у вигляді паралельного двійкового коду подає його на другий вхід блока обчислення швидкості БОШ. Блок обчислення віддалі БОВ за командою з блока формувача сигналу розгортки по координаті Y ФСРУ вибирає з першого блока пам'яті БП1 коди координат двох послідовних положень центру ДО і визначає віддаль, на яку він перемістився. Обчислена віддаль у вигляді паралельного двійкового коду надходить на перший вхід блока обчислення швидкості БОШ, який і визначає миттєве значення швидкості руху об'єкта між двома скануваннями повноформатним растром. Значення цієї швидкості у вигляді паралельного двійкового коду подається на другий вихід другого блока пам'яті БП2.

Перший формувач імпульсів ФІ1 формує імпульс, передній фронт якого співпадає з переднім фронтом кадрового імпульсу гасіння, а тривалість є меншою тривалості кадрового імпульсу гасіння та тривалості імпульсу на виході другого формувача імпульсів ФІ2. Другий формувач імпульсів ФІ2 формує імпульс, передній фронт якого співпадає з переднім фронтом кадрового імпульсу гасіння, а тривалість є меншою тривалості кадрового імпульсу гасіння та тривалості імпульсу на виході четвертого формувача імпульсів ФІ4 і більшою тривалості імпульсу на виході третього формувача імпульсів ФІ3. Третій формувач імпульсів ФІ3 формує імпульс, передній фронт якого співпадає з переднім фронтом кадрового імпульсу гасіння, а тривалість є меншою тривалості кадрового імпульсу гасіння та більшою тривалості імпульсу на виході першого формувача імпульсів ФІ1. Четвертий формувач імпульсів ФІ4 формує імпульс, передній фронт якого співпадає з переднім фронтом кадрового імпульсу гасіння, а тривалість є меншою тривалості кадрового імпульсу гасіння.

Після закінчення формування сканувального растра відповідно до переднього фронту вихідного імпульсу з першого формувача імпульсів ФІ1

відбувається обчислення та запис кодів координат розташування центру ДО у перший блок пам'яті БП1. Відповідно до заднього фронту вихідного імпульсу з першого формувача імпульсів ФІ1 здійснюється обчислення миттєвого значення швидкості руху ДО. Відповідно до заднього фронту вихідного імпульсу другого формувача імпульсів ФІ2 здійснюється запис значення обчисленої швидкості у другий блок пам'яті БП2. Відповідно до заднього фронту вихідного імпульсу третього формувача імпульсів ФІ3 здійснюється перенесення інформації з другого блока пам'яті БП2 в третій блок пам'яті БП3. Далі відповідно до заднього фронту четвертого формувача імпульсів ФІ4 арифметично-логічний блок АЛБ вибирає з блоків пам'яті БП2 та БП3 коди, які відповідають двом послідовним у часі значенням миттєвої швидкості руху ДО, і визначає прискорення руху ДО. Відповідно до заднього фронту кадрового імпульсу гасіння відбувається обнулювання блока визначення координат БВК і третього блока пам'яті БП3 та повторення процесу підрахунку для наступного кадру сканування. Значення прискорення ДО подається на вихід ТСМ у вигляді паралельного двійкового коду, який надалі використовується для необхідної обробки. Отже, запропонований ТСМ дозволяє визначати прискорення руху ДО, який рухається нерівномірно та з довільною траєкторією.

4.6. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп для дослідження мікрооб'єктів у процесі їх надшвидкого охолодження

Розроблений варіант побудови структурної схеми ТСМ на ЕПТ надвисокої роздільної здатності можна використати для дослідження різних типів МО в процесі їх надшвидкого охолодження в галузях кріомедицини та кріобіології [107].

Найближчим за технічною суттю до пропонованого є ТСМ для дослідження МО [63], до структурної схеми якого входять: блок керування режимами роботи БКРР, блок формування сканувального растра БФСР, блок сканувальної електронно-променевої трубки БЕПТ, блок оптичного каналу БОК, блок фотоелектронного помножувача БФЕП, блок формування

відеосигналу БФВС, блок оброблення відеосигналу БОВС, блок спряження з персональним комп'ютером БСПК, персональний комп'ютер ПК та телевізійний монітор ТМ, на екрані якого формується зображення досліджуваного МО, причому перший вихід блока керування режимами БКРР роботи підімкнений до входу блока формування сканувального растра БФСР, а другий вихід – до другого входу блока електронно-променевої трубки БЕПТ, перший вхід якого з'єднаний з виходом блока формування сканувального растра БФСР, а вихід оптично зв'язаний з блоком оптичного каналу БОК, блок фотоелектронного помножувача БФЕП через послідовно з'єднані блок формування відеосигналу БФВС та блок оброблення відеосигналу БОВС підімкнений до першого входу телевізійного монітора (рис. 4.14).

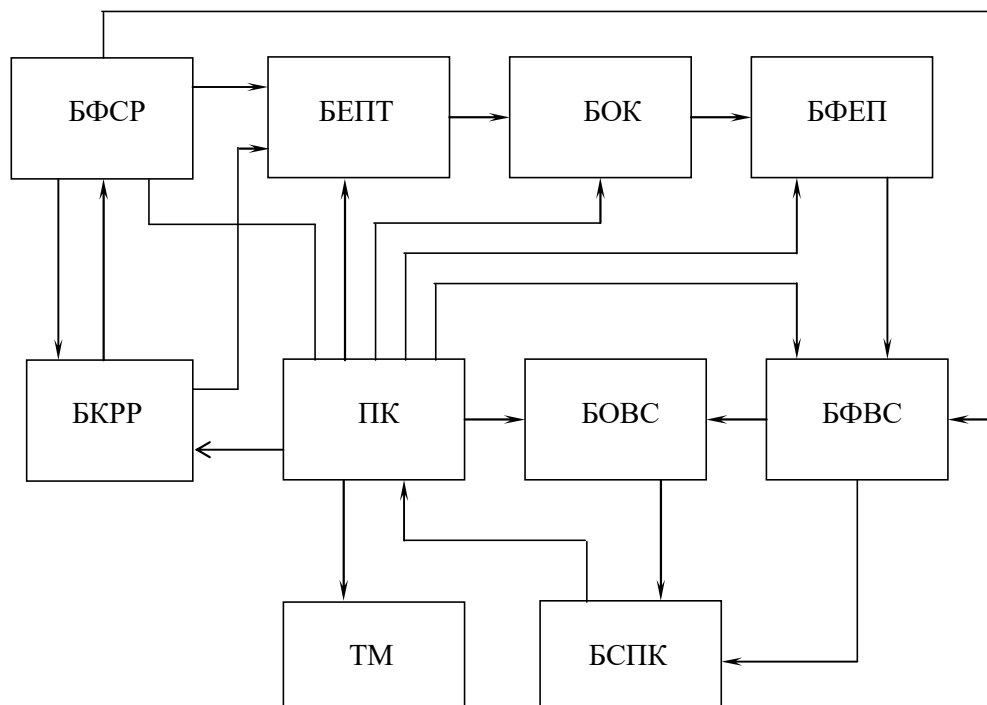


Рисунок 4.14 – Структурна схема ТСМ для дослідження МО

Однак, такий ТСМ непридатний до використання при дослідженні МО в процесі їх надшвидкого охолодження.

В розробленому варіанті побудови структурної схеми ТСОМ на ЕПТ надвисокої роздільної здатності до неї додатково входять: блок досліджуваного об'єкта БДО, блок керування охолодженням БКО, блок охолодження БО, блок керування лазером БКЛ, блок лазера БЛ та блок порівняння БП (рис. 4.15).

У результаті введення в структурну схему ТСМ нових елементів та зв'язків між ними забезпечується розширення його функціональних можливостей при дослідженні МО у процесі їх надшвидкого охолодження. В результаті до наведеної загальної структурної схеми ТСМ входять: блок керування режимами роботи БКРР, блок формування сканувального растра БФСР, блок сканувальної електронно-променевої трубки БЕПТ, блок оптичного каналу БОК, блок досліджуваного об'єкта БДО, блок фотоелектронного помножувача БФЕП, блок формування відеосигналу БФВС, блок оброблення відеосигналу БОВС, телевізійний монітор ТМ, блок керування лазером БКЛ, блок лазера БЛ [109 – 111], блок керування охолодженням БКО, блок охолодження БО, блок порівняння БП [49, 62].

Мікроскоп працює так. Блок керування режимами роботи БКРР на першому виході формує сигнали, які визначають розмір та роздільну здатність сканувального растра на екрані ЕПТ, на другому виході – сигнали, які визначають яскравість свічення сканувального растра на екрані ЕПТ, на третьому виході – сигнал, який визначає режим роботи блока керування лазером БКЛ (імпульсний режим зміни тривалості свічення лазера чи плавна зміна інтенсивності свічення лазера), на четвертому виході – сигнал, який визначає максимальну температуру охолодження досліджуваного об'єкта ДО, на п'ятому виході – сигнал, який визначає режим роботи блока керування охолодженням БКО (максимальну температуру охолодження та закон зміни температури – лінійний чи нелінійний).

Блок формування сканувального растра БФСР на першому виході формує аналогові сигнали рядкової та кадрової розгортки сканувального растра, часові параметри та амплітуда яких відповідають сигналам керування, які надходять з блока керування режимами роботи БКРР. На другому виході блоку формування сканувального растра БФСР формуються сигнали рядкової та кадрової синхронізації, а також сигнали рядкового та кадрового гасіння, які подаються на другий вхід телевізійного монітора ТМ, де використовуються для формування растра ТМ відповідно до формування сканувального растра, а

також на другий вхід блока формування відеосигналу БФВС, де використовуються для формування повного відеосигналу нормованої амплітуди.

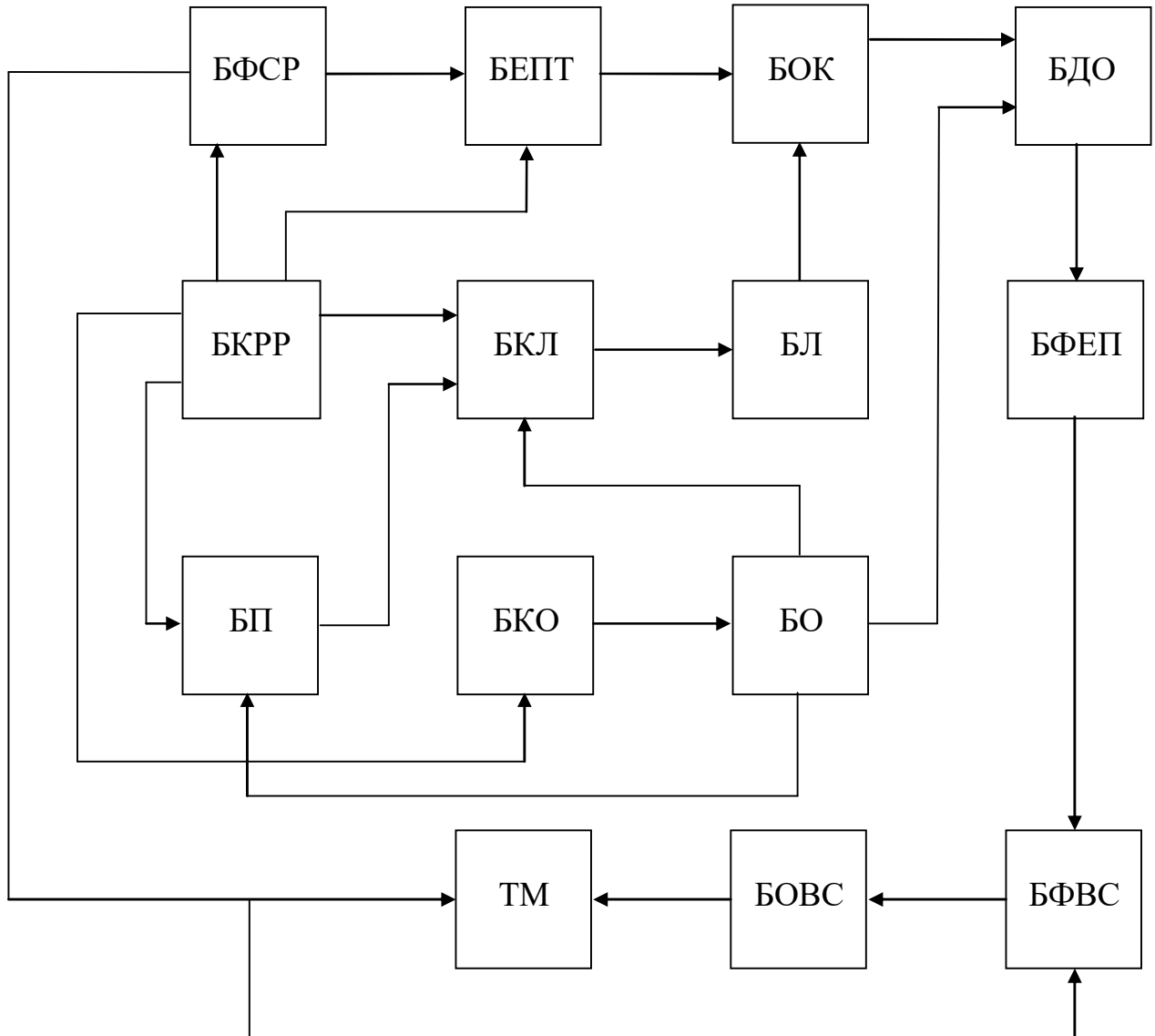


Рисунок 4.15 – ТСМ для дослідження МО в процесі їх надшвидкого охолодження

Блок сканувальної електронно-променевої трубки БЕПТ забезпечує всі режими роботи застосовуваної трубки, а також – формування струмів відхилення сканувального променя світлого растра відповідно до сигналів, які надходять з блока формування сканувального растра БФСР та блока керування режимами роботи БКРР.

Світловий потік з екрана сканувальної ЕПТ подається на перший вхід блока оптичного каналу БОК і проектується на досліджуваний об'єкт ДО, суміщений з блоком охолодження БО, який забезпечує охолодження досліджуваного об'єкта ДО до напередзаданої температури. На другий вхід блока оптичного каналу БОК надходить світловий потік з блока лазера БЛ, який підсвічує вибраний фрагмент досліджуваного об'єкта ДО. Режим роботи блоку лазера БЛ вибирається за допомогою блока керування лазером БКЛ так, щоб потужність його випромінювання забезпечувала температуру вибраного фрагмента рівною початковій температурі охолодження всього МО незалежно від температури його подальшого охолодження, яка визначається блоком охолодження БО.

Світловий потік, який відбився від досліджуваного об'єкта ДО, подається на блок фотоелектронного помножувача БФЕП, який перетворює світловий сигнал в електричний. Блок формування відеосигналу БФВС підсилює електричний сигнал до нормованої величини та замішує в нього сигнали кадрової та рядкової синхронізації, сигнали кадрового та рядкового гасіння відповідно до сигналу, який надходить на його другий вхід. Блок обробки відеосигналу БОВС підсилює повний відеосигнал до величини, необхідної для роботи телевізійного монітора ТМ.

На екрані телевізійного монітора ТМ формується зображення досліджуваного об'єкта ДО в процесі його охолодження. Блок керування охолодженням БКО формує керуючі сигнали відповідно з сигналом, який надходить з блока керування режимами роботи БКРР і подає їх на блок охолодження БО, який перетворює ці сигнали у відповідну зміну температури досліджуваного об'єкта ДО. На другому виході блока охолодження БО формується сигнал відповідно з його температурою, який надходить на перший вхід блок керування лазером БКЛ і змінює його вихідний сигнал так, щоб температура вибраного фрагмента досліджуваного об'єкта ДО залишалася на початковому вибраному рівні.

Блок порівняння БП порівнює два сигнали – сигнал блока охолодження БО, який відповідає температурі блока охолодження БО та сигнал з четвертого виходу блока керування режимами роботи БКРР, який відповідає мінімальному значенню температури, до якої повинен охолодитися досліджуваний об'єкт ДО. Після досягнення блоком охолодження БО заданої температури охолодження блок порівняння БП формує на своєму виході сигнал, який надходить на третій вхід блока керування лазером БКЛ і вимикає його. В результаті цього температура фрагмента ДО різко знижується від її початкового значення до температури блока охолодження БО зі швидкістю, яка обумовлюється теплотехнічними параметрами ДО, тобто відбувається надшвидке охолодження фрагмента досліджуваного об'єкта ДО від початкової температури до напередзаданої низької температури. Процес надшвидкого охолодження фрагмента досліджуваного об'єкта ДО можна спостерігати на екрані телевізійного монітора ТМ. Отже, розроблений ТСМ дозволить розширити його функціональні можливості при дослідженні МО в процесі їх надшвидкого охолодження.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено та проведено аналіз основних принципів формування зображення досліджуваного мікрооб'єкта в умовних кольорах при появі вторинної фотолюмінесценції. Розроблено структурну схему блока оптичного каналу телевізійного мікроскопа з відтворенням вторинної фотолюмінесценції досліджуваного мікрооб'єкта в умовних кольорах, а також побудовано структурну блок-схему його алгоритмічно-програмного забезпечення.

2. Розроблено структурну схему телевізійного сканувального мікроскопа для відстеження положення центра динамічного мікрооб'єкта, що забезпечує утримання зображення досліджуваного динамічного мікрооб'єкта в межах поля зору мікроскопа протягом всього часу дослідження. (Патент України № 75990)

3. Розроблено структурну схему телевізійного сканувального мікроскопа для визначення прискорення руху досліджуваних мікрооб'єктів, які рухаються нерівномірно та з довільною траєкторією руху. (Патент України № 75989)

4. Розроблено структурну схему телевізійного сканувального мікроскопа, яка забезпечує розширення функціональних можливостей його роботи внаслідок дослідження мікрооб'єктів в процесі їх надшвидкого охолодження в галузях кріомедицини та кріобіології. В основу роботи мікроскопа покладено принцип місцевого підігріву фрагмента досліджуваного об'єкта за допомогою керованого лазерного з керованим охолодженням всього об'єкта та різким виключенням режиму підігріву, що забезпечує можливість спостереження надшвидкого охолодження фрагмента досліджуваного об'єкта. (Патент України № 103133)

5. Розроблено структурну схему телевізійного сканувального мікроскопа для дослідження біологічних та медичних мікрооб'єктів з малим контрастом, який дозволяє суттєво покращити відношення сигнал/шум вихідного сигналу внаслідок зменшення впливу шумів люмінофора. (Патент України № 103134)

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання, яке полягає у покращенні технічних параметрів телевізійного сканувального мікроскопа, що дозволяє поліпшити якість формованого зображення досліджуваного об'єкта, збільшити швидкодію формування його зображення та розширити функціональні можливості мікроскопа внаслідок використання в ньому для освітлення досліджуваного об'єкта в ультрафіолетовому діапазоні спеціалізованої електронно-променевої трубки високої роздільної здатності.

Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи:

1. Сканувальний телевізійний мікроскоп на базі електронно-променевої трубки високої роздільної здатності з ультрафіолетовим свіченням екрана дозволить проводити дослідження біологічних об'єктів у реальному масштабі часу при дуже малій потужності опромінювання, що відкриває широкі перспективи його використання порівняно з лазерними мікроскопами, які мають значну потужність опромінювання об'єкта, і електронними, які дозволяють проводити дослідження лише після попередньої обробки та у вакуумі, що унеможлиблює їх застосування при дослідженні живих об'єктів. Встановлено, що доцільнішим є освітлення досліджуваних об'єктів у діапазоні довжин хвиль 320 – 400 нм. Найбільш доцільним слід вважати використання такого сканувального мікроскопа, який може одночасно забезпечити реалізацію двох режимів роботи: телевізійного та малокадрового з малим або змінним кроком сканування.

2. Досліджено граничну швидкість переміщення сканувального елемента з точки зору збільшення його розмірів. Встановлено, що при використанні розгортки із збільшеною до 160 Гц частотою полів, швидкість сканування зростає більше, ніж у 3 рази, а апертура сканувальної плями тоді збільшиться в 2,5 рази, порівняно з апертурою при телевізійному розкладі. Для запобігання цьому сканувати необхідно в телевізійному чи малокадровому режимі, а для забезпечення потрібної частоти оновлення зображення на моніторі –

застосовувати перетворювач параметрів розкладу зображення. Встановлено, що тривалість післясвічення люмінофора використовуваної трубки не повинна перевищувати 30 нс при максимальній швидкості сканування.

3. Визначено глибину різкості зображення досліджуваного мікрооб'єкта в телевізійному сканувальному мікроскопі. Досліджено вплив неточності наведення на різкість об'єктива на розфокусування зображення. Наведено графіки залежності необхідного діаметра сканувального елемента від коефіцієнта зміни розміру растра при різних коефіцієнтах збільшення мікроскопа. Розглянуто вплив неточності наведення об'єктива на різкість на розфокусування елемента досліджуваного об'єкта на екрані монітора. Показано, що з використанням ЕПТ типу 4ЛК7Т максимальний коефіцієнт зміни розміру растра можна отримати при зменшенні розміру растра в 4 рази без втрат різкості зображення.

4. Запропоновано покращити відношення сигнал/шум за рахунок використання усереднення дробового шуму при сумуванні сигналів від багатьох ФЕП, кожен з яких перетворює в сигнал свою частку світлового потоку, що несе інформацію про об'єкт. Проведено порівняльний аналіз застосування фотоелектронного помножувача та вакуумного фотоелемента з застосуванням підсилювача. Показано, що для сигналу зі 100-відсотковою модуляцією за допомогою фотоелектронного помножувача можна виявити сигнал в 1600 разів слабший, ніж за допомогою вакуумного фотоелемента з використанням підсилювача.

5. Розроблено структурну схему сканувального телевізійного мікроскопа, який забезпечує метод масштабування зображення досліджуваного об'єкта при збереженні роздільної здатності формованого зображення. Масштабування зображення здійснюється зміною розмірів сканувального растра цифровим або аналоговим способом. При застосування сканувальної електронно-променевої трубки з роздільною здатністю формованого растра 4000×4000 елементів на екрані телевізійного монітора з роздільною здатністю

575 елементів можна отримати збільшення зображення фрагмента досліджуваного об'єкта у 7 разів без погіршення якості зображення.

6. Розроблено структурні схеми сканувального телевізійного оптичного мікроскопа, які забезпечують:

- відслідковування положення центра динамічного мікрооб'єкта, що забезпечує утримання зображення мікрооб'єкта в центральній частині екрана монітора (патент України № 75990);

- визначення прискорення руху динамічних мікрооб'єктів, які рухаються нерівномірно та з довільною траєкторією руху (патент України № 75989);

- розширення функціональних можливостей його роботи за рахунок дослідження мікрооб'єктів у процесі їх надшвидкого охолодження в галузях кріомедицини та кріобіології. В основу роботи мікроскопа покладено принцип локального підігріву фрагмента досліджуваного об'єкта за допомогою керованого лазера з керованим охолодженням всього об'єкта та різким виключенням підігріву, що забезпечує можливість спостереження надшвидкого охолодження фрагмента досліджуваного об'єкта (патент України № 103133);

- дослідження біологічних та медичних мікрооб'єктів з малим контрастом, який дозволяє суттєво покращити відношення сигнал/шум вихідного сигналу за рахунок зменшення впливу шумів люмінофора (патент України № 103134).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авдеев В.П., Об устойчивости выходных усилителей генераторов электромагнитной развертки с отрицательной обратной связью по току нагрузки / В.П. Авдеев, В.Л. Ивлев // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. – 1987. – Вып.3. – С 92 – 96.

2. Аксененко М.Д. Приемники оптического излучения: Справочник. / М.Д. Аксененко, М.Л. Бараночников – М.: Радио и связь, 1987. – 396 с.

3. Баланюк Ю. Сканувальний телевізійний оптичний ультрафіолетовий мікроскоп для дослідження біологічних мікрооб'єктів / Ю. Баланюк, А. Педан, В. Шклярський // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2009. – № 645. – С. 243-252.

4. Баланюк Ю. Особливості визначення прискорення руху різних динамічних мікрооб'єктів телевізійним сканувальним оптичним мікроскопом / Ю. Баланюк, Ю. Матієшин, В. Василюк // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2012. – № 738. – С. 245-253.

5. Баланюк Ю. Точність визначення параметрів двох динамічних мікрооб'єктів за допомогою телевізійного сканувального оптичного мікроскопа / Ю. Баланюк, Ю. Матієшин, В. Шклярський, Б. Гудзь // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2013. – № 766. – С. 58-64.

6. Баланюк Ю. Забезпечення стійкості перетворювачів напруга-струм з комплексним навантаженням / Ю. Баланюк, В. Василюк, В. Шклярський // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2014. – № 796. – С. 43-48.

7. Баланюк Ю. Розширення функціональних можливостей телевізійного сканувального оптичного мікроскопа при дослідженні мікрооб'єктів / Ю. Баланюк, В. Шклярський, Ю. Матієшин, Р. Янкевич // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2016. – № 849. – С. 91 –

8. Баланюк Ю. Сканувальна мікроскопія / Ю. Баланюк // Computer Science & Engineering CSE-2009 : 3-rd Int. Conf. of young scientists, 14-16 May 2009 : Proceedings. – Lviv (Ukraine), 2009. – P. 289-292.

9. Баланюк Ю.В. Сканувальний телевізійний оптичний мікроскоп високої роздільної здатності / Ю.В. Баланюк, Ю.М. Матієшин, І.Н. Прудіус, В.І. Шклярський, А.Д. Педан, В.Я. Василюк, Б.В. Гудзь // Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку МРФ-2011 : IV міжнар. радіоелектронний форум, 18-21 жовтня 2011 р. : матеріали. – Харків (Україна), 2011. – С. 16-19.

10. Баланюк Ю.В. Сканувальний стереотелевізійний оптичний мікроскоп для дослідження мікрооб'єктів / Ю.В. Баланюк, В.І. Шклярський, Р.З. Матвіїв, А.В. Регуш - 2016 IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo'2016/UkrMiCo'2016) - 11–15 вересня 2016 р. м. Київ, Україна. . Збірник матеріалів науково-технічної конференції – С.184 – 191.

11. Бейкер А. Фотоелектронная спектроскопия; пер. с англ. / А. Бейкер, Д. Беттеридж. - М.: Мир, 1975. – 320 с.

12. Берман В.Р. Генераторы магнитной развертки электронно-лучевых индикаторов / В.Р. Берман, В.Т. Фролкин. – М. : Советское радио, 1976. – 320 с.

13. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью / Г. Боде – М.: изд-во иностранной литературы, 1948. – 672 с.

14. Бриллиантов Д.П. Экономичные генераторы телевизионной развертки: проектирование и расчет / Д.П. Бриллиантов – М. : Радио и связь, 1982. – 272 с.

15. Быков Р.Е. Анализ и обработка цветных и объемных изображений / Р.Е. Быков, С.Б. Гуревич – М. : Радио и связь, 1984. – 248 с.

16. Гдалин В.С. Измерение параметров телевизионных передающих и приемных трубок / В.С. Гдалин – М. : Советское радио, 1978. – 380 с.

17. Гинзбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях / С.Г. Гинзбург – М. : Высшая школа, 1967 – 386 с.

18. Гнатек Ю.Р. Справочник по цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователям / Ю.Р. Гнатек ; пер. с англ. ; под ред. Ю.А. Рожина. – М. : Радио и связь, 1982. – 552 с.

19. Горелов А.А. О переходных процессах дискретного отклонения светового пятна высокоточного телевизионного датчика / А.А. Горелов, Е.К. Овчинников // Вопросы радиоэлектроники. – М. – 1970. – Вып. 3 : Техника телевидения. – С. 53–59.

20. Грицьків З.Д. Визначення швидкості мікрооб'єкта телевізійним оптичним сканувальним мікроскопом в однорядковому режимі / З.Д. Грицьків, Ю.М. Матієшин // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – Харків, 2006. – № 4/2 (22). – С. 27–32.

21. Грицьків З. Питання створення кольорового телевізійного скануючого оптичного мікроскопа / З. Грицьків, А. Педан // Вісн. держ. універс. “Львівська політехніка”. – Л., 2000. – № 387. – С. 365-369.

22. Грицкив З.Д. Исследование возможности термостатирования блоков сканирующей аппаратуры для прецизионных ЭЛТ / З.Д. Грицкив, М.И. Калыта. – Львов, 1987. – 13 с. – Деп. в УКРНИИНТИ 20.06.87, № 1709–Ук–87.

23. Грицьків З. Визначення яскравості ЕПТ скануючого оптичного мікроскопа з урахуванням шумів / З. Грицьків, В. Шклярський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2002. - №428. – С. 54–58.

24. Грицьків З.Д. Вибір основних параметрів скануючого телевізійного стереомікроскопа / З.Д. Грицьків, Г.О. Туркінов, В.І. Шклярський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2002. - №443. – С. 150 – 159

25. Грицьків З.Д., Педан А.Д. Порівняльний аналіз впливу дифракції на якість зображення у камерному та сканувальному телевізійних мікроскопах // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. Міжнародний науково-технічний журнал. -В. 2007. № 1 (9). - С. 26 -31.

26. Гугель Б.М. Люминофоры для электровакуумной промышленности / Б.М. Гугель— М.: Энергия, 1967. – 344 с.
27. Джакония В.Е. О пределах глубинного разрешения в стереотелевизионных системах / В.Е. Джакония, С.Э. Коганер // Техника кино и телевидения. – 1990. – №10. – С. 23–26.
28. Диалоговые устройства отображения информации на электронно-лучевых трубках; под ред. М.К. Сулима. – М.: Статистика, 1977. – 184 с.
29. Достал И. Операционные усилители / И. Достал . – М.: Мир, 1982. – 512 с.
30. Дюков В.Г. Растровая оптическая микроскопия / В.Г. Дюков, Ю.А. Кудеяров. – М. : Наука, 1992. – 208 с.
31. Жигарев А.А. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы / А.А. Жигарев. – М. : Высшая школа, 1972. – 540 с.
32. Зайдель А.Н. Спектроскопия вакуумного ультрафиолета / А.Н. Зайдель, Е.Я. Шрейдер. - М.: 1967. – 180 с.
33. Злочин И.Х. Многофункциональный комплекс для оптических исследований микрообъектов / И.Х. Злочин, В.Л. Канцырев, В.А. Кожевников [и др.] // Электронная промышленность. – 1988. – №1. – С. 59–60.
34. Калниболотский Ю.М. Проектирование электронных схем / Ю.М. Калниболотский, В.С. Рысин. – К. : Техніка, 1976. – 144 с.
35. Катаев С.И. О возможности повышения экономичности транзисторных телевизоров / С.И. Катаев, Д.П.Бриллиантов // Техника кино и телевидения. – 1969. – № 9. – С. 15–20.
36. Ковалев А.М. Широкополосное управление лучом ЭЛТ с электромагнитным отклонением / А.М. Ковалев, А.С. Токарев // Автометрия. – 1971. – №4. – С. 12-20.
37. Коробкин А.Г. Анализ устойчивости выходных усилителей генераторов электромагнитной развертки / А.Г. Коробкин, А.З. Модель // Техника средств связи. – 1979. – Вып. 2 : Техника телевидения. – С. 83–85.
38. Краткая медицинская энциклопедия. - 2-е изд. М.: Советская Энциклопедия, 1989. – 860 с.

39. Крейнгель Н.С. Шумовые параметры радиоприемных устройств / Н.С. Крейнгель. - Л.: Энергия, 1969. - 168 с.
40. Кривошеев М.И. Основы телевизионных измерений / М.И. Кривошеев – М. : Радио и связь, 1989. – 608 с.
41. Матієшин Ю. Вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта телевізійним оптичним сканувальним мікроскопом у кадровому режимі роботи / Юрій Матієшин, Володимир Шклярський // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Комп'ютерні системи та мережі. – 2007. – № 603. – С. 128-136.
42. Микроскопы / [Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков Н.И., Федин Л.А.]; под ред. Н.И. Полякова. – Л.: Машиностроение, 1969. – 502 с.
43. Миллер В.А. Приемные электроннолучевые трубки / В.А. Миллер, Л.А. Куракин. – М. : Энергия, 1971. – 360 с.
44. Орловский Е.Л. Теоретические основы электрической передачи изображений. Телевидение и фототелеграфия / Е.Л. Орловский, А.М. Халфин, Л.Д. Хазов, Г.Д. Заварин, Б.В. Круссер, Л.Н. Шелованов; под ред. А.В. Таранцова. - М.: Советское радио, 1962. - 728 с.
45. Пат. 30344 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00 . Скануючий оптичний мікроскоп / Гой В. М., Матієшин Ю.М., Педан А.Д., Шклярський В. І.; заявник та власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u2007 11480 ; заявл. 16.10.2007 ; опубл. 25.02.2008, Бюл. № 4.
46. Пат. 30341 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Скануючий оптичний мікроскоп / Матієшин Ю. М., Прудіус І. Н., Туркінов Г. О., Шклярський В. І.; заявник та власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u2007 11461 ; заявл. 16.10.2007 ; опубл. 25.02.2008, Бюл. № 4.
47. Пат. 75989 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп / Шклярський В. І., Матієшин Ю. М., Баланюк Ю. В., Василюк В. Я.; заявник та власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201205135 ; заявл. 25.04.2012 ; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24.

48. Пат. 75990 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп / Матієшин Ю. М., Шклярський В. І., Баланюк Ю. В., Василюк В. Я.; заявник та власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201205137 ; заявл. 25.04.2012 ; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24.

49. Пат. 103133 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Сканувальний телевізійний оптичний мікроскоп / Баланюк Ю. В., Матієшин Ю. М., Педан А. Д., Шклярський В. І.; заявник та власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201503699 ; заявл. 20.04.2015 ; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23.

50. Пат. 103134 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Сканувальний телевізійний оптичний мікроскоп / Баланюк Ю. В., Гудзь Б. В., Шклярський В. І.; заявник та власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201503700 ; заявл. 20.04.2015 ; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23.

51. Петров В.В. Качество кинопроекции / В.В. Петров – М. : Искусство, 1982. – 222 с.

52. Прудюс І.Н. Скануючий оптичний мікроскоп для клінічної лабораторної діагностики / І.Н. Прудюс., В.І. Шклярський, А.Д. Педан // Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку МРФ’2008: 3-й міжн. радіоелектр. форум 23 - 25 жовтня 2008: тези доповід. – Харків - Україна. – Т. 4. - С. 127-131.

53. Резисторы: справочник / Ю.Н. Андреев, А.И. Антонян, Д.М. Иванов и др. ; [авт.-упоряд. Четвертаков И.И.]. – М. : Энергоиздат, 1981. – 352 с.

54. Родин А.В. Ремонт мониторов / А.В. Родин, Н.А. Тюнин, М.А. Воронов. – М. : Салон, 1997. – 288 с.

55. Самойлова К.А. Действие ультрафиолетовой радиации на клетку / К.А. Самойлова. - Л.: Медицина, 1967. – 240 с.

56. Серегин В.С. Обратная связь в усилителях. М.: Радио и связь, 1983 – 96 с.

57. Справочник по радиоэлектронным устройствам / [под ред. Д.П. Линде]. – М. : Энергия, Т. 1. – 1978. – 440 с.
58. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. / Под ред. В.Х. Кривицкого. Т.2 – М.: Энергия, 1977. – 472 с.
59. Столяров К.П. Химический анализ в ультрафиолетовых лучах / К.П. Столяров. - М. - Л.: 1965. – 440 с.1.
60. Телевидение: учебн. для вузов / [В.И. Джакония, А.А. Гоголь, Н.А. Ерганджиев и др.] ; под ред. В.Е. Джаконии. [5-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Радио и связь, 1986. – 456 с.
61. Федин Л.А. Микрофотография / Л.А Федин, И.Я. Барский. – Л. Наука, 1971. – 220 с.
62. Шуаїбов О.К. Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці. Навчальний посібник // О.К. Шуаїбов, І.І. Опачко, І.Е. Качер, М.П. Чучман, - Ужгород. Ужгородський національний університет, фізичний та інженерно-фізичний факультети. 2009. - 238 с.
63. Шклярський В.І. Сканувальна телевізійна оптична мікроскопія: теорія та практика: монографія / В.І. Шклярський. – Л. : Видавництво Львівської політехніки. – 2010. – 456 с.
64. Шклярський В.І. Вибір режиму сканування в телевізійному оптичному відбивному мікроскопі / В.І. Шклярський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2005. – №508 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 131–134.
65. Шклярський В.І. Визначення швидкості руху мікрооб’єкта телевізійним оптичним сканувальним мікроскопом у двотактному режимі вимірювання / Ю.М. Матієшин, В.І. Шклярський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2007. – № 595 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 32–42.
66. Шклярський В.І. Двотактний режим визначення швидкості руху мікрооб’єкта у телевізійній сканувальній мікроскопії / Ю.М. Матієшин, В.І. Шклярський // Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікації РТ–2007 :

3-я міжнар. молод. конф., 16–21 квітня 2007 р. : тези доповід. – Севастополь, 2007. – С. 59.

67. Шклярський В.І. Динамічне накопичення сигналу в процесі його багатокadroвої обробки / В.І. Боженко, С.О. Воронов, П.О. Кондратов, С.О. Муравов, В.І. Шклярський // Електротехніка и связь. – 2009. – № 4–5 : Електроніка и нанотехнології. – Ч. 2. – С. 95–98.

68. Шклярський В.І. Перетворювач напруга-струм як засіб формування струму в комплексному навантаженні / В.Я. Василюк, В.І. Шклярський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2012. – № 738 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 48–56.

69. Шклярский В.И. Обеспечение устойчивости устройств позиционирования луча прецизионных ЭЛТ / В.И. Шклярский // Вестник Львовского политехнического института. Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств. – Львов: Вища школа. – 1983. - № 176. С. 153 – 156.

70. Шклярський В.І. Особливості сканування динамічних мікрооб'єктів різних розмірів та форми за допомогою телевізійного сканувального оптичного мікроскопа / В.І. Шклярський, Ю.М. Матієшин, В.Г. Сторож // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2011. – № 705 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 59-65.

71. Шклярський В.І. Особливості формування сканувального растра при дослідженні динамічних мікрооб'єктів / Г.О. Туркінов, В.І. Шклярський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2006. – № 557 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 35-42.

72. Шклярський Володимир. Оцінка впливу часу післясвічення люмінофора на роздільну здатність стереотелевізійного скануючого оптичного мікроскопа / Зенон Грицьків, Віталій Гой, Володимир Шклярський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2003. – №477 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 88–91.

73. Шклярський Володимир. Похибки сприйняття координат об'єкта у стереотелевізійному скануючому оптичному мікроскопі / Зенон Грицьків,

Анатолій Педан, Геннадій Туркінов, Володимир Шклярський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2003. – №477 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 150-157.

74. Шклярський В. Рядкова розгортка з лінійним зворотним ходом для пірокона / Г. Туркінов, В. Шклярський // Вісник державного університету “Львівська політехніка”. – 1996. – № 302 : Теорія і проектування напівпровідникових та радіоелектронних пристроїв. – С. 30–32.

75. Шклярський В.И. Сканирующий оптический микроскоп для биомедицины и нанотехнологий / А.Д. Педан, И.Н. Прудюс, В.И. Шклярский // Актуальные вопросы и организационно-правовые основы сотрудничества Украины и КНР в сфере высоких технологий : IV междунар. научн.-практ. конф., 2007 г. : тезисы докл. – К. : КиевЦНТЭИ. – 2007. – С. 167–170.

76. Шклярський В.И. Статические погрешности формирования тока в катушках отклонения устройств позиционирования луча ЭЛТ / В.И. Шклярський // Вестник Львовского политехнического института. – 1988. – № 226 : Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств. – С. 94–98.

77. Шклярський В.І. Сканувальний оптичний мікроскоп на базі електронно-променевої трубки для кріобіології та кріомедицини / А.Д. Педан, Б.І. Любинецька, В.І. Шклярський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. - 2010. - № 680 : Радіоелектроніка та телекомунікації. - С. 63-72.

78. Balanyuk Y. Scanning television optical microscope for diagnostics of microobjects in medicine / Y. Balanyuk, Y. Matiieshyn, I. Prudyus, V. Shkliarskyi, A. Pedan, V. Vasylyuk // Diagnostyka (Діагностика). – 2013. – Vol. 14, № 3. – P. 41-44.

79. Balanyuk Y. Interactive Operation of Scanning Television Optical Microscope / Y. Balanyuk, V. Shkliarskyi, V. Vasylyuk, B. Hudz // Computational Problems of Electrical Engineering – Lviv Polytechnic National University. – 2014. – Vol. 4, № 2. – P. 69-76.

80. Balanyuk Y. Error analysis of current formed by precision voltage-current converter loaded by inductance / Y. Balanyuk, V. Vasylyuk, V. Shkliarskyi // Measurement Automation Monitoring (MAM). – 2015. – Vol. 61, № 8. – P. 403-405.

81. Balanjuk Yuriy. Scanning Television Optical Microscope With Illumination of Microobject in a Ultra-Violet Range / Yuriy Balanjuk, Yuriy Matiieshyn, Anatoliy Pedan, Volodymyr Shkliarskyi // Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2012: XI intern. conf., February 21 – 24 2012 : proceed. of the conf. - Lviv-Slavske, Ukraine, 2012. - P 113.

82. Balanjuk Yu.. Uv illumination scanning optical microscope / Yu. Balanjuk // Electronic and Telecommunications Conference of Students and Young Scientific Workers SECON-2007: VIII intern. conf. 7 - 8 November 2007: proceed. of the intern. conf. – Warsaw-Poland. 2007. – P. 10.

83. Balanjuk Yuriy. Scanning optical microscope on base CRT with a ultraviolet luminescence of the screen / Yuriy Balanjuk, Anatoliy Pedan, Ivan Prudyus, Volodimir Shkljarskyi. // Modern Problem of Radio Engineering Telecommunications and Computers Science: Proceedings of the International Conference TCST'2008. Lviv-Slavske. Ukraine. Febryary 19 – 23. 2008. -P. 246-247.

84. Matiieshyn Y. M. Measurement of the microobject velocity in the microscope frame mode / Y. M. Matiieshyn, V. I. Shkliarskyi // Modern Problem of Radio Engineering Telecommunications and Computers Science: Proceedings of the International Conference TCST'2008. Lviv-Slavske. Ukraine. Febryary 19 – 23. 2008. -P. 239-241.

85. Balanjuk Y. V. Correcting of Non-uniformity of Brightness of the Image in a Scanning Microscope / Y. V. Balanjuk, V. M. Goj, G. O. Turkinov, V. I. Shkliarskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : X Int. Conf., 23-27 February 2010 : Proceedings. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2010. – P. 102.

86. Correcting of Non-uniformity of Brightness of the Image in a Scanning Microscope : (results of the X-th International Conference “Modern Problems of

Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010") [Electronic source] / Y. V. Balanjuk, V. M. Goj, G. O. Turkinov, V. I. Shkliarskyi. – Electron. dat. – Lviv : NU“LP”, 2010. – 3 p. 1 CD-ROM : color ; 12 cm. – (TCSET'2010). – System requirements: Pentium-266 (100 MHz); 32 Mb RAM; CD-ROM 4-x ; Windows 95/98/2000/NT/XP/Vista/7; Internet Explorer, Adobe Acrobat. – Title from the disc label.

87. Balanjuk Y. V. Scanning Television Optical Microscope for Research of Biological Microobjects / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, V. I. Shkliarskyi, B.I. Lubinecka, A. D. Pedan, I. N. Prudyus, G. O. Turkinov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : X Int. Conf., 23-27 February 2010 : Proceedings. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2010. – P. 18.

88. Scanning Television Optical Microscope for Research of Biological Microobjects : (results of the X-th International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010”) [Electronic source] / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, V. I. Shkliarskyi, B. I. Lubinecka, A. D. Pedan, I. N. Prudyus, G. O. Turkinov. – Electron. dat. – Lviv : NU“LP”, 2010. – 3 p. 1 CD-ROM : color ; 12 cm. – (TCSET'2010). – System requirements: Pentium-266 (100 MHz); 32 Mb RAM; CD-ROM 4-x ; Windows 95/98/2000/NT/XP/Vista/7; Internet Explorer, Adobe Acrobat. – Title from the disc label.

89. Balanjuk Y.V. Scanning Television Optical Microscope With Illumination of Microobject in a Ultra-Violet Range / Y.V. Balanjuk, Y.M. Matiieshyn, A.D. Pedan // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2012 : XI Int. Conf., 21-24 February 2012 : Proceedings. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2012. – P. 113.

90. Balanyuk Y. Scanning television optical microscope for diagnostics of microobjects in medicine / Y. Balanyuk, I. Prudyus, V. Shkliarskyi, Y. Matiieshyn, A. Pedan, V. Vasylyuk // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów DIAG'2013 : VIII Krajowa Konf., 3-7 June 2013 : Proceedings. – Ustroń (Poland), 2013. – P. 89.

91. Balanjuk Y. V. Methods of Correction of Distortions Luminous Raster Cathode Ray Tube / Y. V. Balanjuk, V. I. Shkliarskyi, B. I. Lubinecka, T. Smarkutskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2014 : XII Int. Conf., 25 February – 1 March 2014 : Proceedings. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2014. – P. 293-295.

92. Balanjuk Y. Definition of formation of errors current in inductive load precision voltage converter-current / Y. Balanyuk, V. Shkliarskyi, V. Vasylyuk // Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK'2014 : X Szkola-Konf., 27-30 Maja 2014 : Streszczenia referatów. – Waplewo (Polska), 2014. – P. 167.

93. Balanjuk Y. V. Algorithms of television scanning optical microscope in determining the parameters of dynamic microobjects / Y. V. Balanjuk, V.I. Shkliarskyi, Y. M. Matiieshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2016 : XIII Int. Conf., 23-26 February 2016 : Proceedings. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2016. – P. 321-325.

94. Grandi P. Schnelle Operationferstarker in der Praxis / P. Grandi // Elektron-J. – 1980. – 15. – № 3. – P. 29, 31, 32, 34.

95. Hrytskiv Z. A generalized view of the problem of EMC for cathode ray tubes / Z. Hrytskiv // Electromagnetic Compatibility: 13-th International Sympos., Febr. 16–18 1999 : proc. of the sympos. – Zurich (Switzerland). – 1999. – P. 23–26.

96. Hrytskiv Z.D. Single crystalline film screens for cathode-ray tubes: new life of television scanning optical microscopy / Z.D. Hrytskiv, Y.V/ Zorenko, V.I/ Gorbenko, A.D. Pedan, W.I. Shkliarskyi // Radiation measurements. 2007. V 4. - P. 933 – 936.

97. Problems of colour television scanning optical microscope development. Z. Hrytskiv, A. Pedan // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science TCSET'2000. : int. conf., february 14-19 2000 : Proceedings. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2000. – P. 204-205.

98. Young J.Z. Flying-spot microscope / J.Z. Young, F.A. Roberts // Nature, Feb. 10 1951. – P/ 231.

99. Lubinecka Bogdana. Luminescent scanning optical microscope with lowered doze irradiation of preparation / Bogdana Lubinecka, Anatoliy Pedan.//

Modern Problem of Radio Engineering Telecommunications and Computers Science: Proceedings of the International Conference TCST'2008. Lviv-Slavske. Ukraine. February 19 – 23. 2008. -P. 248-250.

100. Hrytskiv Z.D. Back to television scanning optical microscopy? / Z.D. Hrytskiv, A.D. Pedan, V.I. Shkliarskyi // Proceedings of the Biomedical Optics Technical Digest. USA. Florida. March 19-22. 2006. -P. 8.

101. Shkliarskyi Volodymyr. A Television System for Gap Visualization, Measurement and Adjustment / Zenon Hrytskiv, Anatoliy Pedan, Gennadiy Turkinov and Volodymyr Shkliarskyi // Modern Problem of Radioengineering Telecommunications and Computers Science TCSET'2006 : 8-th intern. conf., February 28–March 4 2006 : proceed. of conf. – Lviv–Slavske, Ukraine, 2006. – P. 333–335.

102. Vasylyuk Volodymyr. Raster Forming Block in Scanning Television Microscope / Volodymyr Vasylyuk, Vitaliy Goy, Volodymyr Shkliarskyi // Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010: X intern. conf., February 23 – 27 2010: Proceed. of the Conf. - Lviv-Slavske-Ukraine, 2010. - p. 67.

103. Shkliarskyi Volodymyr. Main Parametres Choice of Scanning Television Stereomicroscope / Zenon Hrytskiv, Gennadij Tyrkinov, Volodymyr Shkliarskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2002 : 6-th intern. conf., February 18 – 23 2002 : proceed. of the conf. – Lviv–Slavske, Ukraine, 2002. – P. 184.

104. Shkliarskyi Volodymyr. Raster Forming Block in Scanning Television Microscope / Volodymyr Vasylyuk, Vitaliy Goy, Volodymyr Shkliarskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010: X-th intern. conf., February 23–27 2010: proceed. of the conf. – Lviv–Slavske, Ukraine, 2010. – 3 p.

105. Shkliarskyi Volodumur. Scanning Mode for Television Optical Reflective Microscope / Volodumur Shkliarskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2004 : 7-th intern.

conf., February 24 – 28 2004 : proceed. of the conf. – Lviv–Slavske, Ukraine, 2004. – P. 474–475.

106. Shkliarskyi Volodymyr. Scanning Television Optical Microscope for Diological Microobjects Research / Ivan Prudyus, Anatoliy Pedan, Volodymyr Shkliarskyi // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2012. – Lviv Polytechnic National University. – №2 (1). – 119–128

107. Special Features of Functioning of the Optical Channel of a Scanning Optical Microscope for Cryobiology and Cryomedicine : (results of the X-th International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET’2010”) [Electronic source] / Bogdana Lubinecka, Anatoliy Pedan. – Electron. dat. – Lviv : NU“LP”, 2010. – 1 CD-ROM : color ; 12 cm. – (TCSET’2010). – System requirements: Pentium–266 ; 32 Mb RAM ; CD-ROM Windows 98/2000/NT/XP. – Title from the disc label 74.

108. Takabashi S., Tanaka S. Design and Construction Feedforward Error Correction Amplifier // S.Audio Eng. Sog. – 1981. – 29./ – № 1-2. Н. 31 – 37.

109. Лазерная обработка порошковых материалов. Режим доступа : <http://lnsm.school.udsu.ru/investigations/laser>

110. Взаимодействие лазерного излучения с биологическими системами. Режим доступа: <http://lekmed.ru/info/arhivy/lazernaya-diagnostika-v-biologii-i-medicine-9.html>

111. Применение лазера и поляризационной микроскопии в разрезе контроля качества в лаборатории ЭКО. Режим доступа: http://delrus.com/templates/pr4_samara.pdf

112. Официальный дистрибьютор - Hamamatsu Photonics. Режим доступа: <http://sales.hamamatsu.com./en/products/system-division/bio-imaging-instruments/eu>.

113. WasteWater Operator Training Presenter Ryan Hennessy. Режим доступа: vetfac.nsau.edu.ru/new/uchebnic/microbiology/stu/bacter/l_microscop.htm.

114. Microscope imaging systems - Find out more. Режим доступа: http://www.microscopy.org.ua/index.php?option=com_content&task=view&id.

Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Заступник директора

ТОВ “МЕЛТА”

О.М.Семирга

7 травня_2017 р.



АКТ

про впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи Баланюка Юрія Вікторовича

“Методи удосконалення телевізійного сканувального мікроскопа з освітленням досліджуваних мікрооб’єктів в ультрафіолетовому діапазоні”

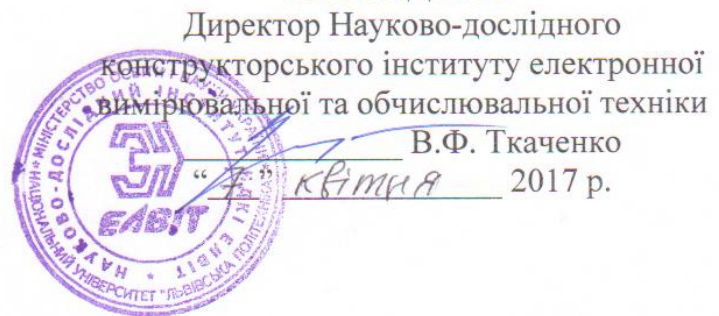
Цей акт підтверджує, що в науково-виробничому підприємстві ТОВ “МЕЛТА” використані результати кандидатської дисертації Баланюка Ю.В. “Методи удосконалення телевізійного сканувального мікроскопа з освітленням досліджуваних мікрооб’єктів в ультрафіолетовому діапазоні” при удосконаленні прецизійної системи візуалізації, вимірювання та регулювання зазору між зрізом ливарного сопла і поверхнею гартувального диску для “Установки отримання металевих стрічок” (УОМС)”, а саме:

- метод формування сканувальних растрів змінних розмірів та змінної роздільної здатності на екрані сканувальної електронно-променевої трубки;
- метод корекції амплітудно-частотної характеристики перетворювача напруга-струм для забезпечення стійкості його роботи в широкому динамічному діапазоні;
- метод розрахунок необхідної яскравості свічення сканувальної електронно-променевої трубки для забезпечення заданого відношенні сигнал/шум на виході перетворювача світло-сигнал.

Науковий консультант
д.ф.-м.н.

В.К. Носенко

“ЗАТВЕРДЖУЮ”



В.Ф. Ткаченко

квітня 2017 р.

АКТ

**про впровадження
результатів кандидатської дисертаційної роботи
Баланюка Юрія Вікторовича**

“Методи удосконалення телевізійного сканувального мікроскопа з освітленням досліджуваних мікрооб’єктів в ультрафіолетовому діапазоні”

Комісія у складі голови – головного інженера НДКІ ЕЛВІТ Крася Д.П., старшого наукового співробітника НДКІ ЕЛВІТ Козевича О.П., старшого наукового співробітника НДКІ ЕЛВІТ Кондратова П.О. склали цей акт про те, що результати кандидатської дисертації Баланюка Ю.В. „Методи удосконалення телевізійного сканувального мікроскопа з освітленням досліджуваних мікрооб’єктів в ультрафіолетовому діапазоні” використано в НДР ДБ-ТТХ “Розробка засад застосування та обробки сигналів перспективних сенсорів для космічних апаратів і для наземних камер”, а саме:

- метод формування сканувального растра різних розмірів та різної роздільної здатності;
- метод корекції амплітудно-частотної характеристики формувача сигналу відхилення променя тепловізійної камери;
- метод розрахунку необхідної чутливості піровідикона тепловізійної камери з метою отримання зображення досліджуваного об’єкта при заданому відношенні сигнал/шум.

головний інженер НДКІ ЕЛВІТ
к.т.н., с.н.с.

Д.П. Крась

ст. наук. співр. НДКІ ЕЛВІТ
к.т.н., с.н.с.

О.П. Козевич

ст. наук. співр. НДКІ ЕЛВІТ
к.т.н., с.н.с.

П.О. Кондратов



АКТ

**про впровадження у навчальний процес
Національного університету "Львівська політехніка"
результатів кандидатської дисертаційної роботи
Баланюка Юрія Вікторовича**

**"Методи удосконалення телевізійного сканувального мікроскопа з освітленням
досліджуваних мікрооб'єктів в ультрафіолетовому діапазоні"**

Даний акт складено про те, що у Національному університеті "Львівська політехніка" на кафедрі "Радіоелектронні пристрої та системи" в лекційних курсах та практичних заняттях для студентів спеціальності 172 "Телекомунікації та радіотехніка" йшли застосування наступні результати дисертаційної роботи Баланюка Ю.В. "Методи удосконалення телевізійного сканувального мікроскопа з освітленням досліджуваних мікрооб'єктів в ультрафіолетовому діапазоні":

1) у курсі "Основи телебачення" (для базового напрямку 050901 "Радіотехніка") впроваджено вивчення структурної схеми сканувального телевізійного мікроскопа на основі електронно-променевих трубок високої роздільної здатності;

2) у курсі "Телевізійні системи та пристрої відображення інформації" (для магістрів спеціальності 172 "Телекомунікації та радіотехніка") впроваджено вивчення методів будови сканувальних телевізійних мікроскопів для дослідження динамічних мікрооб'єктів різних галузях народного господарства;

3) у курсі "Схемотехніка прецизійної радіоелектронної апаратури" (для спеціалістів спеціальності 172 "Телекомунікації та радіотехніка") впроваджено вивчення методу регулювання амплітудно-частотної характеристики перетворювача напруга-струм, побудованого за схемою з використанням глибокого зворотного зв'язку за струмом.

Ефект від використання названих результатів полягає в ознайомленні майбутніх спеціалістів з принципами побудови сучасних прикладних телевізійних систем на основі ІТ високої роздільної здатності для дослідження мікрооб'єктів.

Директор інституту телекомунікацій,
радіоелектроніки та електронної техніки
д.т.н., проф.
Голова науково-методичної комісії ІТРЕ
д.ф.-м.н., проф.
Заст. зав. каф. РЕПС
д.т.н., доц.

І.Н. Прудіус

С.Б. Убізький

В.І. Оборжицький



АКТ

**про впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи
Баланюка Юрія Вікторовича
“Методи удосконалення телевізійного сканувального мікроскопа з освітленням досліджуваних
мікрооб’єктів в ультрафіолетовому діапазоні”**

Комісія у складі голови – заст. начальника НДЧ Національного університету „Львівська політехніка” доц. Жук Л.В. та членів: заступника зав. каф. РЕПС, доц. Оборжицького В.І., зав. відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень Лазько Г.В., заст. зав. планово-фінансового відділу Чулой Т.М. склали цей акт про те, що результати кандидатської дисертації Баланюка Ю.В. „Методи удосконалення телевізійного сканувального мікроскопа з освітленням досліджуваних мікрооб’єктів в ультрафіолетовому діапазоні” використано в таких роботах, виконаних на кафедрі РЕПС з безпосередньою участю автора:

НДР ДБ-Флюор “Сканувальна телевізійно-оптична ультрафіолетова мікроскопія для дослідження біологічних мікрооб’єктів” (№ 0107U000832) – розроблено вимоги до електронно-променевої трубки з ультрафіолетовим світлінням екрана, придатної до використання в телевізійному сканувальному мікроскопі. Удосконалено метод визначення необхідної яскравості світління електронно-променевої трубки з метою отримання заданого відношення сигнал/шум на виході формувача відеосигналу.

НДР ДБ-Мікроскопія “Сканувальна телевізійно-оптична мікроскопія для кріобіології та кріомедицини” (№0109U001154) – досліджено і удосконалено метод визначення граничної швидкості переміщення світної плями на екрані електронно-променевої трубки високої роздільної здатності в телевізійному сканувальному мікроскопі.

НДР ДБ-Люмінофор “Розроблення нанолюмінесцентного скануючого оптичного мікроскопа для дослідження функціонування мікроорганізмів під впливом низьких температур” (№0111U001227) – розроблено метод компенсації шумів люмінофора використовуваної електронно-променевої трубки через виділення світлового потоку від світного растра, формування електричного сигналу від цього потоку та ділення сигналів від досліджуваного об’єкта на сигнал від світного растра, що дозволяє покращити відношення сигнал/шум на виході формувача відеосигналу. Розроблено структурну схему та алгоритм роботи телевізійного сканувального мікроскопа, придатного для вимірювання швидкості руху та прискорення досліджуваного об’єкта.

НДР ДБ-КРІОБ “Розроблення люмінесцентного скануючого оптичного мікроскопа з керованим швидким заморожуванням мікрооб’єкта для досліджень в кріобіології та нанотехнологіях” (№0113U001395) – розроблено метод визначення динамічних параметрів досліджуваного об’єкта при застосуванні сканувальних растрів різних розмірів (повноформатний растр, мінірастр), що дозволяє скоротити тривалість вимірювань внаслідок зменшення часу формування мінірастра і розширити діапазон вимірюваних параметрів досліджуваного об’єкта при збереженні точності вимірювання. Розроблено структурну схему та алгоритм роботи телевізійного сканувального мікроскопа, придатного до використання в кріобіології та кріомедицині для спостереження за надшвидким охолодженням фрагмента досліджуваного об’єкта.

Голова комісії
заст. начальника НДЧ, доц.

Л.В. Жук

Члени комісії

Заст.зав.каф РЕПС, доц.

В.І. Оборжицький

Зав.відділу НОСНД

Г.В. Лазько

Заст.зав. ПФВ

Т.М. Чулой

Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Баланюк Ю. Сканувальний телевізійний оптичний ультрафіолетовий мікроскоп для дослідження біологічних мікрооб'єктів / Юрій Баланюк, Анатолій Педан, Володимир Шклярський // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. – 2009. – № 645. – С. 243–252. (Google Scholar).

2. Баланюк Ю. Особливості визначення прискорення руху різних динамічних мікрооб'єктів телевізійним сканувальним оптичним мікроскопом / Юрій Баланюк, Юрій Матієшин, Володимир Василюк // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. – 2012. – № 738. – С. 245–253. (Google Scholar).

3. Balanyuk Y. Scanning television optical microscope for diagnostics of microobjects in medicine / Y. Balanyuk, Y. Matiieshyn, I. Prudyus, V. Shkliarskyi, A. Pedan, V. Vasylyuk // Diagnostyka (Діагностика). – 2013. – Vol. 14, № 3. – P. 41–44. (Scopus, Google Scholar).

4. Баланюк Ю. Точність визначення параметрів двох динамічних мікрооб'єктів за допомогою телевізійного сканувального оптичного мікроскопа / Юрій Баланюк, Юрій Матієшин, Володимир Шклярський, Борис Гудзь // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. – 2013. – № 766. – С. 58–64. (Google Scholar).

5. Баланюк Ю. Забезпечення стійкості перетворювачів напруга-струм з комплексним навантаженням / Юрій Баланюк, Володимир Василюк, Володимир Шклярський // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. – 2014. – № 796. – С. 43–48. (Index Copernicus, Google Scholar).

6. Balanyuk Y. Interactive Operation of Scanning Television Optical Microscope / Y. Balanyuk, V. Shkliarskyi, V. Vasylyuk, B. Hudz // *Computational Problems of Electrical Engineering*. – Lviv Polytechnic National University. – 2014. – Vol. 4, № 2. – P. 69–76. (Google Scholar, Ulrich's Web, Index Copernicus).

7. Balanyuk Y. Error analysis of current formed by precision voltage-current converter loaded by inductance / Y. Balanyuk, V. Vasylyuk, V. Shkliarskyi // *Measurement Automation Monitoring (MAM)*. – 2015. – Vol. 61, № 8. – P. 403-405. (IEE Inspec, Ulrich's Web, Index Copernicus, Google Scholar, Baztech, Arianta, Lista czasopism punktowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego).

8. Баланюк Ю. Розширення функціональних можливостей телевізійного сканувального оптичного мікроскопа при дослідженні мікрооб'єктів / Юрій Баланюк, Володимир Шклярський, Юрій Матієшин, Роман Янкевич // *Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"*. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. – 2016. – № 849. – С. 91–98. (Index Copernicus, Google Scholar).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Balanjuk Yu. Uv illumination scanning optical microscope / Yu. Balanjuk // *Electronic and Telecommunications Conference of Students and Young Scientific Workers SECON-2007 : proceed. of the VIII intern. conf., 7-8 November 2007, Warsaw, Poland*. – Warsaw, 2007. – P. 10.

10. Balanjuk Yuriy. Scanning optical microscope on base CRT with a ultraviolet luminescence of the screen / Yuriy Balanjuk, Anatoliy Pedan, Ivan Prudyus, Volodimir Shkljarskyi // *Modern Problem of Radio Engineering Telecommunications and Computers Science: proceedings of the International Conference TCST'2008, 19-23 February 2008, Lviv-Slavske, Ukraine* / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2008. – P. 246–247. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar).

11. Баланюк Ю. Сканувальна мікроскопія / Ю. Баланюк // *Computer Science & Engineering CSE-2009 : proceed. 3-rd Int. Conf. of young scientists, 14 – 16 May 2009 Lviv, Ukraine*. – Lviv, 2009. – P. 289–292. (Google Scholar).

12. Balanjuk Y. V. Correcting of Non-uniformity of Brightness of the Image in a Scanning Microscope / Y. V. Balanjuk, V. M. Goj, G. O. Turkinov, V. I. Shkliarskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : proceedings of X Int. Conf., 23-27 February 2010, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2010. – P. 102. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar).

13. Balanjuk Y. V. Correcting of Non-uniformity of Brightness of the Image in a Scanning Microscope [Electronic source] /Y. V. Balanjuk, V. M. Goj, G. O. Turkinov, V.I. Shkliarskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : results of the X-th International Conference, 23-27 February 2010, Lviv-Slavske, Ukraine, 2010. – Electron. dat. (32 Mb). – Lviv: NU“LP”, 2010. – 1 electron. opt. disc (CD-ROM). – Title from the disc label.

14. Balanjuk Y. V. Scanning Television Optical Microscope for Research of Biological Microobjects / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, V. I. Shkliarskyi, B. I. Lubinecka, A. D. Pedan, I. N. Prudyus, G. O. Turkinov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : proceedings of X Int. Conf., 23-27 February 2010, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2010. – P. 18. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar).

15. Scanning Television Optical Microscope for Research of Biological Microobjects [Electronic source] / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, V. I. Shkliarskyi, B. I. Lubinecka, A. D. Pedan, I. N. Prudyus, G. O. Turkinov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010 : results of the X-th International Conference, 23-27 February 2010, Lviv-Slavske Ukraine, 2010. – Electron. dat. (32 Mb). – Lviv : NU“LP”, 2010. – 1 electron. opt. disk (CD-ROM). – Title from the disc label.

16. Баланюк Ю. В. Сканувальний телевізійний оптичний мікроскоп високої роздільної здатності / Ю. В. Баланюк [та ін.] // Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку МРФ-2011 : матеріали IV

міжнар. радіоелектр. форуму, 18-21 жовтня 2011 р., Харків, Україна / Харківський національний університет радіоелектроніки. – Харків, 2011. – С. 16–19.

17. Balanjuk Y. V. Scanning Television Optical Microscope With Illumination of Microobject in a Ultra-Violet Range / Y. V. Balanjuk, Y. M. Matiieshyn, A. D. Pedan // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2012 : proceedings of XI Int. Conf., 21-24 February 2012, Lviv-Slavske Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, 2012. – P. 113. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar).

18. Balanyuk Y. Scanning television optical microscope for diagnostics of microobjects in medicine / Y. Balanyuk, I. Prudyus, V. Shkliarskyi, Y. Matiieshyn, A. Pedan, V. Vasylyuk // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów DIAG'2013 : materiały VIII Krajowa Konf., 3-7 June 2013, Ustroń, Poland / Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych. – Ustroń, 2013. – P. 89.

19. Balanjuk Y. V. Methods of Correction of Distortions Luminous Raster Cathode Ray Tube / Y. V. Balanjuk, V. I. Shkliarskyi, B. I. Lubinecka, T. Smarkutskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2014 : proceedings of XII Int. Conf., 25 February – 1 March 2014, Lviv-Slavske, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, – 2014. – P. 293–295. (Google Scholar).

20. Balanjuk Y. Definition of formation of errors current in inductive load precision voltage converter-current / Y. Balanyuk, V. Shkliarskyi, V. Vasylyuk // Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK'2014 : Streszczenia referatów X Szkoła-Konf., 27-30 Maja 2014, Waplewo, Polska / Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, Wojskowe Centrum Metrologii Ministerstwa Obrony Narodowej. – Waplewo, 2014. – P. 167.

21. Balanjuk Y. V. Algorithms of television scanning optical microscope in determining the parameters of dynamic microobjects / Y. V. Balanjuk, V. I. Shkliarskyi, Y. M. Matiieshyn // Modern Problems of Radio Engineering,

Telecommunications and Computer Science TCSET'2016 : proceedings of XIII Int. Conf., 23-26 February 2016 Lviv-Slavske (Ukraine) / Lviv Polytechnic National University [etc.]. – Lviv-Slavske, 2016. – P. 321–325. (Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar).

22. Баланюк Ю. В. Сканувальний стереотелевізійний оптичний мікроскоп для дослідження мікрооб'єктів / Ю. В. Баланюк, В.І. Шклярський, Р.З. Матвіїв, А.В. Регуш // Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо'2016 /UkrMiCo'2016) : зб. мат. наук.-техн. конф., 11-15 вересня 2016 / Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова [та ін.]. – Київ, 2016. – С.184– 191.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

23. Пат. 75989 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп / В.І. Шклярський, Ю.М. Матієшин, Ю.В. Баланюк, В. Я. Василюк ; власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201205135 ; заявл. 25.04.2012 ; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24. – 8 с.

24. Пат. 75990 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп / Ю.М. Матієшин, В.І. Шклярський, Ю.В. Баланюк, В. Я. Василюк; власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201205137 ; заявл. 25.04.2012 ; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24. – 8 с.

25. Пат. 103133 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Сканувальний телевізійний оптичний мікроскоп / Ю. В. Баланюк, Ю.М. Матієшин, А.Д. Педан, В.І. Шклярський ; власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201503699 ; заявл. 20.04.2015 ; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23. – 8 с.

26. Пат. 103134 Україна, МПК G06F 3/153, H04N 5/00. Сканувальний телевізійний оптичний мікроскоп / Ю.В. Баланюк, Б.В. Гудзь, В. І. Шклярський; власник патенту Національний університет “Львівська політехніка”. – № u201503700 ; заявл. 20.04.2015 ; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23. – 8 с.

Додаток В.

Основні технічні параметри фотоелектронних помножувачів

Основні технічні параметри ФЕП російського виробництва приведена в таблиці В.1. а японського виробництва – в таблиці В.2.

Таблиця В.1 - Основні параметри ФЕП виробництва країн СНД

Тип ФЕП	Світлова чутлив. фото-катоду, S_{phk} , мкА / лм	Світлова анодна чутлив., S_A , мА / лм		Область спектр. чутлив. $\Delta\lambda$, мкм
ФЭУ-79	120	100 (1850 В) 1000 (2400 В)		0,3 - 0,8
ФЭУ-84	80	100 (1700 В)		0,3 - 0,8
ФЭУ-104	300	100 (1540 В) 300 (1740 В)		0,3 - 0,8
ФЭУ-119	80	100 (2000 В) 1000 (2600 В)		0,3 - 0,8
ФЭУ-120	200	100 (2000 В) 300 (2200 В)		0,3 - 0,8
ФЭУ-135	-	300 (2000 В)		0,3 - 0,8
Тип ФЕП	Напруга насичен. анодного струму, $U_{нас}$, В	ТЕМНОВИЙ СТРУМ, I_T, А	Максим. струм аноду, I_A , мА	Розмір фотокатоду, мм
ФЭУ-79	2400	$4 \cdot 10^{-9}$	10	6
ФЭУ-84	1900	$2 \cdot 10^{-7}$	5	25
ФЭУ-104	2000	$5 \cdot 10^{-9}$	0,002 - 0,005	5
ФЭУ-119	2600	$3 \cdot 10^{-10}$	3	25
ФЭУ-120	2300	$3 \cdot 10^{-8}$	10	20
ФЭУ-135	2700	$5 \cdot 10^{-8}$	2	6

Таблиця В.2 - Основні параметри ФЕП японського виробництва фірми
НАМАМАТСУ

Тип ФЕП	Світлова чутлив. фото-катоду, S_{phk} , мкА / лм	Світлова анодна чутлив., S_A , мА / лм		Область спектр. чутлив. $\Delta\lambda$, мкм
R2368	80 - 150	50 - 200		0,18 - 0,85
R928	140 - 250	400 - 2500		0,18 - 0,90
R2949	140 - 200	1000 - 2000		0,185 - 0,9
R4632	140 - 200	300 - 700		0,185 - 0,900
R636	400 - 550	100 - 250		0,185 - 0,930
R2658	50 - 100	3,5 - 7,5		0,185 - 0,1010
Тип ФЕП	Напруга насичен. анодного струму, $U_{НАС}$, В	Темновий струм, I_T , А	Максим. струм аноду, I_A , мА	Розмір фотокатоду, мм
R2368	1250	$5 \cdot 10^{-12}$	0,1	16x18
R928	1250	$2 \cdot 10^{-12}$	0,1	8
R2949	1250	$300 \cdot 10^{-12}$	0,1	6x8
R4632	1250	$50 \cdot 10^{-12}$	0,1	8
R636	1500	$0,1 \cdot 10^{-12}$	0,001	3
R2658	1500	$350 \cdot 10^{-12}$	0,001	3

Таблиця В.3 - Основні технічні параметри спектрометричних ФЕП

Тип	Спектральний діапазон чутливості нм	Діапазон максимальної спектральної чутливості, нм	Чутливість	
			фотокатоду мкА/лм	аноде А/лм
ФЭУ 176	300...850	400...420	150	10
ФЭУ 185	300...850	390...410	180	10
ФЭУ 182	220...850	370...430	200	10
ФЭУ-183	220...850	370...430	130	10
Престиж	220...850	370...430	200	10
ФЭУ-189	250...650	380...420	-	100
Тип	Напруга живлення В	Темновий струм нА	Час наростання імпульсної характеристики, нс	
ФЭУ 176	1250	<8	-	
ФЭУ 185	1250	1	8	
ФЭУ 182	1250	5	10	
ФЭУ 183	1250	5	-	
Престиж	1300	5	10	
ФЭУ-189	1800	100	-	

Додаток Г.

Г.1. Формувач сигналів відхилення

Формувач сигналів відхилення (ФСВ) призначений для формування сигналів, які забезпечують позиціонування променя на екрані сканувальної трубки в будь-якому режимі роботи ТСМ по координатах X та Y. Електрична принципова схема ФСВ наведена на рис Б1 Б1.

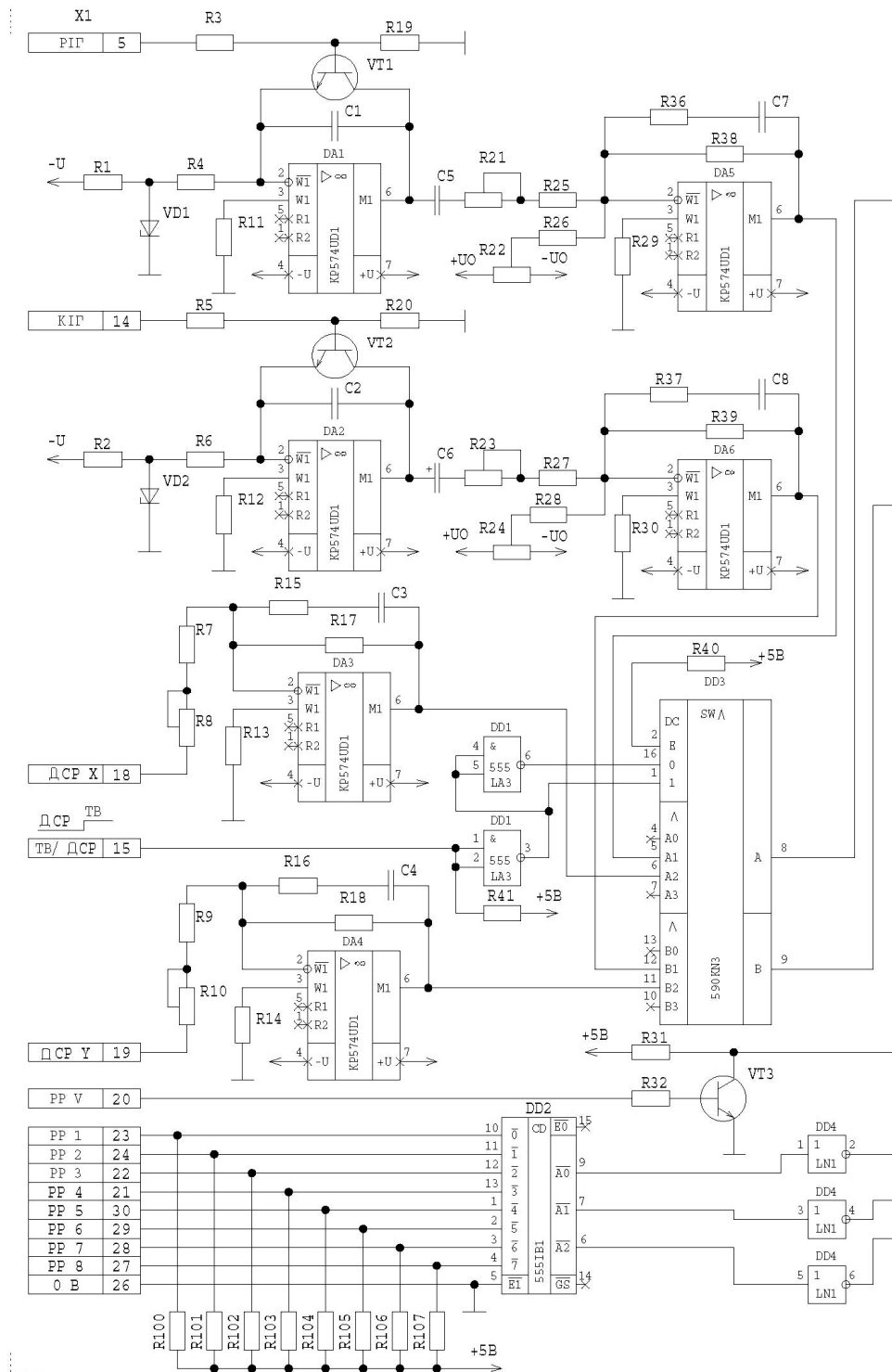


Рисунок Г1 – Формувач сигналу відхилення. Схема електрична принципова (початок)

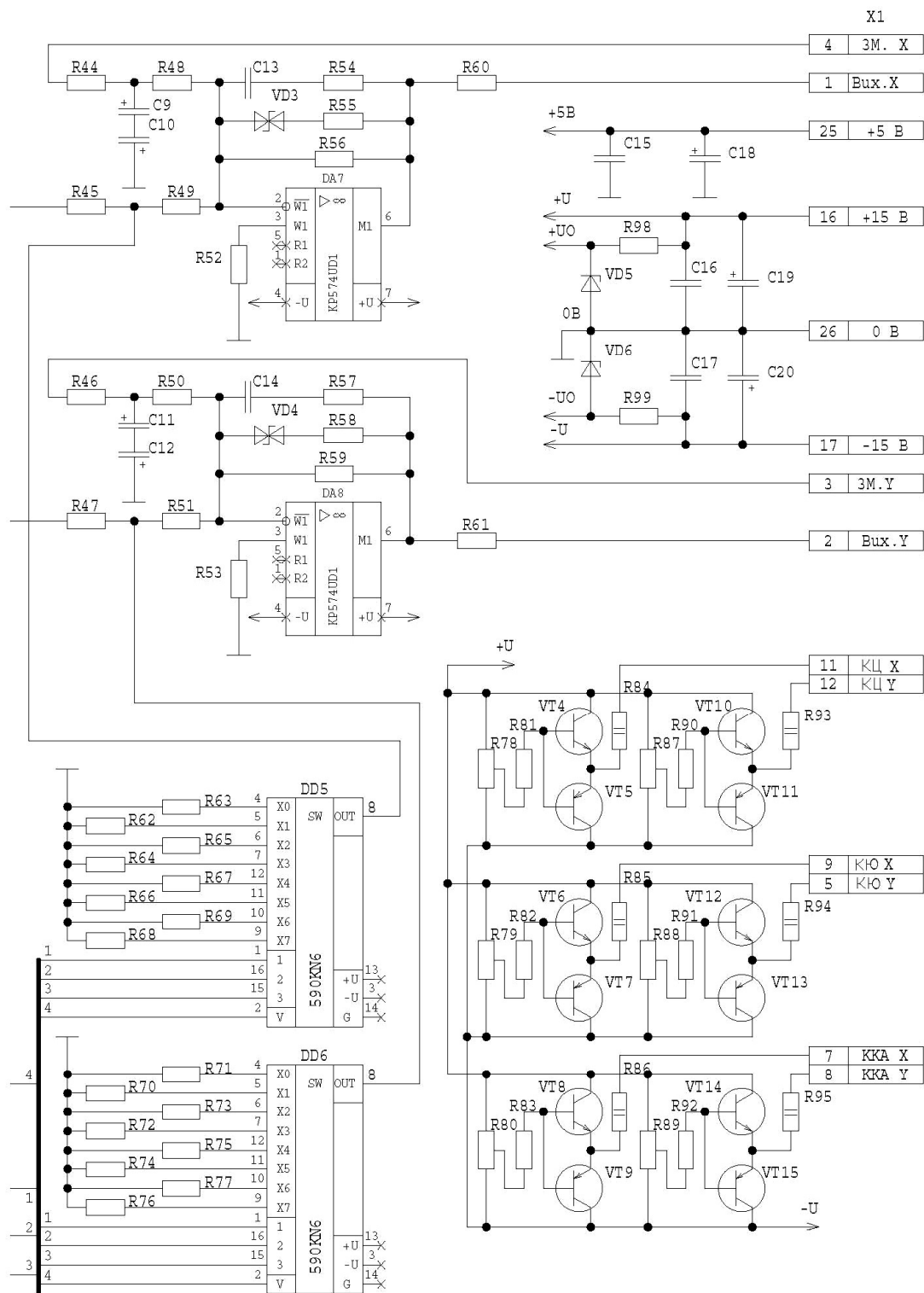


Рисунок Г1 – Формувач сигналу відхилення. Схема електрична принципова (закінчення)

До складу електричної схеми ФСВ входять два генератори пилкоподібної напруги та два узгоджувачі підсилювачі, які формують сигнал

відхилення по координатах X та Y в телевізійному режимі, два узгоджуючі підсилювачі для формування сигналів відхилення в дискретному режимі, комутатор, два регулятори амплітуди сигналів відхилення, два комутатори для регулювання амплітуди сигналів відхилення, які забезпечують зміну розмірів сканувального растра, дешифратор сигналу масштабування та шість джерел струму для живлення коректуючих елементів ЕПТ.

Формувач пилкоподібного сигналу відхилення по координаті X в телевізійному режимі виконаний на операційному підсилювачі DA1 та транзисторі VT1. Рядковий імпульс гасіння РІГ надходить із з'єднувача X1:5 на базу транзистора VT1. При надходженні імпульсу транзистор VT1 відкривається і насичується, при цьому на виході операційного підсилювача DA1:6 встановлюється нульовий потенціал. Після закінчення надходження РІГ транзистор VT1 закривається і починається заряд конденсатора C1 від опорної напруги через резистор R4. Опорна напруга формується параметричним стабілізатором, створеним резистором R1 та стабілітроном VD1. На виході операційного підсилювача DA1:6 формується додатна пилкоподібна напруга, яка через роздільний конденсатор C5 та резистори R21, R25 подається на узгоджуючий підсилювач, зібраний на мікросхемі операційного підсилювача DA5. Резистор R21 забезпечує встановлення нормованого розмаху вихідної напруги, резистор R22 призначений для симетрування вихідної напруги відносно нульового рівня.

Формувач сигналу відхилення по координаті Y в телевізійному режимі (СВУ) зібраний на операційному підсилювачі DA2 та транзисторі VT2. Запуск схеми здійснюється кадровим імпульсом гасіння КІГ, який надходить зі з'єднувача X1:14 через резистор R5 на базу транзистора VT2. Принцип роботи цієї схеми аналогічний попередньому.

Узгоджуючі підсилювачі виконані на операційних підсилювачах DA3 та DA4 і призначені для формування нормованих за амплітудою сигналів відхилення по координатах X та Y в дискретному режимі формування сканувального растра. На їх входи надходять із з'єднувача X1:18 та X1:19

дискретні сигнали відхилення ДСВ Х та ДСХ У. Резистори R8 та R10 призначені для встановлення нормованих за амплітудою сигналів відхилення.

Комутатор виконаний на мікросхемі аналогового комутатора DD3. На її входи 5 та 12 надходять сигнали відхилення СВХ та СВУ у телевізійному режимі, а на входи 6 та 11 – сигнали відхилення у дискретному режимі СВХ та СВУ. Комутація сигналів здійснюється за допомогою логічних сигналів, які формуються логічними елементами на мікросхемі DD1. У телевізійному режимі на вхідний з'єднувач X1:15 подається напруга “Лог.1”. При цьому на вході DD3:1 встановлюється напруга “Лог.0”, а на виході мікросхеми DD3:16 – напруга “Лог.1”. У цьому режимі на виходи комутатора DD3:8 та DD3:9 проходять телевізійні сигнали СВХ та СВУ. При появі на виході з'єднувача X1:15 напруги “Лог.0” на входах комутатора DD3:1 та DD3:16 встановлюються відповідно напруги “Лог.1” та “Лог.0”. В результаті цього на вихід комутатора проходять сигнали дискретного відхилення по координатах Х та У.

Регулювання амплітуди сигналів відхилення виконується за допомогою аналогових комутаторів, виконаних на мікросхемах DA7 та DA8. Сигнал відхилення (телевізійний або дискретний) надходить з виходів комутатора, виконаного на мікросхемі DD3:8 або DD3:9, через резистори R45, R49 або R47, R51 на входи регуляторів амплітуди сигналів відхилення. Амплітуда вихідного сигналу відхилення визначається величиною опору шунтуючого резистора, який підмикається між точкою з'єднання резисторів R45, R49 та R47, R51 і нульовою шиною. Відповідно, чим менша величина цього резистора, тим меншою буде і значення амплітуда вихідної напруги. Регулювання величини шунтуючого опору відбувається дискретно за допомогою комутаторів, виконаних на мікросхемах DD5 та DD6, для керування якими використовується двійковий код, що поступає на їх входи 1, 16 та 15 з шифратора (мікросхема DD2) через інвертори, виконані на мікросхемі DD4.

Дешифратор, зібраний на мікросхемі DD2, перетворює напругу низького рівня (“Лог.0”), що надходить зі з'єднувача X1 (сигнали PP1-PP8) на один з

восьми паралельних адресних входів 0-7 в паралельний двійковий код A0-A2, що пропорційний до номеру входу, на який надійшов сигнал низького рівня.

Вихідні підсилювачі сигналів відхилення зібрані на операційних підсилювачах DA7 та DA8 і мають захист від перевантаження вихідних каскадів перетворювачів напруга-струм, для чого в ланку зворотного зв'язку ввімкнені стабілітрони VD3 та VD4, якими обмежується максимальний розмах сигналів на їх виходах при одночасному надходженні сигналів зміщення та відхилення. Умовою спрацьовування захисту є перевищення вихідної напруги, тобто значення, яке на 105 відсотків перевищує амплітуду сигналу, необхідну для відхилення сканувальної плями з центра екрана ЕПТ на край растра.

На інвертуючі входи операційних підсилювачів DA7 та DA8 через резистори R44, R48 та R45, R50 надходить напруга сигналу зміщення через контакти з'єднувача X1:4 та X1:3 (3мX та 3мY) від потенціометрів, розташованих на передній панелі блока керування. Під дією цих напруг центральна точка сканувального растра може бути зміщена в будь-яку точку екрана сканувальної електронно-променевої трубки. Конденсатори C9 - C12 призначені для зменшення пульсацій та завад в колах сигналів зміщення.

Джерела струмів, які зібрані на транзисторах VT4- VT15, забезпечують живлення електромагнітних систем корекції променя електронно-променевої трубки, а саме: котушок центрування променя, котушок юстування та котушок корекції астигматизму. Вони забезпечують регулювання постійного струму в коректуючих котушках в межах ± 100 мА. Обмеження максимального значення струму в котушках корекції здійснюється резисторами, ввімкненими послідовно між виходом схеми та відповідною котушкою корекції.

Живлення електричної схеми здійснюється від зовнішніх джерел з напругою +5 В, +15 В та -15 В.

Основним технічними параметрами формувача сигналів відхилення є:

- амплітуда вихідного сигналу відхилення, яка відповідає зміщенню сканувальної плями з центра екрана ЕПТ на край растра – 4 В;
- опір навантаження – не менше 5 кОм;

- тривалість пилкоподібного сигналу розгортки по координаті X в телевізійному режимі – 52 мкс;
 - період пилкоподібного сигналу розгортки по координаті X в телевізійному режимі – 52 мкс;
 - тривалість пилкоподібного сигналу розгортки по координаті Y в телевізійному режимі – 19 мс;
 - період пилкоподібного сигналу розгортки по координаті Y в телевізійному режимі – 20 мс;
 - тривалість пилкоподібного сигналу розгортки по координаті X в дискретному режимі – 2 мс; 4 мс; 8 мс; 16 мс.
 - тривалість зворотного ходу пилкоподібного сигналу розгортки по координаті X в дискретному режимі – 30 мкс;
 - тривалість пилкоподібного сигналу розгортки по координаті Y в дискретному режимі – 2 с; 4 с; 8 с; 16 с.
 - тривалість зворотного ходу пилкоподібного сигналу розгортки по координаті Y в дискретному режимі – 100 мкс;
 - максимальний струм споживання від джерела напругою +5 В – 120 мА;
 - максимальний струм споживання від джерела напругою +15 В – 90 мА;
 - максимальний струм споживання від джерела напругою -15 В – 90 мА.
- Загальний вигляд плати формувача сигналу відхилення показано на рис.

Г.2.

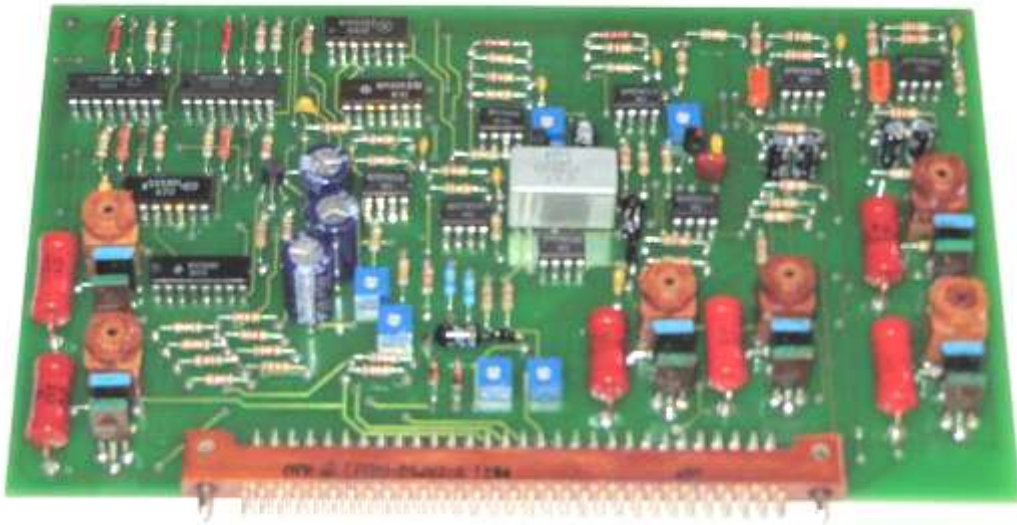


Рисунок Г.2 – Загальний вигляд плати формувача сигналу відхилення

Г.2. Перетворювач напруга – струм

Перетворювач напруга-струм (ПНС) призначений для точного та стабільного перетворення напруги вхідного сигналу в струм відповідних котушок відхилення.

Принципова електрична схема перетворювачів напруга-струм (ПНС) наведена Г.3. Вона складається з перетворювача напруга-струм по координаті X (ПНСХ) та по координаті Y (ПНСУ). З метою забезпечення високої точності та стабільності перетворення вхідної напруги в струм навантаження обидва ПНС виконані за схемою підсилювача постійного струму з глибоким від'ємним зворотним зв'язком за струмом, сигнал якого формується низькоомним термостабільним резистором, ввімкненим послідовно з індуктивним навантаженням.

Перетворювач ПНСХ складається з підсилювача постійного струму, виконаного на мікросхемі DA1, узгоджувача, проміжного підсилювача напруги, виконаного на транзисторах VT1 та VT3, ввімкнених за схемою зі спільним емітером, вихідного каскаду, зібраного за двотактною схемою на транзисторах різного типу провідності VT5, VT6, VT9 і VT10 та схемою вольтододатка (підживлення), виконаної на транзисторах VT4 та VT8.

Вихідні транзистори VT8,VT10 та VT9,VT11 ввімкнені паралельно з метою зменшення потужності, яка розсіюється на одному транзисторі, і, відповідно, підвищення надійності роботи схеми. Сигнал зворотного зв'язку формується на резисторі R38, ввімкненому послідовно з котушкою відхилення по координаті X KBX, яка під'єднується через з'єднувач, і подається через порівнюючий резистор R3 на інвертуючий вхід операційного підсилювача DA1:2.

I

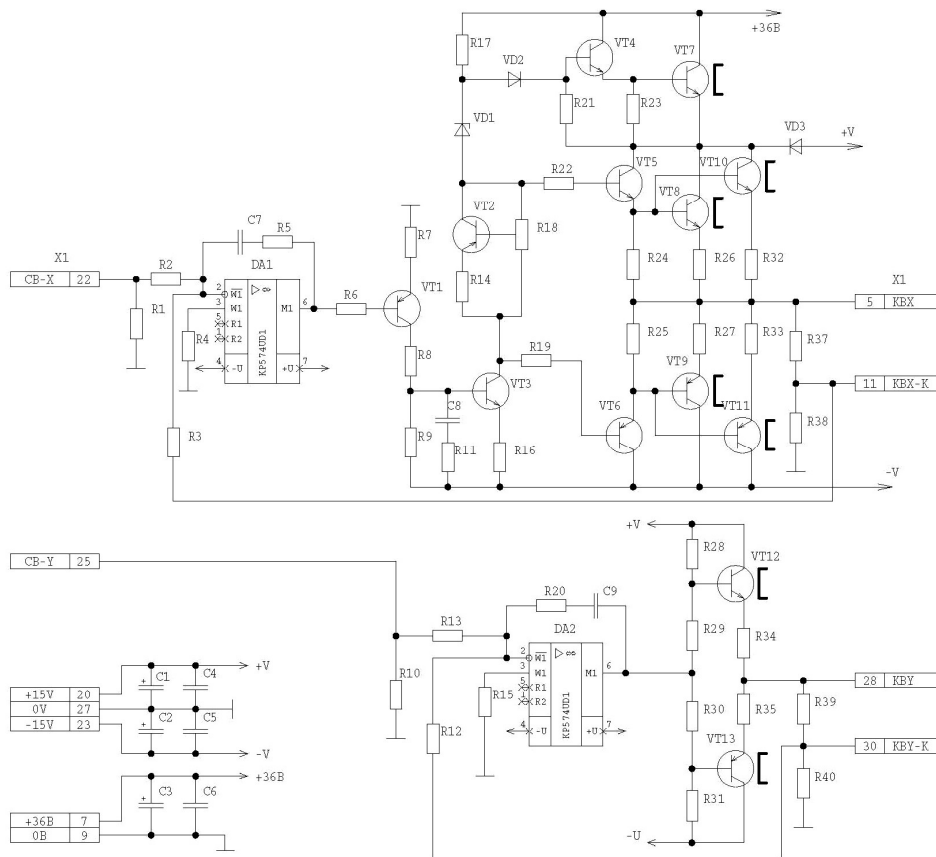


Рисунок Г.3 – Перетворювач напруга – струм. Схема електрична принципова

Загальний коефіцієнт передачі ПНСХ визначається відношенням опорів резисторів R3 та R2, а максимальний струм в індуктивному навантаженні – опором резистора R38. Операційний підсилювач DA1:2 забезпечує точність та стабільність перетворення вхідної напруги у вихідний струм, два каскади підсилення зі спільним емітером – підсилення сигналу за напругою для забезпечення високої швидкодії в ділянці високих частот, а вихідний каскад –

підсилення сигналу за струмом, необхідне для відхилення скануючого променя в будь-яку точку екрана ЕПТ по координаті X. Каскад підживлення вмикається лише для забезпечення короткого часу встановлення струму в індуктивному навантаженні під час зворотного ходу по координаті X, а також при значних переміщеннях променя по екрану при дискретному методі формування раstra. Вибір режиму роботи вихідного каскаду здійснюється параметричним стабілізатором, виконаним на транзисторі VT2. Симетрування характеристик потужних вихідних транзисторів здійснюється резисторами в колах їх емітерів R24, R25, R26 та R27. Резистор R37 забезпечує формування струму в KBX в аперіодичному режимі. Коректування амплітудно-частотної характеристики ПНСХ здійснюється двома коректуючими ланками, кожна з яких складається з послідовно з'єднаних резистора та конденсатора R5, C7 та R11, C8.

Живлення вхідних каскадів ПНСХ здійснюється від джерела +15 В безпосередньо, а вихідного каскаду - через діод VD3, живлення всіх каскадів ПНСХ від джерела -15 В здійснюється безпосередньо. Для прискорення процесу розрядки енергій, накопичених в KBX під час прямого ходу, під час зворотного ходу відкриваються транзистори VT4, VT7 і на KBX через відкриті транзистори VT5, VT8 та VT10 подається підвищена напруга + 36 В.

Перетворювач ПНСУ зібраний на операційному підсилювачі DA2 та вихідних транзисторах VT12, VT13, які забезпечують підсилення сигналу за струмом. Сигнал від'ємного зворотного формується на резисторі R40, ввімкненого послідовно з котушками відхилення KBY, і через порівнюючий резистор R12 подається на інвертуючий вхід операційного підсилювача DA2:2. Загальний коефіцієнт передачі ПНСУ визначається відношенням опорів резисторів R13 та R12, а максимальний струм в індуктивному навантаженні – опором резистора R40. Резистор R39 забезпечує формування струму в KBY в аперіодичному режимі. Коректування амплітудно-частотної характеристики ПНСУ здійснюється коректуючою ланкою, яка складається з послідовно з'єднаних резистора та конденсатора R20, C9.

Живлення ПНСУ здійснюється від зовнішніх стабілізованих джерел +15 В та -15 В.

Основним технічними параметрами перетворювача напруга-струм є:

- розмах вхідного сигналу ± 4 В;
- амплітуда вихідного струму в котушках відхилення по координаті X KBX - ± 1 А;
- індуктивність кадрових котушок відхилення – 4 мГн;
- амплітуда вихідного струму в котушках відхилення по координаті X KBY - $\pm 0,2$ А;
- індуктивність рядкових котушок відхилення – 100 мкГн;
- максимальний струм споживання від джерела напругою +36 В – 200 мА;
- максимальний струм споживання від джерела напругою +15 В – 1,3 А;
- максимальний струм споживання від джерела напругою -15 В – 1,3 А.

ПНСХ забезпечує розмах струму в KBX ± 1 А при індуктивності котушок відхилення 100 мкГн. ПНСУ забезпечує розмах струму в KBX $\pm 0,2$ А при індуктивності котушок відхилення 4 мГн.

Загальний вигляд плати перетворювача напруга-струм показано на рис.

Г.4

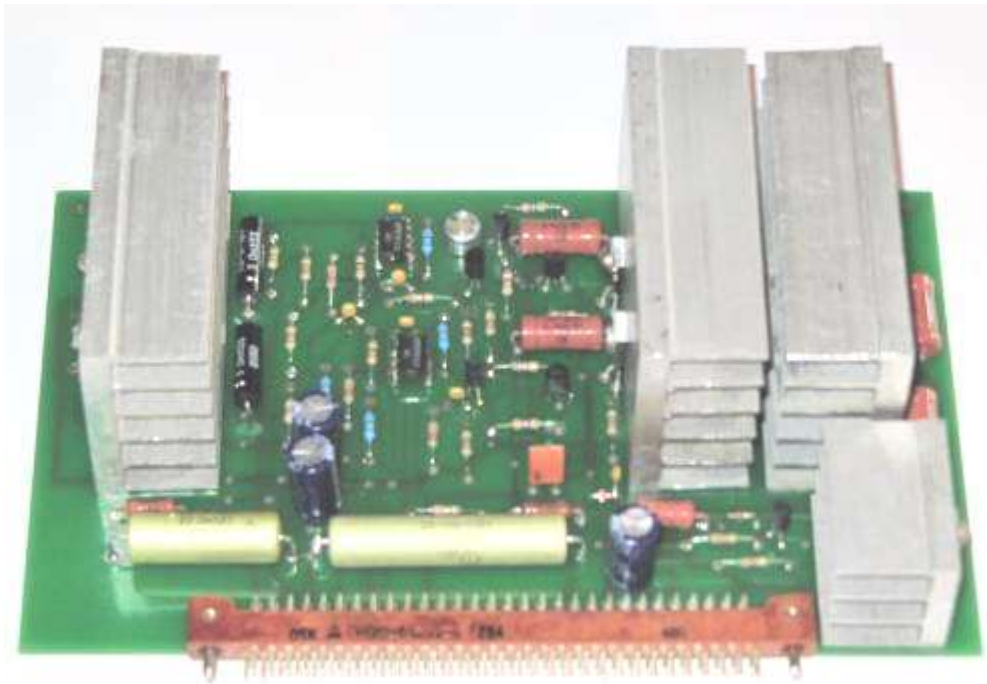


Рисунок Г.4 – Загальний вигляд плати перетворювачів напруга-струм