# **МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ** ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

## БЛАЖЕННИЙ НАЗАРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.396

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

# ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АТМОСФЕРНО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ В УМОВАХ ВПЛИВУ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЯК НАСЛІДКУ ТЕХНОГЕННОЇ АВАРІЇ

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

(підпис)

Науковий керівник: Руденко Наталія Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент

#### АНОТАЦІЯ

*Блаженний Н.В.* Підвищення ефективності застосування атмосфернооптичних ліній зв'язку в умовах впливу іонізуючого випромінювання як наслідку техногенної аварії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» — Державний університет інформаційнокомунікаційних технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання, сутність якого полягає в розробці методики оцінки впливу іонізуючого випромінювання, сформованого сумішшю радіоактивних речовин, як наслідку техногенної аварії на приймачі інфрачервоного випромінювання.

На основі аналізу радіаційної стійкості елементної бази атмосферно-оптичних ліній зв'язку та процесів формування радіаційних дефектів в інфрачервоних приймачах, як найбільш радіаційно уразливих елементах конструкції, з урахуванням характеристик радіоактивних речовин, які можуть сформуватися внаслідок аварійного викиду атомної енергетичної установки і які безпосередньо формують іонізуюче випромінювання удосконалена методика оцінки впливу іонізуючого випромінювання на інфрачервоні приймачі атмосферно-оптичних ліній зв'язку.

За допомогою вказаної методики проведена оцінка впливу іонізуючого випромінювання, сформованого сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду водо-водяного енергетичного реактора, на виявляючу здатність інфрачервоних приймачів атмосферно-оптичних ліній зв'язку та розроблені практичні рекомендації, направлені на збереження значення виявляючої здатності інфрачервоних приймачів в умовах впливу іонізуючого випромінювання.

Для досягнення мети по підвищенню ефективності застосування атмосфернооптичних ліній зв'язку в умовах впливу іонізуючого випромінювання як наслідку техногенної аварії було отримано наукові результати:

1. Удосконалено метод встановлення видів радіаційних ефектів у приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку, що утворяться під дією іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті. Вказаний метод, на відміну від існуючих, враховує характеристики суміші радіонуклідів аварійного викиду з радіаційно небезпечного види радіаційних ефектів об'єкту та дозволяє встановити приймачах В інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній звязку, шо формуються під їх впливом.

2. Вперше розроблено методику оцінки впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті, на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку, наукова новизна якої полягає в тому, що вона враховує характеристики іонізуючого випромінювання та види радіаційних ефектів, що можуть сформуватись в приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку під його впливом та дозволяє оцінити вплив іонізуючого випромінювання на виявляючу здатність приймачів в залежності від відстані до аварійного радіаційно небезпечного об'єкту та характеристик іонізуючого випромінювання в точці оцінки впливу.

3. Вперше розроблена модель оцінки впливу гама-випромінювання, наукова новизна якої полягає в тому, що вона враховує характеристики іонізуючого випромінювання та види радіаційних ефектів та застосування якої дозволяє підвищити виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання в умовах впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті.

У вступі обґрунтовується важливість й актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено основні положення, наукову та практичну цінність отриманих результатів дослідження та введено особистий внесок автора.

У першому розділі визначено роль і місце атмосферно-оптичних ліній зв'язку в системах передачі інформації, проведено аналіз впливу іонізуючого

3

випромінювання на конструктивні елементи атмосферно-оптичних ліній зв'язку, здійснено поглиненої прогнозування характеристик ЛОЗИ іонізуючого випромінювання, яке випускається сумішшю радіоактивних речовин аварійного енергоустановки, проведено аналіз існуючих викиду атомної методик прогнозування іонізуючого випромінювання, формується сумішшю ЩО радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енергоустановки на атмосфернооптичні лінії та здійснено постановку завдання дослідження.

У другому розділі проведена оцінка захищеності приймачів інфрачервоного випромінювання від гама-випромінювання, обгрунтувано необхідність оцінки впливу поглиненої дози гама-випромінювання і її потужності на приймачі інфрачервоного випромінювання, розроблено методику оцінки впливу гамавипромінювання на приймачі інфрачервоного випромінювання.

У третьому розділі здійснено моделювання умов та характеристик функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку, оцінено вплив гамавипромінювання, що випускається сумішшю радіоактивних речовин на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання, розроблено модель по модернізації конструкції приймачів інфрачервоного випромінювання, які направлені на збереження виявляючої здатності в умовах впливу гама-випромінювання, проведено апробацію розроблених рекомендацій по зниженню впливу гамавипромінювання на працездатність атмосферно-оптичних ліній зв'язку.

Узагальнюючим результатом проведених досліджень є обгрунтовані практичні рекомендації, які дозволяють на 15–17% підвищити виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання від номінальної в умовах впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті.

Дисертація виконувалась в Державному університеті інформаційнокомунікаційних технологій.

Результати наукових досліджень прийняті до впровадження в навчальному процесі кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Навчально-наукового інституту телекомунікацій Державного університету інформаційно-комунікаційних

4

технологій при викладанні дисципліни «Супутникові інформаційні технології» для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» денної та заочної форми навчання.

Ключові слова: атмосферно-оптичні лінії зв'язку, інформаційні системи, фактори, радіація, радіаційна стійкість, іонізуюче випромінювання.

#### ANNOTATION

*Blazhennyi N.V.* Increasing the efficiency of the use of free-space optical communications when exposed to ionizing radiation as a consequence of a man-made accident. - Scientific qualification work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 172 "Telecommunications and Radio Engineering" -- State University of Information and Communication Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, MES of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific task, the essence of which is to develop a methodology for assessing the effects of ionizing radiation generated by a mixture of radioactive substances as a consequence of a man-made accident on an infrared radiation receiver.

Based on the analysis of the radiation resistance of the element base of free-space optical communications and the processes of formation of radiation defects in infrared receivers as the most radiation-vulnerable structural elements, taking into account the characteristics of radioactive substances that can be formed as a result of an accidental release of a nuclear power plant and which directly generate ionizing radiation, the methodology for assessing the effects of ionizing radiation on infrared receivers of freespace optical communications has been improved.

Using this methodology, the effects of ionizing radiation generated by a mixture of radioactive substances from the accidental release of a water-water power reactor on the detecting ability of infrared receivers of free-space optical communications was assessed and practical recommendations were developed aimed at preserving the value of the detecting ability of infrared receivers when exposed to ionizing radiation.

To achieve the goal of increasing the efficiency of the use of free-space optical communications when exposed to ionizing radiation as a consequence of a man-made accident, scientific results were obtained:

1. The method for determining the types of radiation effects in the infrared radiation receivers of free-space optical communications formed under the influence of ionizing radiation as a consequence of the man-made accident at a radiation-hazardous facility has been improved. This method, unlike the existing ones, takes into account the characteristics of the mixture of radionuclides released from the radiation hazardous facility and makes it possible to determine the types of radiation effects in the infrared radiation receivers of free-space optical communications formed under their influence.

2. A methodology for assessing the effects of ionising radiation, as a consequence of a man-made accident at a radiation hazardous facility, on the detection capability of infrared radiation receivers of free-space optical communications has been developed for the first time, the scientific novelty of which is that it takes into account the characteristics of ionising radiation and types of radiation effects, that can be formed in the infrared radiation receivers of free-space optical communications under its influence and allows to assess the effects of ionising radiation on the detection capability of receivers depending on the distance to the emergency radiation hazardous object and the characteristics of ionising radiation at the point of effect assessment.

3. The first model for assessing the effects of gamma radiation has been developed, the scientific novelty of which is that it takes into account the characteristics of ionizing radiation and types of radiation effects, and the application of which makes it possible to increase the detection capability of infrared radiation receivers when exposed to ionizing radiation as a result of a man-made accident at a radiation hazardous facility.

The introduction describes the importance and relevance of the subject of the dissertation research, formulates the purpose and objectives of the research, defines the main provisions, scientific and practical value of the research results, and introduces the author`s personal contribution.

The first section defines the role and place of free-space optical communications in information transmission systems, analyzes the effects of ionizing radiation on the structural elements of free-space optical communications, predicts the characteristics of the absorbed dose of ionizing radiation emitted by a mixture of radioactive substances from an accidental release of a nuclear power plant, analyzes existing methods for

7

predicting ionizing radiation generated by the mixture of radioactive substances from the accidental release of the nuclear power plant, and analyzes the existing methods for predicting the characteristics of the absorbed dose of ionizing radiation from the mixture of radioactive substances from the accidental release of the nuclear power plant.

In the second section, the protection of infrared radiation receivers against gamma radiation was assessed, the need to assess the impact of the absorbed dose of gamma radiation and its power on the infrared radiation receiver was substantiated, and a methodology for assessing the effects of gamma radiation on infrared radiation receivers was developed.

In the third section, the conditions and characteristics of the functioning of freespace optical communications were modeled, the effect of gamma radiation emitted by a mixture of radioactive substances on the detecting ability of infrared radiation receivers was assessed, a model for modernizing the design of infrared radiation receivers aimed at preserving the detecting ability under the influence of gamma radiation was developed, and the recommendations developed to reduce the effects of gamma radiation on the performance of free-space optical communications were tested.

The general result of the conducted research is reasonable practical recommendations that allow to increase the detection capability of infrared radiation receivers by 15-17% from the nominal one when exposed to ionising radiation as the result of the man-made accident at the radiation hazardous facility.

The dissertation was carried out at the State University of Information and Communication Technologies.

The results of scientific research have been introduced in the educational process of the Department of Mobile and Video Information Technologies of the Educational and Research Institute of Telecommunications of the State University of Information and Communication Technologies in teaching the discipline "Satellite Information Technologies" for students of specialty 172 «Telecommunications and Radio Engineering» of full-time and part-time education.

*Keywords:* free-space optical communications, information systems, factors, radiation, radiation resistance, ionizing radiation.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку

1. Blazhennyi N. Estimation of cosmic radiation on free space optical communication lines. // Modern engineering and innovative technologies (Germany) – 2021. No17. p.6-10.

2. Blazhennyi Nazarii. Development of methods for the assessment of vulnerability of the receiver input of free-space optical communication from the effects of radiation, as the effects of the destruction of radiation hazardous objects. / Nazarii Blazhennyi, Oleksandr Turovsky, Liudmyla Kyrpach, Yana Kremenetskaya, Olena Zhukova // ScienceRise (Estonia). – 2021. No. 3, p.21-28.

3. Nazarii Blazhennyi «Evaluation method of the physical compatibility of equipment in a hybrid information transmission network»: Pavlo Anakhov, Viktoriia Zhebka, Alina Tushych, Vladislav Kravchenko, Nazarii Blazhennyi, Pavlo Skladannyi, Volodymyr Sokolov, Journal of theoretical and applied information technology (E-ISSN 1817-3195 / ISSN 1992-8645). 30th November 2022. Vol.100. No 22. pp.6635-6644. (**Scopus**).

Статті у фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого ДАК України

4. Блаженний Н.В. Обгрунтування наукового завдання по оцінці впливу факторів іонізуючого випромінювання на ефективність застосування атмосфернооптичних ліній зв'язку. / Кирпач Л.А., Туровський О.Л., Блаженний Н.В. / Науковий журнал «Телекомунікаційні та інформаційні технології». К.: ДУТ, 2021. № 1 (70). С. 54 – 64.

5. Блаженний Н.В. Результати досліджень впливу радіоактивного випромінювання на конструктивні елементи атмосферно-оптичних ліній зв'язку. / Кирпач Л.А., Блаженний Н.В., Туровський О.Л. // Науково-практичний журнал «Зв'язок». К.: ДУТ, 2021. № 2 (2021). С. 9 – 12.

6. Блаженний Н.В. Постановка задачі структурного синтезу атмосфернооптичної системи. / Кирпач Л.А., Блаженний Н.В., Голубенко О.І. / Науковопрактичний журнал «Зв'язок». К.: ДУТ, 2021. № 3 (2021). С. 22 – 26.

7. Блаженний Н.В. Вплив сонячного випромінювання (космічної радіації) на оптичні лінії зв'язку: огляд джерел. / Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2021, Том 32 (71) № 4, С. 40-47.

8. Блаженний Н.В. Алгоритм оцінки впливу гама–випромінювання на приймачі атмосферно-оптичних ліній зв'язку.// Туровський О.Л., Блаженний Н.В. // «Проблеми інформатизації та управління», К.: НАУ - 2021, Том 2 № 66, С 54-62.

9. Блаженний Н.В. Моделювання функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку в умовах радіоактивного випромінювання. // Туровський О.Л., Блаженний Н.В.// «Наукоємні технології», К.: НАУ – 2021, Том 50 № 2, С 140-146.

#### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Blazhennyi N.V. The role and place of atmospheric-optical communication lines in information transmission systems. Тези доповідей: XII Міжнародна науковотехнічна конференція студентства та молоді «Світ інформації та телекомунікацій» м. Київ.: ДУТ, 20 травня 2021 р. С.15-16.

11. Блаженний Н.В. Оцінка захищеності атмосферно-оптичних ліній зв'язку від гама-випромінювання. Науково-технічна конференція «Сучасні інфокомунікаційні технології» Збірник тез. К.: ДУТ – 2021, С. 127-128.

12. Blazhennyi N.V. Statement of the problem of structural synthesis of atmospheric-optical system. // Blazhennyi N.V.// International scientific and practical conference «Technical sciences: the analysis of trends and development prospects»: Conference proceedings, July 2–3, 2021. Prague: «Baltija Publishing», 2021. p.63-65.

13. Nazarii Blazhennyi. Spatial Modulation of Signals Using Polarization Methods for Wireless Communication Systems in the Optical and Radio Bands. Yana Kremenetskaya; Anatoliy Makarenko; Natalia Rudenko; Vsevolod Yakovets; Andriy Lemeshko; Nazarii Blazhennyi. 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 10-14 October 2022. Kyiv, Ukraine. (**Scopus**).

#### Патенти та висновки про видачу патенту України на винахід (корисну модель)

14. Патент на корисну модель 150761 Україна (заявка № u202106129), Спосіб визначення впливу радіоактивності на конструктивні елементи атмосфернооптичних систем,/ Блаженний Н.В., Кравченко В.І., Руденко Н.В., Туровський О.Л. Заявники і патентовласники Блаженний Н.В., Кравченко В.І., Руденко Н.В., Туровський О.Л.; Патент заявл. 01.11.2021. Опубліковано 13.04.2022, Бюл.№ 15.

15. Патент на корисну модель 147896 Україна (заявка № u202100905), Прилад визначення і ліквідації постановників завад, працюючих в навколоземному просторі та на земній поверхні / Блаженний Н.В., Кравченко В.І., Кирпач Л.А., Туровський О.Л. Заявники і патентовласники Блаженний Н.В., Кравченко В.І., Кирпач Л.А., Туровський О.Л.; Патент заявл. 25.02.2021. Опубліковано 16.06.2021, Бюл. № 24.

16. Висновок про видачу патенту на винахід (корисну модель) Україна (заявка № а201911422), Система управління процесом технічної експлуатації літальних та космічних апаратів / Блаженний Н.В. Заявник і патентовласник Блаженний Н.В.; Патент заявл. 25.11.2019. Опубліковано 26.05.2021, Бюл. № 21/2021.

#### Навчальні посібники

17. Кирпач Л.А., Блаженний Н.В. Супутникові інформаційні технології. К.: ДУТ, 2021. 85 с.

**3MICT** 

ПЕРЕЛІК У	МОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	14	
ВСТУП		15	
РОЗДІЛ 1.	АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ РАДІАЦІЙНИХ		
	ЕФЕКТІВ В АТМОСФЕРНО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ		
	ЗВ'ЯЗКУ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ	23	
1.1.	Роль і місце атмосферно-оптичних ліній зв'язку в		
	системах передачі інформації	23	
1.2.	Аналіз впливу іонізуючого випромінювання на		
	конструктивні елементи атмосферно-оптичних ліній		
	зв'язку	37	
1.3.	Прогнозування характеристик поглиненої дози		
	іонізуючого випромінювання, яке випускається сумішшю		
	радіоактивних речовин аварійного викиду атомної		
	енергоустановки	51	
1.4.	Аналіз існуючих методик прогнозування іонізуючого		
	випромінювання, що формується сумішшю радіоактивних		
	речовин аварійного викиду атомної енергоустановки на		
	атмосферно-оптичні лінії	60	
1.5.	Постановка завдання дослідження	72	
Висновки до розділу 1		73	
РОЗДІЛ 2.	РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ГАМА-		
	ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПРИЙМАЧІ		
	ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	74	
2.1.	Оцінка захищеності приймачів інфрачервоного		
	випромінювання від гама-випромінювання	74	
2.2.	Обгрунтування необхідності оцінки впливу поглиненої		
	дози гама-випромінювання і її потужності на приймачі		
	інфрачервоного випромінювання	80	

2.3.	Разробка методики оцінки впливу гама-випромінювання	
	на приймачі інфрачервоного випромінювання	87
Висновки до розділу 2		96
РОЗДІЛ З.	ОБГРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО	
	ЗМЕНШЕННЮ ВПЛИВУ ГАМА-	
	ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЩО ВИПУСКАЄТЬСЯ	
	СУМІШШЮ РАДІОАКТИВНИХ РЕЧОВИН НА	
	ПРИЙМАЧІ ІНФРАЧЕРВОНОГО	
	ВИПРОМІНЮВАННЯ	97
3.1.	Моделювання умов та характеристик функціонування	
	АОЛЗ	97
3.2.	Оцінка впливу гама-випромінювання, що випускається	
	сумішшю радіоактивних речовин на виявляючу	
	здатність приймачів інфрачервоного випромінювання	108
3.3.	Рекомендації по модернізації конструкції приймачів	
	інфрачервоного випромінювання, направлені на	
	збереження виявляючої здатності в умовах впливу гама-	
	випромінювання	112
3.4.	Апробація розроблених рекомендацій по зниженню	
	впливу гама-випромінювання на працездатність АОЛЗ	123
Висновки до	розділу 3	129
ВИСНОВКИ		130
СПИСОК ВИ	ІКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	135
ДОДАТКИ		147
ДОДАТОК А	L	147
ДОДАТОК Б		151
ДОДАТОК В	<b>k</b>	156

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АОЛЗ	—	атмосферно-оптичні лінії зв'язку		
АЕУ	—	атомна енергетична установка		
AEC	—	атомна електрична станція		
BBEP	_	водо - водяний енергетичний реактор		
ВОЛЗ	_	волоконно-оптичні лінії зв'язку		
ГРР	_	газоподібні радіоактивні речовини		
MTPP	_	мілкодисперсні тверді радіоактивні речовини		
PP	_	радіоактивні речовини		

#### ВСТУП

Актуальність теми. Зростання використання інформаційних технологій, завантаженість радіочастотного діапазону, збільшення швидкостей передачі інформації обумовлює застосування атмосферно-оптичних ліній зв'язку. Швидкості передачі даних, які забезпечуються системами атмосферно-оптичних ліній зв'язку співрозмірні з волоконно-оптичними мережами, тому вони особливо затребувані в широкосмугових додатках на кінцевих ділянках. Обладнання, що підтримує зв'язок на великих дистанціях розширює область його використання і на магістральні мережі.

Дальність передачі інформації по атмосферно-оптичним лініям зв'язку є технічною характеристикою і її значення забезпечується як технічними характеристиками системи так і технічними характеристиками приладів і пристроїв, що входять до складу атмосферно-оптичної лінії зв'язку.

Одним з факторів зовнішнього середовища, що безпосередньо може вплинути на технічні характеристики елементної бази атмосферно-оптичних ліній зв'язку, є іонізуюче випромінювання. Джерелом такого випромінювання може бути як космічне випромінювання для авіаційно-космічної техніки, так і техногенна аварія, у результаті якої в навколишній простір за межі атомної електричної станції поширюється велика кількість радіоактивних речовин. При цьому необхідно враховувати, що в даний час на території України функціонують атомні електростанції з атомними енергоустановками, що введені в експлуатацію ще в 70-80-х роках минулого століття і використовуються для виробництва електроенергії.

В лютому 2022 року сталася військова агресія Росії проти України, вперше в історії розпочався військовий конфлікт на території країни з великими ядерними об'єктами. Внаслідок обстрілів Запорізької атомної електростанції, подій навколо Чорнобильської атомної станції виникла загроза руйнування ядерних реакторів та виникнення техногенних аварій.

Особливістю техногенних аварій є ймовірність викиду суміші газоподібних і мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин, які в процесі руху в довкіллі та

випадання на підстилаючу поверхню формують поле іонізуючого випомінювання з особливими, притаманними саме цій суміші радіаційними характеристиками.

Іонізуюче випромінювання є одним з факторів прояву зовнішнього впливу на технічний стан атмосферно-оптичних ліній зв'язку. Прояв цього впливу буде виявлятися через зміну під впливом іонізуючого випромінювання технічних характеристик у першу чергу найбільше радіаційно вразливих елементних приладів і пристроїв як телекомунікаційних так і атмосферно-оптичних мереж. Аналіз радіаційної стійкості елементної бази показав, що найбільш радіаційно вразливими конструктивними елементами є приймачі інфрачервоного випромінювання. Отже, технічний стан приймачів інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичної лінії зв'язку в умовах впливу іонізуючого випромінювання буде визначати загальний технічний стан системи. Вплив іонізуючого випромінювання проявляється у зниженні виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання [1]. Тобто в приймачі формується таке явище, як радіаційний ефект.

Завдання збереження параметрів і показників працездатності атмосфернооптичних ліній зв'язку в умовах впливу випромінювання вимагає встановлення видів радіаційного ефекту та попередньої оцінки ступеню радіаційного ефекту, що дозволить розробити відповідні рекомендації, спрямовані на збереження заданих значень виявляючої здатності.

Дослідженню проблем опромінення елементів радіоелектронної апаратури, нових методів підвищення ефективності функціонування телекомунікаційних систем в умовах впливу різних факторів зовнішнього впливу присвячено роботи вчених: Л.Н. Беркман, В.К. Стеклова, Я.А. Кременецької, В.Л. Банкета, А.О. Макаренка, В.С. Вавілова, О.Л. Туровського, В.О. Зуєва, Т.В. Машовець, І.Д. Конозенко, В.Н. Мордкович, А.М. Шалаєва, та зарубіжних вчених Г. Андерсона, Дж. Маєра, Г. Лейбфріда, Г. Ширмера, І. Ліндхарда, Й.-Х. Оцуки, О.Оена, Й. Гібонса, П. Сігмунда, Д. Нельсона, та ін.

Дослідженню проблем функціонування атмосферних каналів оптичних інформаційних систем присвячені роботи Ю.М. Тимофєєва, А.В. Васильєва, О.Р. Мілютіна, Р.А. Казаряна та ін.

Одним з методів, за допомогою якого проводиться виявлення й оцінка впливу іонізуючого випромінювання на атмосферно-оптичні лінії зв'язку, є метод прогнозування значень потужності дози і поглиненої дози випромінювання. Критичний аналіз методик, прийнятих для оцінки впливу наслідків техногенної аварії на атмосферно-оптичні лінії зв'язку дозволив виявити існуючі недоліки, що приводять до похибок оцінки ступеню впливу іонізуючого випромінювання і, як наслідок, не дозволяє в повній мірі визначити і шляхи збереження технічних характеристик авіаційно-космічної техніки в умовах впливу випромінювання.

Проведення аналізу методик оцінки впливу іонізуючого випромінювання на прилади і пристрої авіаційно-космічної техніки оцінюють в основному лише по ступеню проникаючої радіації, і не підходять для оцінки впливу на атмосфернооптичні лінії зв'язку.

Дані обставини вимагають вирішення актуального наукового завдання по розробці методики оцінки впливу іонізуючого випромінювання, сформованого сумішшю радіоактивних речовин, як наслідку техногенної аварії на приймачі інфрачервоного випромінювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до положень Законів України "Про інформацію", "Про концепцію національної програми інформатизації", "Про телебачення і радіомовлення", "Про телекомунікації"; Доктрини інформаційної безпеки України, затвердженої Указом Президента України від 25.02.2017 р. № 47/2017; Стратегії національної безпеки України, затвердженої Указом Президента України від 14.09.2020 № 392/2020, та плану наукової та науково-технічної діяльності Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

#### Мета і завдання дослідження.

**Мета** роботи полягає у підвищенні ефективності функціонування атмосфернооптичних ліній зв'язку в умовах впливу іонізуючого випромінювання.

Для досягнення поставленої мети в дисертації необхідно вирішити наступні завдання:

- **провести** аналіз існуючих методик оцінки впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії, на радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій;

- **провести** аналіз процесу формування в приймачах інфрачервоного випромінювання радіаційних ефектів, що виникли під впливом іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії;

- **провести** аналіз особливостей розвитку техногенної аварії, таких як тип, час стаціонарної роботи атомної енергетичної установки по виробленню електроенергії, а також кількість завантаженого в атомну енергетичну установку ядерного палива;

- оцінити коефіцієнти, що зв'язують концентрацію газоподібних радіоактивних речовин зі складу суміші аварійного викиду атомної енергетичної установки в атмосфері і на поверхні обладнання АОЛЗ;

- **оцінити** значення потужності і поглиненої дози гама - випромінювання в заданій точці, а також визначити границі радіоактивного зараження місцевості за заданим значенням потужності дози або дози іонізуючого випромінювання;

- **оцінити** вплив потужності дози і дози гама - випромінювання на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання;

- удосконалити метод встановлення видів радіаційних ефектів у приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку, що утворяться під дією іонізуючого випромінювання;

- встановити характеристики іонізуючих випромінювань, що формуються внаслідок техногенних аварій на радіаційно небезпечному об'єкті;

- встановити види радіаційних ефектів у приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку, що утворяться під дією іонізуючого випромінювання, і оцінити їхній вплив на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку;

- **розробити** модель та методику оцінки впливу іонізуючого випромінювання на приймачі інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку;

- обґрунтувати рекомендації, що дозволяють, на основі поданих в роботі методик, підвищити виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання.

Об'єкт дослідження – процес функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку.

Предмет дослідження – методи визначення впливу іонізуючого випромінювання на приймачі інфрачервоного випромінювання атмосфернооптичних ліній зв'язку.

Метоли лослілження. Дослідження базується на сучасних методах системного аналізу та моделювання. Метод системного аналізу використовувався при проведенні аналізу радіаційної стійкості елементної бази телекомунікаційних мереж. Метод математичного моделювання при визначенні характеристик суміші радіаційного випромінювання. Метод ймовірностного прогнозування використовувався при моделюванні радіоактивного зараження. Метод математичного моделювання використовувався при визначенні видів радіаційних ефектів у приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній звязку та оцінки їхнього впливу на виявляючу здатність приймачів і оцінки ефективності розроблених рекомендацій по зниженню впливу іонізуючого випромінювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що у дисертаційній роботі.

1. Удосконалено метод встановлення видів радіаційних ефектів у приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку, що утворяться під дією іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті. Вказаний метод, на відміну від існуючих, враховує характеристики суміші радіонуклідів аварійного викиду з радіаційно небезпечного радіаційних ефектів в об'єкту та дозволяє встановити види приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній звязку, ЩО формуються під їх впливом.

2. Вперше розроблено методику оцінки впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті, на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній звязку. Розроблена методика, наукова новизна якої полягає в тому, що вона враховує характеристики іонізуючого випромінювання та види радіаційних ефектів, інфрачервоного ЩО можуть сформуватись в приймачах випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку під його впливом та дозволяє оцінити вплив іонізуючого випромінювання на виявляючу здатність приймачів в залежності від аварійного радіаційно небезпечного об'єкту та характеристик відстані ДО іонізуючого випромінювання в точці оцінки впливу.

3. Вперше розроблена модель оцінки впливу гама-випромінювання, наукова новизна якої полягає в тому, що вона враховує характеристики іонізуючого випромінювання та види радіаційних ефектів та застосування якої дозволяє підвищити виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання в умовах впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті.

**Практичне значення одержаних результатів** у галузі розробки та створення атмосферно-оптичних ліній зв'язку полягає у тому, що запропонована в дисертаційній роботі модель та створена на її основі методика може стати основою для формування та створення практично реалізованих схем атмосферно-оптичних ліній зв'язку, що призначені для функціонування в умовах впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті.

1. Удосконалений метод встановлення видів радіаційних ефектів у приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку, що утворяться під дією іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті на відміну від існуючих дозволяє встановити види радіаційних ефектів та оцінити їх вплив на виявляючу здатність приймачів, яка при впливі на приймач дози іонізуючого випромінювання до 100 і більше рад може зменшитись до 50 і більше відсотків від номінальної.

2. Вперше розроблена методика оцінки впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті, на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку дозволяє встановити залежність зменшення виявляючої здатності приймачів інфрачервоного випромінювання від відстані до аварійного радіаційно небезпечного об'єкту та в залежності від атмосферних умов та характеристик суміші радіонуклідів, на відстанях від 8 до 10 км від вказаного об'єкту може зменшитись до 50 і більше відсотків.

3. Вперше розроблена модель оцінки впливу гама-випромінювання, наукова новизна якої полягає в тому, що вона враховує характеристики іонізуючого випромінювання та види радіаційних ефектів та застосування якої дозволяє підвищити виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання в умовах впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті. Запропонована в дисертаційній роботі модель та створена на її основі методика може стати основою для формування та створення практично реалізованих схем атмосферно-оптичних ліній зв'язку, що призначені для функціонування в умовах впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційних досліджень отримані автором особисто [1,7,11,13,14,16].

У роботах, які опубліковано у співавторстві, особисто здобувачу належать: у [2] досліджено методи визначення критеріїв ефективності функціонування атмосферно-оптичних систем; у [3] оцінена фізична сумісність обладнання у гібридній інформаційній мережі передачі інформації та та приведено залежність значень параметрів гібридної мережі від фізичної природи сигналу та середовища передачі. Запропонований метод, який базується на розподілі ресурсів неоднорідної телекомунікаційної мережі на канали з сигналами різної фізичної природи в різних середовищах передачі, що сприяє збільшенню сумісності каналів зв'язку. Розроблений пристрій для реалізації багатоканальної передачі інформації в гібридній мережі; у [4] проведено критичний аналіз існуючих методик оцінки функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку та обгрунтоване наукове завдання; у [5] досліджено вплив іонізуючого випромінювання на конструктивні елементи приймачів; в [6] розглянуто математичний апарат, який забезпечуватиме формалізовану постановку завдання для проведення досліджень по оцінці впливу іонізуючого випромінювання на приймачі атмосферно-оптичних систем; в [8,9] запропоновано алгоритми моделювання функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку в умовах іонізуючого випромінювання; в [14] запропоновано спосіб визначення впливу радіоактивності на конструктивні елементи атмосфернооптичних систем.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на XII Міжнародній науково-технічній конференції студентства та молоді «Світ інформації та телекомунікацій», на науково-технічній конференції «Сучасні інфокомунікаційні технології» в Державному університеті телекомунікацій в 2021 році та міжнародних конференціях: International scientific and practical conference «Technical sciences: the analysis of trends and development prospects»: Conference proceedings, July 2–3, 2021. Prague: «Baltija Publishing», 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 10-14 October 2022. Kyiv, Ukraine.

**Публікації**. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 16 наукових праць.

Основні наукові положення викладено у 16 наукових працях, серед яких 9 статтей [1–9], з яких [4–9] опубліковані у спеціалізованих фахових виданнях України, 3 опубліковані у закордонних наукових виданнях [1-3], отримано 2 патенти України на корисну модель [14–15] та висновок про видачу патенту України на винахід (корисну модель) [16], метеріали досліджень використані в навчальному посібнику [17]. За матеріалами виступів на науково-технічних конференціях опубліковано 4 тези доповідей [10–13].

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 3 розділів, 3 додатків та списку використаних джерел із 93 найменувань на 12 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 158 сторінок, з них 134 сторінок основного тексту.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ РАДІАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ В АТМОСФЕРНО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ

# 1.1. Роль і місце атмосферно-оптичних ліній зв'язку в системах передачі інформації

Атмосферно-оптичні лінії зв'язку дозволяють відмовитися від кабелів, відповідно виключивши витрати на будівництво телефонних мереж та обслуговування кабелів; забезпечити створення недорогих ліній зв'язку; скоротити терміни і витрати на проєктування [12].

Особливостями атмосферно-оптичних ліній зв'язку є простота монтажу апаратури, що не вимагає особливих витрат та спеціального інсталяційного обладнання.

Атмосферно-оптичний канал в порівнянні з радіоканалом, який потребує бронювання радіочастот є найбільш вигідним, дешевим і простим в реалізації способом організації зв'язку. Для розробки способів забезпечення радіаційної стійкості будемо вважати, що основною радіаційною загрозою АОЛЗ є одиничні події, викликані впливом високоенергетичних частинок. В результаті одиничної події можуть виникнути несправності, які діляться на стійкі (сталі) і виправні відмови (рис.1.1).

Несправності електронних пристроїв в результаті радіаційного впливу можуть обумовлюватися їхньою конструкцією, робочим середовищем, призначенням, витратами на їх створення.

Найбільш часто виправні відмови, що розглядаються як поодинокі збої, проявляються в зміні логічного стану елемента або логічного виходу, тобто в зміні імпульсного перехідного процесу комбінації логічної схеми. Несправності цього типу можуть виникнути не тільки в логіці, а й у блоках управління і блоках пам'яті (в оперативному запам'ятовуючому пристрої). Для усунення ймовірності одиночного збою часто застосовують методи простого відбору приладу з вбудованою радіаційної стійкістю або періодичного відновлення його вихідного стану. Поодинокі події можуть викликати нестаціонарні струми малої тривалості і великої амплітуди, які здатні розрядити вузли системи, приводячи до втрати інформації або ініціювання режиму замикання, і тим самим - до катастрофічної (сталої) відмови.



Рис. 1.1. Види радіаційного впливу, які приводять до стійких та виправних відмов.

Методів оперативного відновлення або усунення будь-якого впливу радіації на робоче середовище немає. Щоб забезпечити радіаційну стійкість конкретного проєктованого пристрою необхідно знати де і як він буде використовуватися. Так, для авіаційно-космічних систем основну увагу приділяють забезпеченню стійкості до накопичення радіаційної дози, тоді як при створенні приладів для наземних додатків цей показник не такий важливий [32].

При цьому слід враховувати, що в міру зменшення топологічних норм мікросхем, збільшення їх швидкодії та складності радіація викликає нові ефекти, які починають домінувати в схемі. В результаті для реалізації варіанту мікросхеми з підвищеною радіаційною стійкістю потрібно встановлювати чутливість

проєктованої системи до всіх потенційних радіаційних загроз і вдосконалювати операції пом'якшення їх впливу.

Таблиця 1.1.

Характеристика	Геостаціонарна	Орбіта глобальної	Низька	Орбіта
орбіти	орбіта	супутникової	навколоземна	метеорологічних
		системи	орбіта	супутників
		позиціонування		
Апогей, км	35796	20189	1500	848
Перигей, км	35795	20172	1600	824
Нахил, град	-	55	60	99
Загальна доза	6600	59600	17300	1260
опромінення,				
рад/Ѕі/год				

Оцінка загального рівня радіації в космічному просторі (2021 рік).

Світлове випромінювання, що виникає в структурах інтегральних схем при бомбардуванні високоенергетичними частинками веде до генерації фотострумів, які здатні змінювати робочі характеристики інтегральних схем, що в свою чергу призводить до збоїв у передачі інформації і повному відказі при аварійних ситуаціях.

Для проведення аналітичних оцінок і визначення потенційних можливостей різних варіантів побудови АОЛЗ вводять поняття еквівалентного ресурсу терміналу µ, що визначається наступним співвідношенням:

$$\mu = \frac{P_{\text{прд}} \cdot D_{\text{прм}}^2}{\beta_{\text{прд}}^2 \cdot P_{\text{прм}}} \cdot \tau_{\text{прд}} \cdot \tau_{\text{прм}}$$
(1.1)

де: *Р*<sub>прд</sub> – вихідна потужність лазерного передавача, мВт;

*D*<sub>прм</sub> – еквівалентний діаметр антени лазерного приймача, м;

 $\beta_{\rm прд}$  – кутова конусність променя передавача в мрад;

 $P_{\text{прм}}$  – порогова чутливість приймача в пВт/ (Гц)1/2;

*t*<sub>прд</sub> – коефіцієнт пропускання передавального тракту;

*t*<sub>прм</sub> – коефіцієнт пропускання приймального тракту

З урахуванням введеного поняття рівняння передачі АОЛЗ в атмосфері:

$$\mu = L^2 \cdot exp\left(2,75 \cdot \frac{L}{S_k}\right) \cdot \sqrt{10} \cdot \ln\left(\frac{1}{k}\right) \cdot C \cdot 10^{-6}$$
(1.2)

де: *S*<sub>*k*</sub>-метеорологічна дальність видимості;

*L* – дальність зв'язку в кілометрах;

С – швидкість передачі інформації в Мбіт/с;

*k* – ймовірність помилки на біт інформації.

Маючи залежність µ від дальності зв'язку і S<sub>k</sub>, знаходять ймовірність зв'язку. Значення S<sub>k</sub> має випадковий характер і суттєво залежить від часу.

Як будь-яка випадкова величина  $S_k$  має функцію розподілу ймовірностей  $F(S_k)$ , знаючи яку можна знайти залежність ймовірності зв'язку  $P_{36}$  від стану атмосфери.

З рівняння передачі випливає, що кожному значенню дальності зв'язку *L* відповідає мінімальна метеорологічна дальність видимості *S<sub>k</sub>*\*.

При цьому ймовірність зв'язку буде визначатися умовою:

$$P_{36} = P(S_k > S_{k^*}), \tag{1.3}$$

де: *S<sub>k</sub>* – довільне значення метеорологічної дальності видимості;

 $S_{k^*}$  — значення метеорологічної дальності видимості, імовірність неперевищення якого дорівнює  $F(S_{k^*})$ .

При цьому ймовірність зв'язку і функція розподілу ймовірностей метеорологічної дальності видимості пов'язані співвідношенням  $P_{36}=1-F(S_k)$ .

Таким чином, знаючи закон розподілу ймовірностей метеорологічної дальності видимості, можна визначити ймовірність зв'язку. Одним із способів визначення закону розподілу *S<sub>k</sub>* є вимірювання і статистична обробка отриманих значень.

Основні позитивні особливості АОЛЗ: нечутливість до перешкод радіодіапазону, що дозволяє використовувати оптичні лінії в місцях з великою насиченістю радіотехнічних систем.

Також до переваги передачі сигналів на оптичних частотах можна віднести більше відношення потужності прийнятого сигналу до потужності випромінювання при менших апертурах антен передавача і приймача. Також краще просторове розширення при менших апертурах антен передавача і приймача; малі габарити передавального і приймального модулів, які використовуються для зв'язку на відстань до 2 км; висока пропускна здатність; захищеність від електромагнітних завад. З вузькою діаграмою оптичних антен пов'язана така перевага АОЛЗ як захищеність каналу зв'язку від несанкціонованого доступу. За цим критерієм дана технологія є унікальною [12].

При використанні волоконно-оптичних і мідних кабелів та радіоліній для захисту інформації потрібно використовувати спеціальні коди. У відкритій оптичній лінії захист забезпечується за рахунок вузької діаграми спрямованості випромінювання. За допомогою зовнішніх інфрачервоних приладів можна виявити наявність каналу зв'язку, але для перехоплення інформації необхідно встановити приймач безпосередньо в канал зв'язку, що практично неможливо [3]. Крім того АОЛЗ мають практично необмежені швидкісні можливості.

Фізичні обмеження АОЛЗ по швидкості передачі інформації визначаються тільки власною частотою несучої електромагнітної хвилі (1015-1016 Гц), так як на відміну від ВОЛЗ середовище передачі (атмосфера) не вносить тимчасової дисперсії сигналів. Цей фактор є у багатьох випадках визначальним при виборі засобів передачі.

У багатьох випадках споживачів приваблює відсутність необхідності погодження частотного діапазону, оскільки оптичний діапазон не регламентований. Достатньою умовою відсутності впливу двох близько розташованих ліній є кутове або лінійна відстань між діаграмами спрямованості випромінювання передавачів, при якому випромінювання однієї лінії не потрапляє на приймачі інших лінії. Це, як правило 1, 2, 5, 10 метрів.

Багато виробників відзначають як позитивну характеристику АОЛЗ – швидкість організації лінії зв'язку. Дійсно, крім загальних часових витрат, пов'язаних з оформленням оренди місць установки апаратури, наприклад, на даху будівлі і підведення необхідних комунікацій, час на інсталяцію каналу при відпрацьованні технології обчислюється годинами.

Використання АОЛЗ доцільно в районах, де іншими засобами неможливо або дорого забезпечити передачу інформації.

Розміщення обладнання в кліматичному регіоні, відрізняються стабільно гарною погодою, де середнє значення  $S_m > 10$  км, а дисперсія цього значення в різний час року невелика [2]. Доцільна установка таких ліній зв'язку на ділянках довжиною до 1,5 км. На цій дистанції при динамічному діапазоні 50-60 Дб можна забезпечити рівень доступності 99,9% навіть в регіонах з поганими кліматичними умовами.

АОЛЗ залишається єдиним варіантом при необхідності забезпечення високошвидкісного каналу зв'язку в місцях, де складно або збитково будувати оптоволоконну лінію.

Атмосферно-оптична лінія зв'язку може складатися з двох приймальнопередавальних пристроїв (рис.1.2), які розташовані у межах прямої видимості на обох кінцях лінії і спрямованих один на одного [18,19].



Рис. 1.2. Атмосферно-оптична лінія зв'язку.

Передавач містить генератор-лазер і модулятор його оптичного випромінювання переданим сигналом. Модульований лазерний промінь атмосферно-оптичної лінії зв'язку спрямовується у бік приймача. У фотоприймачі виконується детектування сигналу і виділення переданої інформації.

Структурна схема приймально-передавального пристрою АОЛЗ представлено на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Структурна схема приймально-передавального пристрою АОЛЗ

Передавальна частина системи містить підсилювач електричних сигналів, генератор струму накачування, що виконує роль перетворювача напруги в струм і каскаду джерела випромінювання (лазера). Оптичне випромінювання фокусується за допомогою антени.

Приймальна частина містить антену, фокусуючи випромінювання на приймальну площадку фотодіода. Каскад з фотодіодом через погоджувальний каскад підключений до підсилювачів сигналів 1, 2.

Живлення передавального і приймального пристрою здійснюється від блоку живлення.

Як джерела випромінювання можуть використовуватися напівпровідникові лазери, газові лазери та лазери на основі твердого тіла.

Детектування оптичного сигналу може здійснюватися за допомогою звичайних і лавинних фотодіодів, а також фотоелектронних перемножувачів.

В оптичних системах може застосовуватися стабілізація потужності оптичного випромінювання. Цифрові системи зв'язку містять також, як правило, порогові пристрої для регенерації прямокутних імпульсів з метою відновлення форми імпульсів.

Окрім зазначених основних вузлів, станція атмосферно-оптичної лінії зв'язку може бути забезпечена монокуляром – цілевказівником і пристроєм автоматизованого юстування. Разом з цим можуть бути передбачені системи стабілізації, самодіагностики, індикації робочих параметрів тощо.

Поширення лазерного променю в атмосфері значною мірою залежить від метеорологічних умов, радіації, від наявності диму, пилу й інших забруднень повітря. Також атмосферна турбулентність може привести до флуктуації показника переломлення середовища, коливань променю і перекручень прийнятого сигналу. Однак, незважаючи на зазначені проблеми, атмосферний лазерний зв'язок виявився цілком надійним на відстанях декількох кілометрів.

У перших АОЛЗ використовувався гелій-неоновий лазер з довжиною хвилі випромінювання 0,63 мкм і потужністю декілька десятків міліват. Амплітудна модуляція здійснювалася модулятором на базі ефекту Поккельса, а фотоприймачем служив фотоперемножувач.

Поширення АОЛЗ у багатьох країнах світу почалося, коли були створені недорогі напівпровідникові лазери потужністю в 100 мВт і більше. У цей же час виникла потреба в лазерному зв'язку, оскільки почали стрімко розвиватися інформаційні технології. Різко збільшується кількість абонентів, що вимагають надання таких телекомунікаційних послуг, як Інтернет, ІР-телефонія, кабельне телебачення з великою кількістю каналів, комп'ютерні мережі тощо.

На сьогодні оптичний діапазон цілком вільний, і його використання не вимагає узгодження частот [24,29]. Він дозволяє забезпечити високу швидкість передачі інформації, її захист від несанкціонованого доступу, завадостійкість, низьке енергоспоживання. Поширення випромінювання в атмосфері супроводжується цілою низкою явищ лінійної і нелінійної взаємодії світла із середовищем. При цьому жодне з цих явищ не виявляється окремо. За суто якісними ознаками зазначені явища можна поділити на основні групи: поглинання і розсіювання молекулами газів повітря, ослаблення на аерозолях (пил, дощ, сніг, туман) і флуктуації випромінювання при турбулентності атмосфери, іонізуюче випромінювання.

Поглинання світлового потоку видимого й інфрачервоного діапазонів визначається, насамперед, молекулярним поглинанням, украй нерівномірним за частотою. Воно максимальне на резонансних частотах молекул повітря, води, вуглекислого газу, озону й інших компонентів атмосфери.

Ділянки спектра з незначним поглинанням обумовлені так званими вікнами прозорості. Якщо лазерне випромінювання потрапляє в центр сильної лінії спектра, то воно поглинається атмосферою на 100 % навіть на невеликій відстані. Тому для АОЛЗ слід брати лазери з випромінюванням, що знаходиться на ділянках спектра атмосфери, зайнятих широкими вікнами прозорості чи в проміжках між слабкими лініями поглинання, у мікровікнах прозорості.

До недоліків оптичних атмосферних систем передачі можна віднести: низьку придатність для радіомовлення через високу направленість лазерного променя; необхідність високої точності наведення антен передавача та приймача; низький коефіцієнт корисної дії оптичних випромінювачів; порівняно високий рівень шумів в приймачі, який частково обумовлений квантовою природою процесу, детектуванням оптичного сигналу; вплив характеристик атмосфери та параметрів іонізуючого випромінювання на надійність зв'язку.

Окрім молекулярного поглинання поширенню променю заважає молекулярне розсіювання променистої енергії мікрозгустків молекул повітря, що мають різну щільність і різні показники заломлення.

Атмосфера являє собою механічну суміш з газів, пару, крапель рідини і твердих частинок. У ній завжди в змінній кількості присутні пил, дим, кришталики льоду. Тому атмосфера є аерозолем, склад якого безупинно змінюється через перемішування.

Усі типи атмосферних аерозолей можна об'єднати в такі основні класи: хмари, тумани, димки, намерзання і опади – дощ чи сніг. У хмарах і туманах найбільш імовірне значення радіуса частинок складає 5 – 6 мкм, а в димках на 1– 2 порядки менше. Тому ослаблення мікронного випромінювання в димках нижче. При цьому характерно, що ослаблення оптичного сигналу при дощі та снігопаді менше, ніж при тумані (табл. 1.2).

#### Таблиця 1.2.

Погодні умови	Загасання, дБ/км
Ясна погода	0-3
Дощ слабкий/сильний	3-6/6-17
Сніг	6-26
Туман легкий/густий	20-30/50-100

Ослаблення випромінювання в діапазоні 0,85 мкм залежно від погодних умов

Головними обмежувачами дальності АОЛЗ є сніг і густий туман, для яких аерозольне ослаблення максимальне. На поширення лазерного променю значний вплив чинить також турбулентність атмосфери, тобто випадкові просторово-часові зміни показника заломлення, викликані пересуванням повітря, флуктуаціями його температури та щільності. Тому світлові хвилі, що поширюються в атмосфері, піддаються не тільки поглинанню, але і флуктуації переданої потужності.

Найпростішим способом боротьби із завмираннями є збільшення розміру приймальної оптичної антени чи використання декількох приймальних антен. При цьому відбувається усереднення флуктуацій випромінювання, прийнятого окремими елементами, і вирівнювання сигналу. Інший спосіб полягає в некогерентному додаванні в одному каналі випромінювання декількох лазерів.

При практичному використанні лазерів у системах атмосферно-оптичного зв'язку необхідно враховувати сукупний вплив взаємодії випромінювання. Цей вплив може змінюватися в надзвичайно широкому діапазоні. Тому для забезпечення працездатності АОЛЗ на заданій дистанції з визначеним рівнем надійності (чи доступності каналу) необхідно мати достатній динамічний запас енергетичного потенціалу.

Для характеристики взаємодії оптичної хвилі на основі аналізу зміни енергії випромінювання, що проходить крізь середовище розглядають об'ємний коефіцієнт ослаблення ад. Коефіцієнт ослаблення можна представити як

$$\alpha_{\lambda} = \sigma_{\lambda} + k_{\lambda} \tag{1.3}$$

де:  $\sigma_{\lambda}$  – об'ємний коефіцієнт розсіювання;

і  $k_{\lambda}$  – об'ємний коефіцієнт поглинання.

Ці коефіцієнти залежать від довжини (частоти) хвилі і розташування точки спостереження, але не залежать від напрямку випромінювання в ізотропному середовищі.

З огляду на наявність у спектрах молекулярного поглинання великої кількості окремих ліній поглинання, що виникають при переходах молекул з одного енергетичного стану в інший, сумарний коефіцієнт поглинання для конкретної молекули можна записати як

$$k_k(v) = \sum_i k_{ik}(v), \tag{1.4}$$

де:  $k_i(v)$  – коефіцієнт поглинання окремої і-ї спектральної лінії.

Слід зазначити, що співвідношення (1.4) є наближеним. В основу співвідношення покладено припущення, що окремі спектральні лінії поглинання формуються незалежно одна від одної. Іншими словами, переходи молекул між різними енергетичними станами здійснюються незалежно. Насправді, як випливає із загальної теорії молекулярного поглинання в газах, це не зовсім так. Принцип адитивності особливо явно порушується, якщо відповідні лінії поглинання істотно перетинаються. Цей ефект у молекулярній спектроскопії насить назву інтерференції спектральних ліній. В більшості випадків (для простоти) користуються співвідношенням (1.4), забуваючи, його приблизність, не однак, про i

використовують більш строгий вираз для поглинання сукупності близько розташованих спектральних ліній в особливих випадках.

Якщо врахувати, що в атмосфері Землі присутня велика кількість різних атмосферних газів, то коефіцієнт молекулярного поглинання повітря буде:

$$k_k(v) = \sum_i k_{ik}(v) = \sum_k \sum_i k_{ik}, \qquad (1.5)$$

де індекс підсумовування *k* відповідає різним газам, що входять до складу повітря, а індекс *i* – окремим лініям кожного газу.

Таким чином, загальний коефіцієнт молекулярного поглинання в атмосфері являє собою, у першому наближенні, суму коефіцієнтів поглинання в окремих лініях поглинання різних атмосферних газів.

Загалом доступність лінії АОЛЗ залежить від припустимого ослаблення потужності сигналу між передавачем і приймачем на заданій відстані між терміналами і від статистики розподілу максимальної видимості у місці установки лінії. Чим більший запас потужності системи, тим менше погодні умови впливають на працездатність лінії.

Системи АОЛЗ можуть використовуватися не тільки в районі прикінцевих засобів зв'язку, але і як вставки у волоконно-оптичні лінії на окремих важкодоступних ділянках; при створенні рознесених у просторі локальних комп'ютерних мереж; при організації зв'язку між центрами комутації і базовими станціями стільникових мереж; для оперативної прокладки ліній зв'язку при обмеженому часі на монтаж. Тому останнім часом зростає інтерес виробників до цього нового і перспективного сектора ринку.

Технічні характеристики сучасних атмосферно-оптичних ліній зв'язку наведені в табл. 1.3.

Технології АОЛЗ, незважаючи на принциповий недолік цієї технології – істотну залежність працездатності лінії зв'язку від зовнішніх факторів забезпечують: високі швидкості передачі, відсутність частотного ліцензування, швидкість організації каналу, що дозволяє їй зайняти своє місце в системі передачі інформації.

Таблиця 1.3.

Виробник	Початкова	Тип джерела	Дальність	Примітка
(модель)	потужність,	випромінювання	зв'язку	-
	мВт		(при $S_k =$	
			250 м), м	
PAV Data Systems	300	Лазер	716	Включає
(SkyCell 4E1-				3 лазери
4000)				
НИИПП	200	Лазер	614	Включає
(Квантово-				4 лазери
оптичні системи)				
(KC-300 (500)				
4E1)				
Катарсис	500	Світлодіод	544	
(БОКС Е2-ОСЗ)				
Державний	160	Лазер	522	Включає
приладовий завод				вбудований
(MICT 100/500)				мультиплексор
				4xE1
LaserBit Comms	280	Лазер	500	
(LB 2500E2)				
MRV Comms	22	Лазер	480	
(TS-940/4E1)				
Sceptre (ОКБ	100	Світлодіод	424	
MEI)				
(EasyLink 4)				
ISONA Comms	640	Лазер	776	
(Sonabeam 52M)				
LightPointe	16	Лазер	568	
(FST 52/4000)				

Технічні характеристики атмосферно-оптичних ліній зв'язку

Таким чином, АОЛЗ на сьогодні забезпечують передачу великих обсягів інформації з високою надійністю на відстанях в одиниці кілометрів у земних умовах, а у космічному просторі на десятки тисяч кілометрів [25,26,27,28].

Зв'язок між наземною станцією та супутниками за допомогою АОЛЗ також забезпечує дуже високу швидкість передачі. При цьому потрібні потужні оптичні

випромінювачі та приймачі зі спеціальною оптикою, оскільки сигнал піддається завадам від турбулентності в атмосфері та розсіюванню. Для проєктування, налаштування та тестування передавальної оптики, наприклад для довжин хвиль у діапазоні від 900 нм до 1700 нм використовуються спеціальні датчики хвильового фронту (наприклад датчики Shack-Hartmann). Високі показники датчиків хвильового фронту в поєднанні з адаптивною оптикою дозволяють коригувати спотворення хвильового фронту, які лазерний промінь повинен пройти на своєму шляху через атмосферу.

Технічні характеристики космічних атмосферно-оптичних ліній зв'язку наведені в табл. 1.4.

#### Таблиця 1.4.

Параметр	Значення	
Робочі довжини хвиль, мкм	0,81—0,87	
Середня випромінювана потужність, мВт	50	
Швидкість передачі інформації, Мбіт/с/канал	1—120	
Діаметр антени геостаціонарного/низькоорбітального супутника, м	0,35/0,2	
Динамічна/статична помилка наведення, мкрад	20/0,5	
Ймовірність помилкового прийому символу	10 <sup>-6</sup>	
Дальність зв'язку, км	45 000	

Технічні характеристики космічних атмосферно-оптичних ліній зв'язку

Таким чином аналізуючи вплив зовнішніх факторів і незважаючи на велике різноманіття АОЛЗ цілісні методики оцінки впливу іонізуючого випромінювання на елементні прилади і пристрої АОЛЗ на сьогодні відсутні.

Існуюі методики оцінюють вплив радіаційних дефектів в елементній базі на ефективність застосування АОЛЗ по впливу тільки проникаючої радіації. А тому існує потреба в проведенні подальших досліджень по врахуванню впливу на
приймачі атмосферно-оптичних ліній доз іонізуючого випромінювання, впливу радіаційних дефектів, що можуть статися під дією іонізуючого випромінювання.

# 1.2. Аналіз впливу іонізуючого випромінювання на конструктивні елементи атмосферно-оптичних ліній зв'язку

Радіація представляє собою випромінювання, яке йде від якого-небудь тіла. Світло, радіохвилі – усі вони відрізняються визначеним діапазоном довжини хвиль. Чим коротше довжина хвилі, тим більшу енергію переносить випромінювання. Енергію цих хвиль прийнято вимірювати в електронвольтах (eB). У таких одиницях світлові хвилі, що виникають під час взаємодії молекул, які сприймаються за допомогою зору, мають енергію близько 2 eB. Ядерні випромінювання виникають під час перетворення атомних ядер. Наприклад, радіоактивний цезій-137 випускає гама-кванти з енергією 661 кілоелектронвольт (кеB). Під час оцінки ефекту взаємодії прийнято поділяти випромінювання на іонізуючі та неіонізуючі. Іонізуючі випромінювання мають ряд загальних властивостей, два з яких – здатність проникати через матеріали різної товщини й іонізувати повітря і клітини організму – заслуговують особливо пильної уваги.

Іонізуюче випромінювання – випромінювання, енергії якого достатньо для іонізації середовища, що опромінюється. Іонізація – це процес поділу електрично нейтрального атома на дві протилежно заряджені частинки: негативний електрон і позитивний іон. Для цього необхідно затратити деяку енергію, яка у більшості атомів знаходиться в межах від 9 до 34 еВ. Якщо енергія, яка передана атому, менша за енергію, необхідну для виривання електронів, то іонізації не відбувається. В цьому випадку може відбутися збудження атома. Збуджений атом має збиток енергії, яка вивільняється у вигляді випромінювання у разі повернення атома в нормальний стан. Електрон, вирваний із атома в результаті іонізації, як правило, не залишається довго у вільному стані: він «прилипає» до нейтрального атома або нейтральної молекули, створюючи негативний іон. Таким чином, у звичайних умовах іони створюються парами. Іони, які виникли, зникають у результаті їх рекомбінації, тобто процесу возз'єднання 13 негативних та позитивних іонів, у якому створюються нейтральні атоми або молекули.

Під час середньої роботи на один акт іонізації у повітрі, яка дорівнює 34 eB (eB=1,602·10-19Дж), мінімальна частота електромагнітних хвиль, що мають іонізуючі здібності, визначається в такий спосіб:

$$v_{\min} = \frac{E}{h} = \frac{34 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \, \text{Дж}}{1,055 \cdot 10^{-34} \, \text{Дж} \cdot c} \approx 5 \cdot 10^{16} \, \Gamma \mu,$$

де h – стала Планка.

Частота  $v_{min}$  відповідає глибокій ультрафіолетовій області спектра електромагнітних хвиль. Отже до іонізуючого випромінювання належать ультрафіолетові та рентгенівські промені, гама-кванти. Причому, чим вища їхня частота, тим більша їхня енергія (Е) і тим сильніша їхня проникна здатність.

У табл. 1.5 наведені результати обчислень для трьох різних енергій гамаквантів, радіусів ділянок місцевості в метрах, що визначають 50, 75 і 90 % повної потужності дози в точці спостереження Б, що перебуває на трьох висотах над нескінченно протяжною ділянкою забруднення [30].

Таблиця 1.5

Радіуси ділянок забруднення місцевості залежно від енергії гама-квантів і висоти вимірювання.

Н, м	$E_{\gamma} = 0,41 \text{ MeB}$			$E_{\gamma} = 1,25 \text{ MeB}$			$E_{\gamma} = 2,8 \text{ MeB}$		
	50 %	75 %	90 %	50 %	75 %	90 %	50 %	75 %	90 %
1	6	40	122	6	42	130	7	50	140
10	8	86	170	38	92	180	45	115	200
50	12	60	258	98	173	280	112	205	300

Як видно з табл. 1.5, на незначній висоті над землею доза гамавипромінювання в основному визначається джерелами, що перебувають не далі ніж 100–150 м від точки вимірювання. Гама-активність більш віддалених ділянок створює лише незначний відсоток повної дози. Ці дані актуальні для продуктів техногенної аварії, тому що радіуси ділянок, що однаково впливають на потужність експозиційної дози в точці спостереження, недостатньо залежать від первинної енергії гама-квантів. За умовами впливу міграції радіоактивних продуктів техногенної аварії, які потрапляють у глибину ґрунту, утворюється об'ємне забруднення верхнього шару ґрунту глибиною кілька сантиметрів.

У верхньому шарі ґрунту утримується близько 80–95 % всієї радіоактивності. Для обчислення потужності експозиційної дози над поверхнею гама-активного шару ґрунту необхідно врахувати поглинання випромінювання в цьому шарі. Розрахунки показують, що ефективний радіус дії об'ємного джерела значно менший від ефективного радіуса дії поверхневого джерела.

Так, на висоті 1м над поверхнею землі 90 % повної дози гама-випромінювання збирається з ділянки, обмеженої 15–20 м, а на висоті 25 м із ділянки з радіусом 100 м.

Структура гама-поля над радіоактивно зараженою місцевістю визначається, по-перше, радіоактивним розпадом продуктів техногенної аварії та пов'язаною з ним зміною енергетичного складу гама-квантів, що випромінюються і, по-друге, характером взаємодії гама-випромінювання радіоактивного розпаду з повітрям і ґрунтом. Через розсіяювання від поверхні землі та від шару повітря в точці, що розглядається, гама-кванти потрапляють практично з усіх напрямків [30].

Для продуктів техногенної аварії з віком від 1 год до 10 діб потужність дози гама-випромінювання із верхнього напівпростору над поверхнею землі, тобто розсіяних у повітрі, становить усього 7–8 % повної потужності дози, а потужність дози розсіяного випромінювання в повітрі і грунті становить загалом приблизно 15%. Таким чином, потужність дози випромінювання, що потрапляє в дану точку з різних напрямків, неоднакова. Кутовий розподіл гама-випромінювання над плоским ізотропним джерелом у точці Б на висоті Н від поверхні землі характеризується

кутами  $\Theta$  у вертикальній площині та кутами  $\Psi$  у горизонтальній азимутальній площині.

На рис. 1.4 показано, що області падіння випромінювання в точку Б, що характеризуються кутами  $\Theta$  від 0 до 90° (від 0 до  $\pi/2$ ), відповідають випромінюванню з нижнього напівпростору, а області з кутами  $\Theta$  від 90° до 180° (від  $\pi/2$  до  $\pi$ ) – випромінювання з верхнього напівпростору.



Рис. 1.4. Схема обчислення у вертикальній площині.

З нижнього напівпростору в точку Б надходить як пряме випромінювання, що не зазнало взаємодії з поверхнею землі та шаром повітря, так і випромінювання, розсіяне землею та повітрям.

З верхнього напівпростору в точку Б потрапляє тільки розсіяне випромінювання. На рис. 1.5 поданий кутовий розподіл потужності дози гамавипромінювання на різних висотах Н над плоским ізотропним джерелом, зараженим продуктами поділу з віком 1,12 год.

З рис. 1.5 видно, що на малих висотах у точку спостереження надходять випромінювання головним чином за напрямами, близькими до паралельних щодо площини джерела ( $\Theta \cong 90^\circ$ , cos  $\Theta \cong 0$ ), а на великих висотах випромінювання втрачає свої похилі компоненти та потрапляє в точку спостереження в основному за напрямками, близькими до вертикальних ( $\Theta \cong 0^\circ$ , cos  $\Theta \cong 1$ ).



Рис. 1.5 Кутові розподіли потужності дози гама-квантів для ідеального плоского джерела радіоактивних опадів на різних висотах над ґрунтом.

Результати вимірювань кутового розподілу у вертикальній площині потоку гама-квантів різної енергії на висоті біля 1м над поверхнею землі, зараженої радіоактивними продуктами на 9 добу після техногенної аварії, наведені на рис. 1.6 і 1.7. Спільним для цих рисунків є наявність максимуму інтенсивності випромінювання в напрямку, близькому до 90°.



Рис. 1.6. Діаграми кутового розподілу щільності потоку гама-квантів з енергіями 84–98 кеВ; 98–113 кеВ; 158–174 кеВ у вертикальній площині.



Рис. 1.7. Діаграми кутового розподілу щільності потоку гама-квантів з енергіями 657–754 кеВ, 1558–1663 кеВ у вертикальній площині.

Для малих енергій інтенсивність випромінювання знизу ( $\Theta \cong 0^{\circ}$ ) у 3–4 рази менша, ніж з напрямку близького до горизонтального ( $\Theta \cong 85^{\circ}$ ).

Для більш високих енергій горизонтальна радіація майже на порядок більша за випромінювання знизу. Це пояснюється тим, що під кутами меншими, але близькими до 90°, у точку спостереження потрапляє випромінювання з площини, що в багато разів перевищує площу, яка відповідає кутам, близьким до 0°.

Кутові спектри гама-квантів на радіоактивно зараженій місцевості в точці на висоті 1 м із віком продуктів поділу 9 діб надані на рис. 1.8, 1.9 та 1.10.



Рис. 1.8. Спектральнокутовий розподіл гама-квантів для  $\Theta = 180$ .

З рис. 1.8 видно, що потік гама-квантів зверху являє собою розсіяне випромінювання та містить у собі тільки складові малих енергій приблизно до 0,4 МеВ.

Потік випромінювання під кутом 90° (рис. 1.9) є горизонтальною компонентою та містить у собі складові в діапазоні енергій 0,05–1,6 MeB.



Рис.1.9. Спектрально-кутовий розподіл гама-квантів для  $\Theta = 90^{\circ}$ .

На графіку є чотири максимуми. Перший максимум найбільший та обумовлений накопиченням розсіяного випромінювання малих енергій порядку 0,1 МеВ. Другий максимум у області енергій порядку 0,5 МеВ і третій – 0,7 МеВ. З рис. 1.8 видно, що потік гама-квантів зверху являє собою розсіяне випромінювання та містить у собі тільки складові малих енергій приблизно до 0,4 МеВ. Потік випромінювання під кутом 90° (рис. 1.9) є горизонтальною компонентою та містить у собі складові в діапазоні енергій 0,05–1,6 МеВ. На графіку є чотири максимуми. Перший максимум найбільший та обумовлений накопиченням розсіяного випромінювання малих енергій порядку 0,1 МеВ. Другий максимум у області енергій порядку 0,1 МеВ. Другий максимум у області енергій порядку 0,1 МеВ. Другий максимум у області енергій порядку 0,5 МеВ і третій – 0,7 МеВ.

Окремий пік з енергією 1,6 МеВ відповідає гама-квантам радіоактивного ізотопу лантану-140, що входить до складу продуктів поділу. На рис. 1.10. представлено спектрально-кутовий розподіл гама-квантів для  $\Theta = 0^{\circ}$ .



Рис. 1.10. Спектрально-кутовий розподіл гама-квантів для  $\Theta = 0^{\circ}$ .

Випромінювання, що надходить від верхнього напівпростору, має значно меншу середню енергію (нижчу за 0,2 MeB). Таким чином, середня енергія гамавипромінювання продуктів техногенної аварії стає меншою під час випадіння їх на місцевість за рахунок розсіяння квантів повітрям та ґрунтом [30]. Рис. 1.11. відображає залежність середньої енергії гама-квантів від кута падіння в точку спостереження. Графік показує, що горизонтальна компонента (Θ = 70–90°) є найбільш жорсткою та має енергію близько 0,7 MeB.



Рис. 1.11. Залежність середньої енергії гама-випромінювання від кута падіння в точку спостереження.

Іонізуюче випромінювання є одним із факторів зовнішнього середовища, яке впливає на технічний стан атмосферно-оптичних ліній зв'язку. Під технічним станом будемо розуміти визначену сукупність схильних до змін під дією іонізуючого випромінювання властивостей АОЛЗ, які встановлені технічною документацією [1].

За принципом виконання основних функцій елементну базу АОЛЗ, можна розділити на 2 групи.

До першої групи належать елементи конструкції, які виконують захисні (в тому числі ізолюючі) функції. Їх характеристики залежать тільки від стану внутрішньої структури конструктивних матеріалів. До них можна віднести деталі АОЛЗ, виготовлені з металів та їх сплавів, оптичні системи, виконані з різних видів скла, компаунди, органічні конструкції і т.д.

Друга група конструктивних елементів АОЛЗ включає елементну базу електронних пристроїв і блоків, працездатність яких в умовах впливу іонізуючого

випромінювання буде визначатися як станом кристалічної решітки матеріалу, так і впливом іонізуючого випромінювання на протікання процесів в елементах приладів, виготовлених з нього. Такими приладами в АОЛЗ є напівпровідники і зібрані на їх основі електронні схеми, конденсатори, резистори, трансформатори і приймачі оптичного випромінювання.

Ряд досліджень впливу іонізуючого випромінювання на метали і їх сплави, що використовуються в конструкціях АОЛЗ, показав, що зміна механічних властивостей цих матеріалів відбувається тільки під впливом нейтронного випромінювання інтенсивністю порядку від 1-5•10<sup>18</sup> (сталь) до 9•10<sup>21</sup> (берилієві сплави) нейтр/с•мм<sup>2</sup>.

Зміна властивостей ізоляційних матеріалів, пластмас, текстолітів, шаруватих матеріалів, а так само кронових стекол, з яких виготовляються оптичні елементи АОЛЗ, спостерігається більш, ніж на 10 відсотків при значеннях поглинених доз від 100 до 1-3•10<sup>6</sup> рад.

Стабільність роботи резисторів, електричних опорів і конденсаторів в умовах впливу іонізуючого випромінювання залежить від збереження електричних і магнітних властивостей матеріалів з яких вони виготовлені. Експериментальними дослідженнями встановлено, що під дією іонізуючого випромінювання відбувається зростання параметрів, що характеризують їх електричні та магнітні властивості. При цьому зміна електричних властивостей відбувається як під впливом гамавипромінювання, так і потоку бета-частинок. Тут і далі під іонізуючим випромінюванням будемо розглядати потік гама-квантів і бета-частинок, як основних видів іонізуючого випромінювання, які можуть випромінюватися як внаслідок техногенної аварії, так і космічного випромінювання.

Досягнення потужності дози даних видів випромінювання  $10^6$ – $10^8$  рад/час приводить до зміни електричних і магнітних властивостей резисторів, електричних опорів і конденсаторів на 10 і більше відсотків [2,5,30].

Дослідження впливу іонізуючого випромінювання на трансформатори показали, що при досягненні практичних значень поглиненої дози критичної для їх конструктивного матеріалу, радіаційний ефект в них не проявлявся [2,3,5].

Результати аналізу радіаційної стійкості напівпровідникових приборів, які використовуються в електронних приладах АОЛЗ під впливом гамавипромінювання, представлений на діаграмі (рис. 1.12). Приведені результати аналізу показують, що найбільш радіаційно вразливими конструктивними елементами АОЛЗ в умовах техногенної аварії, буде приймач АОЛЗ [3].

Відповідно, технічний стан приймача в умовах впливу іонізуючого випромінювання буде визначати загальний технічний стан АОЛЗ і впливати на ефективність її роботи [1].

Як зазначалося, в речовині під впливом іонізуючого випромінювання протікають процеси, які приводять до різного роду фізико-хімічних змін. Ці зміни отримали назву «радіаційний ефект» [3,4].



Рис. 1.12. Результати аналізу радіаційної стійкості напівпровідникових приборів, які використовуються в електронних приладах АОЛЗ під впливом гамавипромінювання.

Радіаційний ефект приводить до зворотних (стаціонарних) і незворотних (квазістабільних) змін параметрів приймачів АОЛЗ [4, 5].

Зворотні зміни, в основному обумовлені виникненням В матеріалі напівпровідника додаткових носіїв заряду. Таке явище спостерігається тільки при приймача АОЛЗ безпосередньому знаходженні В полі дії іонізуючого випромінювання. Щільність додаткових носіїв від заряду залежить виду

випромінювання  $S_{випр}$  і механізму його взаємодії з речовиною, яка визначається енергією випромінюючих частинок (квантів)  $S_E$ , а також потужністю поглиненої дози опромінення  $P_{випр}[6]$ .

Незворотні зміни обумовлені формуванням в напівпровідниках під впливом іонізуючого випромінювання змін (порушень) структури кристалічної решітки. Дефекти в кристалах починають проявлятися в процесі опромінення і зберігаються після закінчення впливу випромінювання. При цьому порушення структури кристалічної решітки напівпровідникових приборів може спостерігатися, якщо бомбардуючі його бета-частинки або гама-кванти будуть передавати вузлам кристалічної решітки енергію зміщення Е<sub>do</sub> більше деякої порогової для даного матеріалу енергії.

Залежності величин енергії зміщення від атомної маси хімічних елементів, що формуються бета-частинами і електронами віддачі з енергією від 0,1 до 1,1 МеВ в конструктивних матеріалах, які йдуть на виготовлення елементної бази приборів АОЛЗ на фоні значень їх порогових енергій, показані на рис.1.13.



Рис.1.13. Залежності величин енергії зміщення від атомної маси хімічних елементів, що формуються бета-частинками і електронами віддачі (1, 2) з енергією від 0,1 до 1,1 МеВ в конструктивних матеріалах, які йдуть на виготовлення елементної бази приборів АОЛЗ на фоні значень їх порогових енергій.

Аналіз приведених даних свідчить про те, що бета-частинки і електрони віддачі з енергією, що знаходиться в діапазоні від 0,1 до 1,1 МеВ здатні формувати у вузлах кристалічних решіток напівпровідникових матеріалів, які йдуть на виготовлення елементів приборів АОЛЗ незворотні зміни.

Таким чином, незворотні зміни залежать від типу випромінювання  $S_{випр}$ , енергетичних характеристик  $S_E$  і величини поглиненої дози іонізуючого випромінювання  $D_{випр}$ , рад, яку отримає приймач АОЛЗ за весь час опромінення.

В залежності від виду  $R_{d}^{Bunp}$  технічний стан АОЛЗ приймача може змінитися на неробочий стан – стан приймача АОЛЗ, при якому значення хоча б одного його параметру, що характеризує його здатність виконувати задані функції не відповідає вимогам експлуатаційно-технічної документації; або на граничний стан – стан приймача при якому його подальше використання за призначенням недопустимо або недоцільно [1].

Оцінка впливу іонізуючого випромінювання на елементну базу, прибори і прилади різних зразків техніки проводилась за напрямками [6]: по-перше, вивчалась природа радіаційних дефектів в різних матеріалах; по-друге проводилась оцінка впливу радіаційних ефектів на показники працездатності окремих елементів приборів і приладів.

Окремим напрямком було визначення пріоритету при оцінці впливу іонізуючого випромінювання на АОЛЗ, на показники її працездатності. Підсумком цілого ряду наукових праць у вказаній області стала розробка системи вимог до відповідних досліджень[5,7,8].

Розроблені в послідуючому методики оцінки впливу іонізуючого випромінювання на АОЛЗ оцінюють вплив радіаційних дефектів в елементній базі при впливі проникаючої радіації. Відомо, що проникаюча радіація включає миттєві і запізнілі нейтрони, миттєве, осколочне і вторинне гама-випромінювання. Відповідно і оцінка наслідків впливу проникаючої радіації на АОЛЗ повинна проводитися на основі оцінки впливу радіаційних ефектів, створених в речовині гама-нейтронним потоком [5,9]. Аварія на Чорнобильській атомній станції 1986 року засвідчила, що ще одним джерелом іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії, буде радіоактивне зараження місцевості [1,7]. Цілісні методики по оцінці впливу радіоактивного зараження на АОЛЗ не створювалися. Разом з тим методики комбінованої оцінки наслідків техногенної аварії зводились до визначення області простору навколо центру техногенної аварії з радіусом  $R_n$ , в якій спостерігалася задана ступінь пошкодження об'єкту, що розглядається. При цьому в якості  $R_n$  вибирався максимальний показник із сукупності окремо створених кожним негативним фактором радіусу. Іонізуюче опромінення як наслідок радіоактивного зараження місцевості на відстанях, більше  $R_n$  буде мати характеристики, які не впливають на АОЛЗ.

Додатковим фактором, що знижує ефективність впливу іонізуючого випромінювання на великих відстанях, буде захищеність радіаційно вразливої елементної бази приборів і приладів АОЛЗ.

Таким чином, оцінка впливу наслідків техногенної аварії на працездатність АОЛЗ повинна базуватися на результатах досліджень цього процесу в змодельованих умовах. При цьому для виконання таких досліджень необхідні дані перш за все про енергетичні характеристики іонізуючого випромінювання. Від цих характеристик буде залежати як від взаємодії речовини і випромінювання, так і значення величини поглиненої дози [1,5], яку отримає приймач АОЛЗ за весь час опромінення при знаходженні в деякій точці зони радіоактивного зараження або пересуваючись в її межах.

При виконанні оцінки впливу радіоактивного випромінювання на той чи інший прилад, агрегат або вузол АОЛЗ необхідно врахувати його захищеність від впливу різних видів випромінювання, а також можливості по проходженню різних видів опромінення через перешкоди. Дослідження властивостей іонізуючого випромінювання, яке випромінюються сумішшю радіоактивних речовин, як наслідку техногенної аварії, показало, що на приймачі АОЛЗ буде впливати в основному гама-випромінювання. Аналіз даних по радіаційній стійкості елементної бази АОЛЗ свідчить, що найбільш радіаційно вразливим конструктивним елементом АОЛЗ буде приймач. Технічний стан приймача в умовах впливу гама-випромінювання буде визначати працездатність АОЛЗ. Вплив гама-випромінювання, як наслідку техногенної аварії на приймачі АОЛЗ може проявлятися в формуванні зворотних і незворотних радіаційних ефектів. Результатом цього буде зниження виявляючої здатності приймача АОЛЗ. Види радіаційних дефектів і ступінь їх впливу на виявляючу здатність залежать від енергії гама-квантів, а також від значення поглиненої дози гама-випромінювання та її потужності.

# 1.3. Прогнозування характеристик поглиненої дози іонізуючого випромінювання, яке випускається сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енергоустановки

На основі аналізу процесу формування радіаційних ефектів в напівпровідникових приладах визначено, що оцінка впливу наслідків техногенної аварії на працездатність приймачів АОЛЗ повинна базуватися на результатах експериментальних досліджень впливу потужності дози і дози іонізуючого випромінювання, яке відповідає умовам, створеним при аварії атомній енергетичній установці на технічні характеристики приймача АОЛЗ.

Аналіз порядку прогнозування потужності дози і дози іонізуючого випромінювання, сформованого сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енергетичної установки типу водо-водяний енергетичний реактор, показав що для виконання такої роботи необхідні дані про характеристики мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин і газоподібних радіоактивних речовин, що включають їхню кількість у суміші аварійного викиду, енергію іонізуючого випромінювання, сформованого окремими групами радіоактивних речовин, активність радіоактивних речовин, а також значення коефіцієнтів, що кількісно оцінюють адсорбційно - десорбційну взаємодію газоподібних радіоактивних речовин і мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин з поверхнею приймачів АОЛЗ.

Аналіз існуючих методик прогнозування характеристик іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії, і оцінки їхнього впливу на АОЛЗ дозволив виявити наявні в них недоліки, основні з який це:

- відсутність обліку часової моделі розвитку техногенної аварії;

- відсутність прогнозування наслідків аварії атомної енегетичної установки типу водо-водяний енергетичний реактор;

- складність визначення кількості суміші радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енегетичної установки й обмеження його значення 50% від повної кількості накопичених речовин під оболонкою атомної енегетичної установки без обліку зміни їхньої кількості від часу стаціонарної роботи АЕУ;

- визначення потужності і дози іонізуючого випромінювання без врахування характеристик іонізуючого випромінювання, сформованого безпосередньо сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду;

- відсутність обліку характеристик взаємодії газоподібних радіоактивних речовин і мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин із поверхнею приймачів АОЛЗ.

Крім того необхідно врахувати що в даних методиках відсутня оцінка впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії.

Розрахунки активності деяких окремих груп радіонуклідів хімічних елементів показали, що сумарна активність аварійного викиду змінюється від 6,01•10<sup>20</sup> Бк до 1,255•10<sup>21</sup> Бк за 3 роки стаціонарної роботи атомної енергетичної установки, при завантаженні ядерним пальним у кількості 42 тони. Це складає від 56,7 до 70,2% від повної кількості радіоактивних речовин, накопичених під оболонкою атомної енергетичної установки типу BBEP-440. При вміст газоподібних цьому радіоактивних речовин у даній суміші змінюється від 83,1 до 77,6 %. Відповідно вміст мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин у суміші аварійного викиду ВВЕР - 440 змінюється від 16,9 до 22,4%.

Сумарна активність аварійного викиду атомної енергетичної установки типу ВВЕР-1000 за такий же період, при завантаженні ядерним пальним у кількості 66 тони змінюється від  $3,57 \cdot 10^{21}$  Бк до  $4,35 \cdot 10^{21}$  Бк, і, відповідно, складає від 77,0 до 70,9 % від повної кількості радіоактивних речовин, накопичених під оболонкою даного типу атомної енергетичної установки. При цьому вміст газоподібних радіоактивних речовин у даній суміші змінюється від 79,7 до 81,6 %. Відповідно зміст мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин у суміші аварійного викиду ВВЕР-1000 змінюється від 18,4 до 20,3 %.

Джерелом іонізуючого випромінювання зазвичай є об'єкт, який містить радіоактивний матеріал або технічний пристрій, який створює або здатний створювати, в певних умовах, іонізуюче випромінювання. Джерела іонізуючого випромінювання поділяються на закриті та відкриті. Закрите джерело радіонуклідне джерело іонізуючого випромінювання, конструкція якого перешкоджає взаємним контактам радіоактивного матеріалу і середовища, що оточує джерело і виключає його забруднення радіоактивною речовиною вище допустимого, за діючими нормами рівня в умовах, передбачених для джерела.

Крім того під час роботи з радіоактивними речовинами та іншими джерелами іонізуючого випромінювання з'являються радіоактивні продукти, які отримали назву «радіоактивні відходи». У сучасних умовах широко використовується як джерело іонізуючого випромінювання кобальт-60 (цезій-137). Цей ізотоп має період піврозпаду 5,3 роки і є джерелом бета-випромінювання з енергією частинок 0,31 МеВ і гама-випромінювання з енергією квантів 1,17 і 1,33 МеВ.

У практичному використанні кобальта-60 основну роль відіграє гамавипромінювання.

Відкрите джерело – радіонуклідне джерело іонізуючого випромінювання, конструкція якого допускає контакт радіоактивного матеріалу і середовища, що оточує і не виключає можливості його забруднення речовиною вище допустимого рівня, встановленого для закритого джерела, в умовах, передбачених для його використання.

Одним з найважливіших джерел іонізуючих випромінювань є транспортні та стаціонарні енергетичні ядерні реактори. Вони використовують ядерне пальне, до складу якого входять речовини, що мають властивість ділитися (уран  $\frac{235}{92}$ U, плутоній  $\frac{239}{94}$ Pu).

В якості ядерного пального використовують природний уран, двоокис урану UO<sub>2</sub>, сплави урану із металами, двоокис плутонію PuO<sub>2</sub>. Як ядерне паливо в сучасних ядерних реакторах використовують речовини, що містять у собі уран. Уран широко розповсюджений у природі, але уранові руди мають незначну кількісну концентрацію, що у середньому складає 0,1–0,5 %, а буває і ще менше – 0,08–0,05 %. У природі тільки ізотопи урану  $\frac{235}{92}$ U здатні самостійно підтримувати ядерну реакцію, тому для забезпечення регулюємої ядерної реакції у ядерному реакторі атомної електростанції необхідне ядерне пальне з підвищеним умістом урану  $\frac{235}{92}$ U.

У випадку зруйнування (аварії) ядерно-енергетичного реактора, на великих площах і значних відстанях від АЕС виникає довготривале радіоактивне забруднення. Радіоактивне забруднення місцевості за складом радіоактивних речовин, площею забруднення, рівнями радіації на забрудненій місцевості та тривалістю її забруднення суттєво відрізняється від радіоактивного зараження місцевості у випадку ядерного вибуху.

За складом радіоактивних речовин, поряд із ізотопами урану, плутонію у місці аварійного викиду буде спостерігатися наявність короткоживучих радіоізотопів (йод  $\frac{131}{53}$ I, телур  $\frac{132}{52}$ Te, цезій  $\frac{134}{55}$ Cs,  $\frac{137}{55}$ Cs) та газів (ксенон  $\frac{133}{54}$ Xe, криптон  $\frac{85}{36}$ Kr).

Особливостями радіоактивного забруднення під час зруйнування (аварії) на АЕС є:

1) велика тривалість викиду у навколишнє середовище радіоактивних речовин, який продовжується до повної герметизації зруйнованого реактора. Це ускладнює, а іноді і виключає можливість прогнозування радіаційного стану на території, що оточує аварійний реактор;

2) під час зруйнування (аварії) утворюються дрібнодисперсні аерозолі з розмірами частинок 0,5–3 мкм (під час вибуху – 60 і більше мкм), які здатні тривалий час знаходитися в повітрі у зваженому стані та розповсюджуватися за напрямком вітру на великі відстані. Дрібнодисперсні аерозолі важко фільтруються;

3) висока хімічна активність викинутих радіонуклідів забезпечує міцне їх зчеплення з різними поверхнями (наприклад технікою) і ускладнює проведення робіт з їх дезактивації;

4) радіонукліди у вигляді газоаерозольної суміші впродовж тривалого часу викидаються із зони зруйнованого реактора в приземний шар атмосфери (до 200– 500 м), який характеризується мінливістю метеорологічних умов, що призводить до нерівномірного забруднення і визначає суцільну конфігурацію меж забруднення місцевості у радіусі 100 км від місця руйнування (аварії);

5) спад рівнів радіації під час руйнувань (аварій) АЕС, за рахунок спаду активності радіонуклідів, відбувається значно повільніше, ніж у випадку ядерних вибухів, оскільки під час експлуатації реактора у ньому накопичуються довгоживучі ізотопи, що обумовлює більш тривале забруднення місцевості;

 6) забруднення характеризується великими масштабами з умовним виділенням зон: руйнування AEC – до 500 м; розповсюдження газоаерозольної хмари до 10–20 км; суцільного забруднення – до 100 км; осередкового забруднення – до 1000 км;

7) уражаюча дія радіоактивного забруднення виявляється внаслідок внутрішнього і зовнішнього опромінення. Особливу небезпеку буде становити період випадіння радіонуклідів (радіоактивний йод) із газоаерозольної хмари, упродовж якого можливо отримати дозу внутрішнього опромінення від 400 до 3000 рад. Руйнування ядерного реактора може статися не тільки у разі застосування звичайної зброї по AEC, а і також унаслідок стихійного лиха, падіння безпілотного літального апарату на споруду AEC тощо.

Вихід реактора з ладу супроводжується вибухом та руйнуванням системи трубопроводів, що містять теплоносій, пошкодженням реактора та його гальмуванням, відмовою системи керування і захисту, що викликає миттєву втрату герметичності конструкцій реактора, повне оплавлення ТВЕЛів і викиду радіоактивних речовин з потоками пари в довкілля.

Одночасно можливий розкид радіоактивних уламків конструкцій і ТВЕЛів на значній території. У кожному несприятливому варіанті перебігу і розвитку аварії на АЕС в атмосферу може бути викинуто до 100% радіоактивних благородних газів, цезію, телуру; 10–30% стронцію; до 3% ізотопів таких, як плутоній, рутеній, лантан, які з'являються у реакторі під час перебігу ядерної ланцюгової реакції.

Загальна активність викиду під час аварій досягає 10% від загальної активності реактора на момент руйнування або його зупинки і залежить від типу реактора, його електричної потужності та часу, що пройшов з моменту початку керованої ланцюгової реакції.

Наприклад, сумарна активність усіх ізотопів у реакторі типу ВВЕР-440 через рік експлуатації реактора складає величину порядка 10<sup>9</sup> Кі. Загалом у разі зруйнування (аварії) ядерного реактора у навколишнє середовище може бути викинуто понад 200 різноманітних радіоактивних ізотопів з максимальним періодом піврозпаду 200 років [30].

Залежності зміни ефективної енергії гама-випромінювання ( $\overline{E_{\gamma}}^{(T,t)}$ ) і гама-

еквіваленту (<sup>¶</sup><sub>γ</sub>) окремо для суміші мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин і газоподібних радіоактивних речовин від часу, що сплинув з початку техногенної аварії отримані на основі даних про зміну спектру радіоактивних речовин і їхньої кількості в часі, після закінчення ланцюгової реакції розподілу ядерного пального в активній атомній енергетичній установці.

Характер зміни активності суміші аварійного викиду  $Q_{\Sigma}(t_0)$ , описується функціональною залежністю за законом Вей і Вінгерра. Для визначення значень показника ступеня для цієї залежності використані дані експериментальних досліджень, на основі яких встановлено, що для газоподібних радіоактивних речовин показник ступеня приймає значення 0,8, для мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин—0,4.

# Характеристики деяких радіоактивних ізотопів представлені в табл. 1.6.

### Таблиця 1.6.

Ізотопи	Період	Характер	Енергія (М	Гама-	
	шврозпаду	випромінювання	частинок	квантів	стала
$\frac{16}{7}N$	7 c	β+ ,γ	10,4 (28 %) 4,39 (54 %) 3,38 (18 %)	7,12 6,13	15,3
$\frac{17}{7}N$	4,14 c	β- ,γ	3,7 (B) 1,0		
$\frac{19}{8}O$	29,4 c	β΄,γ	4,5 (30 %) 2,9 (70 %)	1,366 0,200, 0,112	
$\frac{24}{11}Na$	14,9 год	$\beta^{-},\gamma$	1,39	2,75 (100 %)	18,55
$\frac{27}{12}Mg$	9,5 хв	β΄,γ	1,75 (58 %) 1,59 (42 %)	1,015; 1,35 0,834	
$\frac{32}{17}Cl$	37,3 хв	β <sup>-</sup> ,γ	4,81 (53,4 %) 2,77 (15,8 %) 1,91 (85 %)	1,52 1,26 0,246	
$\frac{41}{18}Ar$	1,8 год	β,γ	2,48 (0,88 %)	1,199 (99,1) 1,29 (99,1 %)	6,58
$\frac{45}{20}Ca$	163 діб	β <sup>-</sup>	0,25		
$\frac{\frac{59}{26}Fe}{26}Fe$	45 діб	β- ,γ	1,56 (0,3 %) 0,462 (53,9 %) 0,271 (45,8 %)	1,289 (43 %) 1,100 (56,7 %) 0,195 (2,8 %)	6,25
$\frac{60}{27}Co$	5,27 років	β- ,γ	0,309	1,25 (100 %) 1,17 (99 %)	13
$\frac{65}{28}Ni$	2,6 год	β-,γ	210 (57 %) 1,01 (14 %) 0.60 (29 %)	1,45 (15 %) 1,09 (29 %) 0,36 (15 %)	
$\frac{87}{36}Kr$	78 хв	β- ,γ	3,8 (65 %) 1,3 (25 %)	2,57; 2,05 0,847; 0,403	
$\frac{88}{36}Kr$	2,77 років	β- ,γ	2,8 (20 %) 0,9 (12 %) 0,52 (68 %)	2,40; 2,19 1,55; 0,845	
$\frac{90}{38}$ Sr	28 років	β <sup>-</sup>	0,541		
$\frac{\frac{13}{13}}{53}J$	8,08 діб	β <sup>-</sup> ,γ	0,608 (87,2 %) 0,335 (9,3 %) 0,72 (3 %)	0,637 (9 %) 0,364 (78,4 %)	2,15
$\frac{133}{53}$ J	20,8 год	β- ,γ	1,3 (91 %) 0,4 (9 %) 1,4 (1 %)	0,85 (5 %) 0,53 (94 %)	3,8
$\frac{135}{54}$ Xe	9,22 год	β⁻ ,γ	0,91	0,25; 0,61	1,34
$\frac{\frac{138}{54}}{54}$ Xe	17 хв	β- ,γ	2,4	2,01; 1,78 0,51; 0,42	
$\frac{137}{55}$ Cs	27 років	β- ,γ	1,17 (8 %) 0,51 (92 %)	0,661	3,10
$\frac{210}{84}$ Po	138 діб	α ,γ	5,3	0,8 (1,2-103 %)	
$\frac{\frac{226}{88}}{88}Ra$	1590 років	α ,γ	4,779 (94,3 %) 4,595 (5,7 %)	0,188 (5,7 %)	8,4 (з фільтром)

## Характеристики деяких радіоактивних ізотопів

Як показники, які кількісно оцінюють щільність зараження використовується коефіцієнти, які враховують частку мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин, що закріпилися на поверхні приймача АОЛЗ (К<sub>МТРВ</sub>).

Функціональна залежність зміни показників від швидкості вітру характеризується коефіцієнтом  $K_{B\Pi}^{MTPB}$ , який кількісно оцінює процес відриву часток мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин від поверхні.

Функціональна залежність зміни показників від часу характеризується коефіцієнтом спеціальної обробки ( $K_{co}^{MTPB}$ ), який оцінює ефективність дезактивації поверхні приймача АОЛЗ.

Встановлено, що в залежності від стадії розвитку техногенної аварії,  $K_{MTPB}$ приймає значення від 0,64-0,43 відносних одиниць. Коефіцієнт  $K_{BII}^{MTPB}$ , у залежності від стадії розвитку техногенної аварії, у діапазоні швидкості вітру 1-10 м/с приймає значення від 3,9-16,4 відносних одиниць. Коефіцієнт  $K_{CO}^{MTPB}$ , у діапазоні часу дезактивації газокапельним методом поверхні, що безпосередньо формує іонізуюче випромінювання за час дезактивації 1-10 хвилин приймає значення від 56-92 відносних одиниць.

Як коефіцієнти, які кількісно оцінюють щільність зараження поверхні приймача АОЛЗ сумішшю газоподібних радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енергетичної установки застосовується коефіцієнт адсорбції ( $K_{IPB}$ ), коефіцієнт десорбції ( $K_{Aec}^{IPB}$ ) (функціональна залежність зміни від часу, що пройшов з моменту формування максимальної щільності зараження поверхні АОЛЗ) і коефіцієнт дезактивації газоподібних радіоактивних речовин з поверхні приймача АОЛЗ ( $K_{A}^{IPB}$ ). Встановлення значення даних коефіцієнтів стосовно корпусу існуючих приймачів АОЛЗ визначено на основі експериментальних досліджень.

Значення К<sub>ГРВ</sub>, К<sup>ГРВ</sup><sub>Дес</sub> ( $t_{выд}$ ), К<sup>ГРВ</sup><sub>Д для різних варіантів корпусів представлені в табл. 1.7.</sub>

Зразок	К <sub>грв</sub>	$\mathbf{K}^{^{TPB}}_{\mathcal{A}}$		
Корпус, варіант № 1	0,18	1,08		
Корпус, варіант № 2	0,16	2,0		

значення  $K_{{\it \Gamma}{\it PB}\,{\it u}} \; K_{{\it A}}^{{\it \Gamma}{\it PB}}$  для різних варіантів корпусів АОЛЗ

Основу методики прогнозування потужності дози і дози іонізуючого випромінювання складають вирази отримані на основі Гаусівської (нормальної) функції канонічного рівняння атмосферної дифузії часток в атмосфері.

За допомогою представлених виразів визначаються:

- концентрація радіоактивних речовин в атмосфері в заданій точці  $\chi(x, y, z)$ ;

- інтеграл концентрації радіоактивних речовин у заданій точці на осі сліду руху радіоактивної хмари  $\varphi(x,0,0)$ ;

- інтеграл концентрації радіоактивних речовин у заданій точці осторонь від осі сліду руху радіоактивної хмари  $\varphi(x, y, 0)$ ;

- концентрація радіоактивних речовин на місцевості в заданій точці на осі сліду радіоактивної хмари q(x,0,0):

- концентрація радіоактивної хмари на місцевості в заданій крапці осторонь від осі сліду руху хмари q(x, y, 0);

- ізоплети щільності випадання на грунт радіоактивної хмари;

- потужність дози гама - випромінювання від зараженої місцевості і поверхні приймача АОЛЗ ( Р<sub>γ</sub>), а також від хмари техногенної аварії ( Р<sub>γоб</sub>);

- доза гама - випромінювання, отримана приймачем інфрачервоного сигналу зараженої різними групами радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енергетичної установки ( $D_t^{MTPB}$ ,  $D_t^{\Gamma PB}$ ,  $D_{AT}^{\Gamma PP}$ ), а також від хмари аварійного викиду ( $D_{\gamma_{o\delta}}$ ).

Для врахування стану атмосферної стійкості в роботі представлені емпіричні рівняння, отримані в результаті експериментів в умовах рівнинної місцевості.

Розроблена методика враховує кількісні характеристики суміші радіоактивних речовин.

Оцінка ефективності прогнозування характеристик радіоактивного зараження, як наслідку розвитку техногенної аварії, за допомогою розробленої методики проведена в роботі на основі даних дозиметричного контролю місцевості, підданої радіоактивному зараженню внаслідок техногенної катастрофи на IV блоці Чорнобильської АЕС в 1986 році. При її використанні в якості критерію була обрана довірча ймовірність прогнозованого значення потужності гама - випромінювання в заданих довірчих границях.

Результати оцінки показали, що помилки прогнозування потужності дози по порядку значень відповідають помилками прогнозування потужності дози іонізуючого випромінювання, створеного внаслідок техногенної аварії на атомній енергетичній установці.

1.4. Аналіз існуючих методик прогнозування іонізуючого випромінювання, що формується сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енергоустановки на атмосферно-оптичні лінії

Значний прогрес в електроніці, оптиці, квантовій та оптоелектронній технологіях, особливо на початку XXI століття, уможливив використання АОЛЗ [44].

Питання впливу радіаційного випромінювання в активних зонах атомних станцій, особливо після агресивних дій російських військ на Запорізькій АЕС є дуже перспективним та затребуваним сьогодні напрямком досліджень і для вітчизняних науковців. Але, на жаль, дана тема в українському науковому полі висвітлена досить незначною мірою.

Відомо, що будь-який електронний або фотонний компонент може постраждати від дії іонізуючого випромінювання. У разі виникнення щонайменшої

несправності системи, яка базується на роботі фотонних компонентів, це суттєво вплине на якість робіт і вартість всього обладнання. Ремонт оптичних компонентів або систем в радіаційному середовищі просто немислимий через надвисокий рівень радіації. Також майже неможливо відремонтувати бортове обладнання після виведення супутника на орбіту чи старт ракетно-космічного комплексу. Тому важливо забезпечити справність усіх компонентів і систем ще до початку виконання їх місії – визначити проблеми й уникнути їх. Для цього, варто ретельно дослідити, як іонізоване випромінювання впливає на роботу та надійність ряду оптичних компонентів, над чим сьогодні працюють ряд науковців.

Метою даного дослідження інформаційно-джерельного забезпечення проблеми впливу іонізуючого випромінювання (космічної радіації) є створення інформаційної бази статей і матеріалів, на які можна опиратися у ході подальших досліджень у питанні зміни параметрів компонентів АОЛЗ в умовах іонізуючого випромінювання.

Для досягнення поставленої мети, потрібно виконати низку науковопошукових та науково-дослідних завдань, а саме:

- зібрати базу загальнотеоретичних та практичних матеріалів у полі окресленої наукової тематики;

- проаналізувати цю базу, визначити найбільш цікаві та перспективні дослідження;

- ознайомитись з ними та узагальнити отримані дані для подальших шляхів проведення досліджень у полі окресленої проблематики.

Аналізуючи інформаційно-джерельну базу забезпечення окресленої наукової проблематики, слід відмітити, що в українському науковому середовищі питання впливу іонізуючого випромінювання внаслідок техногенної аварії на оптичні системи й компоненти висвітлено надзвичайно недостатньо.

Попри те, що існує перелік навчальних посібників і підручників (більш давніх та новітніх), які викладають загальні відомості про АОЛЗ та системи передачі даних, серед наукових розвідок є зовсім мало досліджень, присвячених питанню радіаційної стійкості; дослідження параметрів впливу іонізованого випромінювання

на компоненти оптичних систем, особливо як наслідку техногенної аварії на атомній енергетичній установці.

Серед розглянутих науково-теоретичних та науково-дослідних робіт, виділимо найбільш актуальні. Так, висвітленню основних питань стосовно використання волоконно-оптичних датчиків, присвячена стаття [89]. Ця робота є цікавою тим, що розглядає оптичне волокно одночасно і як лінію передачі, і як чутливий елемент у волоконно-оптичних датчиках, досліджуючи здатність чутливості оптоволокна до наступних параметрів: магнітне поле, вібрація, температура, тиск і деформація [89]. Цікавим є також праця, яка освітлює явище загасання оптичного сигналу у волоконно-оптичних лініях зв'язку, зумовлене як фізичними особливостями оптичного волокна, так і навмисними впливом на нього [87]. Праця, вираховуючи математичне співвідношення всіх факторів впливу на захист інформації в оптичному волокні, подає розрахунок втрат у ньому, викликаних іонізуючим випромінюванням [88].

Дещо наближеними до теми окресленого нами наукового питання є дві публікації [90] та [91]. Однак, зазначимо, що ці статті мають вузькоспеціалізований і вузькоприкладний характер, де вплив власне іонізованого випромінювання розглядається дуже опосередковано, наряду з іншими факторами впливу.

Прикладною й досить інформативною є робота [92], яка розглядає зміни параметрів компонентів волоконно-оптичної системи зв'язку в умовах радіаційного опромінювання. Провівши вольтамперну характеристику діодних структур з p-nпереходом, світлодіодів, лазерних діодів, фотодіодів фотоприймачів та лавинних фотодіодів під впливом штучного опромінення, автори виявили, що вплив радіації виявляється: у зменшенні інтенсивності світла, що випромінюється світло діодом та у зниженні чутливості фотоприймача, який приймає світловий сигнал. Дослідники стверджують, що обидва ефекти викликають суттєве зниження якості сигналу, що передається по оптоволоконній лінії, зазнаючи, що при збільшенні нейтронних потоків до ~ $5x10^{14}$  н/см2, оптичні компоненти й лінія зв'язку виходять повністю з ладу. Це наразі все, що пропонують вітчизняні дослідники. Як бачимо, дана проблематика в українському полі досліджень є досить скупою на розробки як теоретичного, так і практичного характеру. За відсутності достатньої кількості вітчизняних наукових досліджень, і в умовах розширення спектра використання оптичних волокон, ми бачимо перспективи подальшого вивчення впливу радіаційного випромінювання на АОЛЗ. Що спонукало проаналізувати повне інформаційно-джерельне забезпечення визначеної наукової проблеми у площині світового досвіду.

Варто зазначити, що за більш ніж 20 років студіювання розвитку атмосфернооптичних технологій, вчені пройшли чималий поступ, а науковий доробок зарубіжних науковців в окресленій проблематиці є значно більший.

Сьогодні однозначно відомо, що дія іонізуючого випромінювання має багатофакторний характер. Вчені розрізняють корпускулярні й електромагнітні іонізуючі випромінювання. Корпускулярні випромінювання представляють вплив нейтронів, протонів, електронів, альфа- і бета-частинок, а також осколків розділення ядер. До електромагнітних іонізуючих випромінювань відносять рентгенівські й гама-випромінювання.

Вплив іонізуючого опромінення на речовину, залежно від енергії частинок, викликає зміщення атомів решітки та іонізацію. Ефект зміщення полягає у зміненні з нормального положення атомів в кристалічних решітках. При цьому, в структурі решітки утворюються дефекти: вакансії, міжвузлові проникнення додаткових атомів, дислокації. Ці дефекти можуть виявляти нестійкий характер, і після припинення дії радіації, решітка може відновитися. Більш складні дефекти утворюються в результаті об'єднання атомів. Особливо шкідливими є поєднання дефектів із вже наявними в матеріалі домішками або з вже існуючими дефектами решіток.

Іонізаційні ефекти спостерігаються у вигляді змінних явищ, пов'язаних з утворенням електронно-іонних пар. Зростання числа вільних електронів та іонізованих атомів змінює електричні характеристики матеріалу.

Основними джерелами енергетичних частинок, які викликають занепокоєння науковців, є: 1. Протони та електрони, що потрапили в радіаційні пояси Ван Аллена.

2. Важкі іони, що потрапили в магнітосферу. 3. Протони космічних променів і важкі іони. 4. Протони і важкі іони з сонячних спалахів [93]. На рівень всіх цих джерел випромінювання впливає сонячна активність, потужність енергії якої коливається від кеВ до ГеВ і більше [68]. Тривають проєкти, які вивчають радіаційні пояси Землі та зовнішній простір довкола нашої планети [79].

Вченими підсумовано, що довготривалі іонізуючі пошкодження через протони та електрони можуть спричинити зміну порогових показників пристроїв, збільшення споживання пристроєм енергії, зміщення часових проміжків на виконання завдань, зниження ефективності та функціональності обладнання, оптичні втрати тощо. Вони резюмують, що сьогодні вкрай важливо забезпечити справність усіх компонентів та систем, які використовуються в обладнанні, аби уникнути небезпеки поломок, недоліків роботи, необхідності подальшого ремонту.

Адже оптичні компоненти вже активно застосовуються в космічних апаратах різного призначення, як от: світлодіоди та фотодіоди – в оптронах [64]. У космічній галузі також використовують волоконно-оптичні гіроскопи для навігації космічних кораблів [50,75]. В якості зондування на борту розглядалися фібро-брегтівські решітки, наприклад: в ядерних та інтелектуальних космічних силових установках [48;65] та для космічних волоконно-оптичних систем зв'язку [55]. Різні типи оптичних волокон вивчались для використання в космічних системах оптичного зв'язку та лазерних далекомірних системах [74;71]. У недалекій перспективі – використання бездротового оптичного зв'язку у внутрішньо супутниковому вільному просторі [63].

Атомно-енергетична промисловість також залучила різноманітні можливості застосування оптичних волокон: як для потреб зв'язку, так і для зондування [31]. Оптоволоконні датчики вже сьогодні застосовуються для контролю температури і розподіленого температурного зондування в експериментальних реакторах та навколо них [47].

Бачимо два шляхи застосування оптичних компонентів у середовищі використання термоядерного синтезу. Перший – це оптична діагностика, що планується у роботі майбутнього Міжнародного термоядерного експериментального реактора, де запропоновано використання волоконно-оптичної спектроскопії та інфрачервоної термографії. Другий – це програма передачі даних, де волоконнооптичні лінії пропонуються для зв'язку між віддаленими маніпуляторами та диспетчерською під час операцій з технічного обслуговування реактора ITER [60].

Знайшли своє застосування й оптичні компоненти у системах передачі даних для виконання експериментів з термоядерної фізики [57]. Так, у новому поколінні досліджень – проєкти Compact Muon Solenoid (CMS) та ATLAS – що розробляються для роботи у Великому адронному колайдері, планують використовувати оптичні зв'язки з їх позитивними характеристиками високої пропускної здатності, низької потужності та стійкості до шуму [46;59].

Вплив іонізуючого випромінювання на елементи АОЛЗ, конкретніше, на діоксин кремнію, вивчається, щонайменше, впродовж останніх тридцяти років [40]. Від початку спостережень, відомо, що АОЛЗ чутливі до впливу радіаційного випромінювання [56]. Так, експериментальне дослідження [52], вивчаючи вплив гама- та протонного випромінювання на пропускання та показники заломлення, сформувало одну з перших базу даних, яку почали використовувати для прогнозування впливу космічного випромінювання на різні оптичні системи. А науковий звіт [45] підсумував масштабне дослідження впливу радіації на компоненти оптично-волоконного кабелю. Вже тоді, ïχ експериментальні випробування вимірювали показники як стійкої реакції оптичних волокон та кабелів, що піддавалися постійному випромінюванню, так і перехідну реакцію оптичних волокон та кабелів, що зазнавали дії імпульсного випромінювання. Випробуване ними волокно сьогодні вже активно використовують.

Вченими встановлено, що навіть за низьких загальних доз опромінення, оптичне ослаблення волокна може значно збільшитися, а його загасання значно зростає [42]. Так, у багатомодовому оптичному волокні при типовій дозі 10<sup>4</sup> Рад, загасання зростає на 70 дБ/км на довжині хвилі 1300 нм, що може призвести до виходу з ладу всієї лінії зв'язку.

Наслідком радіаційного опромінювання також може бути поява шумів, утворення яких пов'язане зі зміною в часі рівнів загасання у різних його ділянках.

65

Ці шуми стають причиною порушення зв'язку, незалежно від кінцевого рівня підвищення загасання.

Експерименти показують, що, в результаті іонізованого опромінення, змінюються первинні оптичні параметри самого матеріалу, причому найбільших змін зазнає коефіцієнт загасання. Такий ефект зміни величини згасання називається внесеним згасанням. Досліджуючи ці параметри, група вчених розробила методику Зa прогнозування згасання, індукованого радіацією. ïχ дослідженнями, довгострокове згасання можна зпрогнозувати з точністю близько 15% за рівня гамапроменів 60 Со для потужностей доз від 100 Гр/год до 3 Гр/год [60]. Сьогодні їхні розрахунки та їх результатами керуються послідуючі дослідники. Наприклад випробовування по впливу випромінювання на оптичні системи проводяться в Інституті Фраунгофера. Перші підсумки радіаційних випробувань цього наукового підрозділу, який досліджував вплив іонізуючого випромінювання на електронні, оптоелектронні та фотонні компоненти та системи, – лягли сьогодні в роботу Nuclear Effects in Electronics and Optics (NEO) у Fraunhofer INT. Знання, отримані за понад 40-річний досвід в галузі, дозволяє їм нині консультувати інші компанії щодо зміцнення компонентів та систем, а також для розробки нових оптичних систем [27].

Вченими досліджено механізм виникнення внесеного загасання: при впливі іонізованого випромінювання в матеріалі скловолокна виникають процеси зміщення, що створюють дефекти решітки. Крім того, у вихідному матеріалі вже можуть існувати такі дефекти. Під впливом випромінювання на цих дефектах створюються електрони провідності й дірки, комбінації яких з вакансіями, утворюють так-звані центри фарбування [63], формування яких суттєво погіршують оптичні властивості [49]. Через те, що центри фарбування можуть поглинати фотони, які несуть інформацію на певних довжинах хвиль і можуть зникати в результаті теплових або оптичних процесів, з'являється додаткове загасання. Явище додаткового згасання називають внесеним загасанням.

Встановлено, що внесене згасання зменшується за більшої довжини оптичних хвиль. Так, на основі спричиненого гама-випромінюванням згасання у Р-легованого волокна, було відзначено чотири піки поглинання у видимій області (470, 502, 540

та 600 нм) (інтегральна доза <2,0 Гр). Вченими відмічено, що індуковані радіацією втрати при 470 і 600 нм сильно залежать від потужності дози. При потужності дози 0,2 та 0,5 Гр/хв індукована втрата виявляє нелінійне відношення до загальної дози. А при високій потужності дози (1,0 Гр/хв) і низькій дозі (0,1 Гр/хв), схоже, існує лінійна залежність від загальної дози [29]. Тобто, величина внесеного згасання залежить від потужності дози опромінення.

[62] Дослідження провело комплексне вивчення толерантності ЛО випромінювання сучасних комерційних оптичних волокон SM. Розглядаючи згасання як функцію загальної дози, потужності дози, потужності світла та температури, вчені дослідили явище згасання в дванадцяти одномодових оптичних волокнах при 1310 нм та 1550 нм. Серед зразків, що піддалися дії гама-променів 60 Со та дії поля високоенергетичного випромінювання, Г-леговане стійке до випромінювання волокно SM від компанії Fujikura Ltd. продемонструвало надзвичайную толерантність – низьке загасання при 1310 нм, яке не перевищує 5 дБ/км навіть після загальної дози 1 МГр. В результаті цього експерименту виробником було виготовлено 2500 км цього типу волокна. Вчені ж заявили, що виконані вимірювання ще не дають повного розуміння основних механізмів згасання, але експериментально доведено, що концентрація легуючих речовин є одними з ключових факторів.

Зменшення в часі і розмірі внесеного згасання говорить про процес відновлення згасання. Так, вимірюючи загальний ступінь залежності концентрацій радіаційно-індукованих центрів дефектів від дози опромінення, автори дослідження [54] при тестуванні діоксин-кремнієвого оптоволокна легованого германієм, детально спрогнозували криві пострадіаційного відновлення згасання. А робота щодо стійкості специфічних оптичних волокон до випромінювання, що зазнають дії іонізуючого випромінювання 650 кГр (Si) виявила чіткі докази того, що після закінчення опромінення є очевидне відновлення згасання, але підтвердила, що майже відразу при повторному опроміненні з'являються нові пошкодження. З порівнянь опромінення двох зразків одного і того ж багатомодового волокна, виконаного в однакових умовах, крім рівнів освітленості, вони дійшли висновку, що існують чіткі докази фотовідбілювання [41].

Внесене загасання, а також ступінь його відновлення характеризують радіаційну стійкість оптичних систем. Питання розробки й випробування радіаційно-стійких систем актуально й донині. Так, на шляху до розробки стійких до випромінювання хвилеводів з чистого діоксиду кремнію, а також легованих, науковці провели низку спостережень процесів пошкодження оптичних матеріалів іонізуючим випромінюванням [49]. Дослідження радіаційної стійкості [56] співвілношення рівня встановило втрат, спричиненого іонізованим випромінюванням, залежно від типу волокна, довжини хвилі, температури, потужності світла, потужності дози та типу випромінювання. Результати цих випробувань вразили. На основі опромінення гама-променями та нейтронами одномодового (SM), багатомодового (MM SI) та полімерних оптичних систем (POF), встановлено, що: 1. Безперервне 60 Со гама-опромінення SM з дозовою потужністю близько 1,5 Гр/с до кінцевої дози 106 Гр призводить до індукованих радіацією втрат лише від 0,85 до 1,3 дБ/10 м при довжині хвилі 1300 нм і температурі близько 30 °С. 2. Волокна ГІ мали втрати від 1,3 до 2 дБ/10 м за таких же умов. 3. Волокна ММ SI з чистим сердечником SiO2 з високим вмістом ОН – близько 0,15 дБ/10 м приблизно 850 нм та близько 0,1 дБ/10 м близько 1060 нм (106 Гр, 30°С) продемонстрували найнижчі втрати. 4. POF із серцевиною з поліметилметакрилату також виявили збільшення втрат <EQ 0,1 дБ/10 м (670 нм, кімнатна температура), але лише до значень гама дози <EQ 800 Гр.

Типові рівні внесеного згасання для безлічі різних комерційних АОЛЗ сьогодні можна отримати у роботі [33]. Однак, вчені продовжують працювати над розробкою та випробуванням стійких до радіації оптичних систем. Наприклад, проведено вивчення ролі легуючих елементів фтору (F) та германію (Ge) на радіаційну чутливість скла на основі кремнезему та ефекти випромінювання на заготовки на основі діоксиду кремнію та оптичні волокна [53]. Результати іншого дослідження показали, що найкращу радіаційну стійкість має леговані фтором і термооброблені оптичні системи (радіаційні втрати становлять близько 20 дБ/м у

видимому діапазоні після опромінення нейтронами 1×1023 н/м2) [38]. Дані цього дослідження свідчать про те, що такі системи можуть використовуватись дуже наближено до палаючої плазми для її діагностики та дистанційного зондування.

Наукова робота по радіаційній стійкості специфічних багатомодових та одномодових оптичних систем при -25°С перевищує повну дозу SLHC до дози 500 кГр (Si)» виявила, що з ряду потенційних одномодових та багатомодових оптичних систем, одномодова система DrakaElite Super RadHard і одномодова система Fibre X показують себе дуже добре, інші ж дуже швидко показують високий рівень поглинання [58]. Тестування АОЛЗ з метою виявлення механізмів відмов, що можуть виникнути під час типової космічної місії, описали показники радіаційної стійкості декількох оптичних систем, використовуючи вимоги до потужності доз Міжнародної космічної станції (вплив вакууму, тепловий цикл, радіаційне опромінення) [34].

В даний час визначено наступні параметри, які впливають на реакцію оптичної системи іонізуючого випромінювання:

1) склад системи та спосіб виготовлення; 2) тип опромінення, потужність дози, загальна доза; 3) температура, розміри; 4) термічна обробка та історія опромінення; 5) довжина та потужність оптичної хвилі; 7) час, що минув між експозицією та вимірюванням.

Таким чином, розглядаючи параметри внесеного згасання в оптичних системах, першочергово треба чітко визначити: який тип та склад скла задіяні; які умови середовища та на якій довжині хвилі вимірюються значення.

Залежність внесеного загасання і його часової характеристики від дози випромінювання, типу впливу випромінювання для різних видів АОЛЗ є досить різноманітною і становить чималий інтерес для наступних досліджень. У цьому сьогодні полягає перспектива подальших досліджень АОЛЗ.

Так, у полі зору новітніх досліджень – вивчення оптичних систем з новими типами конструкцій, стійких до випромінювання. Дослідження надійності оптичного волокна та кабелю [37] для середовищ з високою радіацією дозволяє представити новий тип системи, яка демонструє значно зменшене ослаблення,

спричинене радіацією, при надзвичайно високих дозах опромінення (2 МГр). Нова система зміцнена додаванням високоміцних до радіації PCVD [37].

На сьогодні вибір радіаційно-стійких систем слід розглядати разом з іншими параметрами, такими як робоча довжина хвилі та потужність, а також продуктивність інших електронних компонентів у мережі для оптимізації загальної продуктивності мережі в середовищах із високим іонізуючим випромінюванням. Так, роботи японських вчених по вивченню техніки зондування з використанням оптичних волокон під високою дозою радіації [61] та розробка методики дистанційного зондування з використанням радіаційно-стійких оптичних волокон в умовах високої радіації [62] піддають випробуванням стійку до випромінювання оптичну систему, що вже використовується для дослідження внутрішніх приміщень посудин під тиском реактора та резервуарів для первинного утримання на АЕС Фукусіма-Даїчі. Радіаційну стійкість елементів оптичної системи покращено за рахунок збільшення кількості гідроксилу до 1000 ррт у чистому кремнеземному волокні.

Новий клас стійких до вигинів оптичних систем характеризується у статті по вивченню згинання нечутливих оптичних волокон для середовищ із високим випромінюванням [37]. Ці одномодові системи відповідають стандарту ITU-Т G.657.A.2 і демонструють радіаційну стійкість, покращену по відношенню до оптимізованих випромінюванням одномодових волокон PCVD, які були вивчені раніше і використовувались у середовищах із високим випромінюванням та військових цілях. Вчені стверджують, що ці нові типи волокон зворотно сумісні з існуючими конструкціями кабелів, що вимагають або радіаційно-стійких волокон, обох або гнучких нечутливих волокон, одночасно поєднуючи переваги особливостей конструкції волокон.

Зібрана база загальнотеоретичних та практичних матеріалів у полі окресленої наукової тематики та її аналіз, дозволили нам визначити найбільш цікаві та перспективні дослідження. Ознайомившись з ними та узагальнивши отримані дані, ми дійшли наступних висновків:

- оптичні системи, розміщені на атомних електростанціях та інших середовищах із високим випромінюванням, таких як космічне середовище, фізичне середовище високих енергій та військові програми, повинні мати можливість підтримувати свою функціональність навіть при високому рівні кумулятивного радіаційного опромінення. Адже стандартні оптичні системи під час опромінення можуть зазнати непоправних фізичних змін, що призведуть до істотного їх ослаблення навіть при незначних дозах опромінення;

- щоб забезпечити надійну оптичну мережу в середовищах із високим випромінюванням, необхідно проводити подальші випробування, аби переконатись, що зміни оптичних систем не збільшують ослаблення, і що функціональність мережі не порушується;

- правильний підбір оптичних систем для розгортання в середовищах із високим випромінюванням вимагає врахування багатьох змінних. Вплив ослаблення, спричиненого випромінюванням, на продуктивність необхідно враховувати та визначати кількісно з урахуванням передбачуваної дози, потужності дози, довжини хвилі та інших умов навколишнього середовища;

- на додаток до впливу ослаблення, спричиненого випромінюванням, системи, які будуть розгортатися в середовищах із високим випромінюванням, також повинні характеризуватися за іншими критеріями оптичної продуктивності, такими як: сумісність сплайсингу та пропускна здатність.

Аналіз методик оцінки функціонування АОЛЗ в умовах техногенної аварії показав, що вони не враховують модель розвитку техногенної аварії; зміни кількості радіоактивної суміші; показники енергетичних, активнісних і фізико-хімічних характеристик сумішей радіоактивного аварійного викиду і їх агрегатний стан. В існуючих методиках, крім того, відсутнє положення про оцінку впливу наслідків гама-випромінювання на приймачі інфрачервоного випромінювання і відповідно існує потреба в розробці рекомендацій, направлених на збереження виявляючої здатності приймачів інфрачервоного випромінювання в умовах впливу гамавипромінювання. Подальші дослідження необхідно спрямувати на розробку методики, яка повинна враховувати: особливості протікання техногенної аварії; особливості формування радіаційних ефектів в приймачі інфрачервоного випромінювання під впливом гама-випромінювання; енергетичні, активнісні і фізико-хімічні характеристики суміші іонізуючого випромінювання.

#### 1.5. Постановка завдання дослідження

Аналіз методик оцінки впливу іонізуючого випромінювання на елементну базу приладів і пристроїв показав що створені до даного часу цілісні методики оцінки такого впливу, відповідно до основних вимог, висунутих до такого роду робіт, оцінюють вплив радіаційних ефектів на елементну базу тільки проникаючої радіації. Отже, дані роботи не доцільно використовувати для оцінки впливу наслідків техногенної аварії на АОЛЗ.

Таким чином, наявність недоліків в існуючих методиках не дозволяє в повному обсязі вирішити наукове завдання по оцінці впливу іонізуючого випромінювання, сформованого сумішшю радіоактивних речовин техногенної аварії, на приймачі інфрачервоного випромінювання як основи для розробки рекомендацій направлених на збереження значень виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання в умовах впливу іонізуючого випромінювання.

Рішення такої задачі представляється можливим у випадку створення методики, що мала б можливість враховувати тип енергетичної установки, кількість радіоактивних речовин під оболонкою атомної енергетичної установки за час його стаціонарної роботи, етапність і тривалість за часом формування зони радіоактивного зараження, агрегатний склад суміші радіонуклідів аварійного викиду, енергетичні й активністні характеристики цієї суміші і характеристики адсорбційно – десорбційної взаємодія суміші радіоактивного зараження з поверхнями приймачів інфрачервоного випромінювання, а також враховувала б особливості впливу наслідків техногенної аварії на приймачі інфрачервоного випромінювання.
#### Висновки до розділу 1

1. Аналіз процесу формування в приймачах інфрачервоного випромінювання радіаційних ефектів, що виникли під впливом радіоактивного випромінювання, як наслідку техногенної аварії, показав що вид радіаційного ефекту і ступінь його впливу на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання залежить від концентрації радіоактивних речовин в атмосфері, зв'язаної з їх кількістю в суміші аварійного викиду атомної енергетичної установки, щільності розподілу радіоактивних речовин на місцевості і поверхні обладнання, а також від енергетичних, активностних, фізико – хімічних характеристик радіоактивних речовин, які визначають щільність їх розподілу на поверхні обладнання, з врахуванням їх агрегатного стану. Одним з факторів, що впливають на значення характеристик іонізуючого випромінювання, є дезактивація радіоактивних речовин з поверхні обладнання АОЛЗ.

2. Для визначення кількості радіоактивних речовин у суміші аварійного викиду атомної енергетичної установки необхідно розробити методику, що враховує особливості розвитку техногенної аварії, тип, час стаціонарної роботи атомної енергетичної установки по виробленню електроенергії, а також кількість завантаженого в атомну енергетичну установку ядерного палива. Методика повинна враховувати кількість як повної суміші радіоактивних речовин, викинутих в атмосферу за час розвитку техногенної аварії, так і окремо для груп мілкодисперсних твердих і газоподібних радіоактивних речовин по стадіях розвитку техногенної аварії.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ГАМА-ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПРИЙМАЧІ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

# 2.1. Оцінка захищеності приймачів інфрачервоного випромінювання від гама-випромінювання

Аналіз конструкції приймачів інфрачервоного випромінювання, а також умов їх експлуатації показав, що захищеність приймачів інфрачервоного випромінювання від гама-випромінювання буде визначатися ослабляючою здатністю елементів їх конструкції і напрямком вектора променистого потоку [36]. З цієї позиції найменш захищеним приймач інфрачервоного випромінювання буде зі сторони передньої частини апертури направленої антени АОЛЗ. Це пояснюється тим, що чутлива площа приймача розташована в положенні для прийняття максимуму інфрачервоного випромінювання з вказаного напрямку (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Спрощена схема приймача інфрачервоного випромінювання.

Особливістю компоновки АОЛЗ є те, що з задньої частини і бокових сторін приймач захищений від гама-випромінювання корпусом, який виготовлений, як правило, із щільних матеріалів і металів.

По осі приймача з передньої частини приймач відділяється від зовнішнього середовища трактом прийому, до складу якого можуть входити різноманітні лінзи та дзеркала, які розміщені на металевих підкладках.

Аналіз схем трактів прийому показав, що приймач захищений від гамавипромінювання оптичним матеріалом (товщиною до 2-3 мм) і розташованими за ним елементами оптичної системи (дві-три перешкоди із різноманітного матеріалу загальною товщиною до 4-8 мм).

Елементи оптичної системи можуть виготовлятися з різноманітних матеріалів, наприклад з алюмінату кальцію (AlK<sub>2</sub>), трьохсіркового миш'якового скла (AsS<sub>3</sub>), синтетичного сапфіру (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), окису магнію (MgO<sub>2</sub>), кронового скла на основі плавленого кварцу (SiO<sub>2</sub>) або германію (Ge), а також з алюмінію (Al) або заліза (Fe).

З урахуванням ослаблення гама-випромінювання елементами тракту приймача інфрачервоного випромінювання, які безпосередньо впливають на приймач, потужність дози (*P*<sub>V</sub><sup>B</sup>) і доза гама-випромінювання (*D*<sub>V</sub><sup>B</sup>) можна визначити як:

$$P_{\gamma}^{\rm B} = \frac{P_{\gamma}^{\rm n}}{\kappa_{\rm ocn_{\rm n}}^{\gamma}}, \qquad (2.1)$$

$$D_{\gamma}^{\rm B} = \frac{D_{\gamma}^{\rm T}}{K_{\rm oc, \pi_{\rm II}}^{\gamma}}, \qquad (2.2)$$

де:  $P_{\gamma}^{n}$  і  $D_{\gamma}^{n}$  потужність дози і доза гама-випромінювання, яке падає на апертуру приймача інфрачервоного випромінювання;

*K*<sup>γ</sup><sub>осл<sub>п</sub></sub>- коефіцієнт ослаблення гама-випромінювання елементами тракту прийому приймача інфрачервоного випромінювання.

Захисні властивості елементів тракту прийому приймача інфрачервоного випромінювання від будь-якого виду радіаційного випромінювання кількісно оцінюються коефіцієнтом послаблення (*K*<sub>осл</sub>), який визначається як:

$$K_{\text{осл}} = \frac{ln\Phi_0}{ln\Phi_x \cdot d},$$

де: Ф<sub>0</sub> – щільність падаючого на перешкоду потоку іонізуючого випромінювання;

Ф<sub>x</sub> – щільність потоку іонізуючого випромінювання за перешкодою;

*d* – товщина перешкоди.

Падаючий на перешкоду потік гама-квантів з щільністю потоку  $\Phi_{0\gamma}$ , пройшовши перешкоду, прийме значення:

$$\Phi_{x\gamma} = B_{\gamma} \Phi_{0\gamma} e^{\left(-\frac{d}{d_{0,5}^{\gamma}}\right)},$$

де:  $B_{\gamma}$  — фактор накопичення  $\gamma$ -квантів, які проходять через речовину товщиною d;

 $d_{0.5}^{\gamma}$  – шар половинного ослаблення гама-випромінювання.

Фактор накопичення  $B_{\gamma}$  враховує збільшення щільності гама-випромінювання в досліджуваному місці простору. При цьому на його величину впливає як розсіювання в матеріалі перешкоди падаючого потоку  $\gamma$ -квантів, так і вторинне тормозне випромінювання. Розсіювання гама-випромінювання в перешкоді обумовлюється широкою формою потоку падаючих на перешкоду  $\gamma$ -квантів, що характерно для випромінювання, яке створене внаслідок радіоактивного зараження місцевості (на прикладі наслідку техногенної аварії). Поява вторинного гамавипромінювання в перешкоді відбувається внаслідок ефекту створення пар і комптон-ефекту.

77

Значення параметру  $B_{\gamma}$  залежить від товщини перешкоди (*x*), при цьому, якщо вона менше або рівна (2.1-2.3)  $d_{0,5}^{\gamma}$ ,  $B_{\gamma} \cong 1$ . В діапазоні енергій  $\gamma$ -квантів, рівним 0,2–1,5 МеВ, величини  $d_{0,5}^{\gamma}$  для оптичних матеріалів тракту прийому АОЛЗ, а також для деяких металів, які використовуються при виготовленні корпусу і елементів конструкції АОЛЗ, представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

які можуть використовуватися при виготовленні елементів АОЛЗ						
N⁰	Матеріали, які можуть використовуватися	Значення $d_{0.5}^{\gamma}$ ,				
3/П	при виготовленні елементів атмосферно- оптичних ліній зв'язку	СМ				
1.	синтетичний сапфір	3,1				
2.	алюмінат кальцію (AlK <sub>3</sub> )	3,1				
3.	окис магнію (MgO <sub>2</sub> )	4,95				
4.	кронове скло на основі SiO <sub>2</sub>	4,75				
5.	германій (Ge)	2,3				
6.	миш'якове скло (AsS <sub>3</sub> )	2,25				
7.	залізо (Fe)	1,65				
8.	алюміній (Al)	4,62				
9.	мідь (Си)	2,43				

Значення  $d_{0,5}^{\gamma}$  для оптичних матеріалів і металів, які можуть використовуватися при виготовленні елементів АОЛЗ

Дані табл. 2.1 свідчать про те, що  $B_{\gamma}$  можна прийняти рівним одиниці. Тоді вираз для  $K_{\text{осл}}^{\gamma}$  прийме вид:

$$K_{0C,\pi}^{\gamma} = 2^{\frac{x}{d_{0,5}^{\gamma}}}.$$
 (2.3)

Залежність  $K_{\text{осл}}^{\gamma}$  від товщини перешкоди, розраховується для матеріалів, які йдуть на виготовлення оптичних елементів тракту прийому АОЛЗ.

На рис. 2.2. приведені залежності від товщини перешкоди для матеріалів, які йдуть на виготовлення оптичних елементів тракту прийому АОЛЗ.



Рис. 2.2. Залежність  $K_{\text{осл}}^{\gamma}$  від товщини перешкоди на виготовлення якої використовується:

1- синтетичний сапфір Al2O3, 2- алюмінат кальцію AlK3, 3- окис магнію MgO2, 4 - кронове скло на основі SiO2, 5- германій Ge, 6- миш'якове скло AsS3, 7- залізо Fe, 8- алюміній Al, 9 – мідь Cu.

Значення  $K_{\text{осл}}^{\gamma}$  як функції товщини перешкоди, яка виготовлена із кронового скла, при умові опромінення широким пучком гама–випромінювання, показано на

графіку рис.2.2, б. У випадку, коли гама-випромінювання проходить послідовно через кілька перешкод:

$$K_{\text{осл}_{\Pi}}^{\gamma} = \prod_{1}^{i} K_{\text{осл}_{i}}^{\gamma} , \qquad (2.4)$$

де: *і* – кількість перешкод.

Таким чином, функція ослаблення гама-випромінювання елементами тракту прийому АОЛЗ кількісно визначається коефіцієнтом ослаблення  $K_{\text{осл}_{n}}^{\gamma}$ , який по відношенню до варіанту конструкції АОЛЗ (рис.2.1) визначається як добуток коефіцієнту ослаблення випромінювання передньою частиною приймача інфрачервоного випромінювання ( $K_{\text{осл}_{n0}}^{\gamma}$ ) на коефіцієнт ослаблення випромінювання вторинним дзеркалом ( $K_{\text{осл}_{в3}}^{\gamma}$ ) і на коефіцієнт ослаблення випромінювання коректуючою лінзою ( $K_{\text{осл}_{кл}}^{\gamma}$ ):

$$K_{\text{oc}\pi_{\Pi}}^{\gamma} = K_{\text{oc}\pi_{\Pi 0}}^{\gamma} \cdot K_{\text{oc}\pi_{B3}}^{\gamma} \cdot K_{\text{oc}\pi_{K\pi}}^{\gamma}$$
(2.5)

Залежність  $K_{0CЛ_{\Pi}}^{\gamma}$  від товщини передньої частини апертури приймача інфрачервоного випромінювання, яка виготовлена з кронового скла, опроміненого широким пучком гама-випромінювання, з врахуванням ослаблення випромінювання елементами оптичної системи тракту приймача (для деяких сумарних значень товщини цих елементів), можуть бути отримані методом моделювання.

Для цього з використанням виразів (2.4), (2.5), та з врахуванням залежностей, які приведені на рис.2.2, і характеристик елементів тракту приймача інфрачервоного випромінювання розраховані і приведені залежності, які залежать від товщини передньої частини апертури приймача інфрачервоного випромінювання, сумарної товщини елементів оптичної схеми (рис.2.3).



Рис.2.3. Залежність  $K_{\text{осл}_{\Pi}}^{\gamma}$  від товщини передньої частини апертури приймача інфрачервоного випромінювання при сумарній товщині елементів оптичної схеми: 1 - 4 мм, 2 - 6 мм, 3 - 8 мм.

Виходячи з аналізу виразів (2.1)-(2.5), а також залежностей, показаних на рис. 2.3, можна зробити висновок про те, що одним із шляхів зниження впливу іонізуючого випромінювання на приймач може бути збільшення товщини передього тракту приймача інфрачервоного випромінювання. Збільшення товщини переднього тракту в діапазонах від 16 до 48-50 мм за рахунок зростання потоку гама-квантів не приведе до подальшого збільшення  $K_{\rm ocn_{r}}^{\gamma}$ .

## 2.2. Обгрунтування необхідності оцінки впливу поглиненої дози гамавипромінювання і її потужності на приймачі інфрачервоного випромінювання

Сучасні АОЛЗ можуть мати в якості приймача лазерного випромінювання кремнієві фотодіоди та інші напівпровідникові пристрої, які наведені в додатку А. Основні електричні характеристики кремнієвихі фотодіодів представлені в табл.2.2.

80

По принципу дії фотодіоди відносяться до фотонних приймачів, робота яких основана на внутрішньому фотоефекті; падаючий на фотодіод потік випромінювання викликає зміни його внутрішніх електричних характеристик.

Включені в електричну схему АОЛЗ, вони працюють в фотодіодному режимі, тобто, коли фотодіод не опромінений, і на *p-n* перехід подається запираюча напруга, то через нього тече невеликий темновий ток  $(I_T)$ , обумовлений неосновними носіями заряду (електронами в *p*-області і дірками в *n*-області). При опроміненні фотодіоду променистим потоком виникають пари електрон–дірка. Дірки, що є неосновними носіями заряду, дифундують всередину і, підійшовши до *p-n* переходу, захоплюються в *p*-область.

Збільшення кількості неосновних носіїв заряду призводить до додаткового падіння напруги на навантажувальному резисторі, який включений в електричну схему разом з фотодіодом.

Розміщення фотодіоду в полі гама-випромінювання призводить до змін – як умов генерації носіїв заряду, так і внутрішньої структури самого кристалу, тобто виникає радіаційний дефект фотодіоду. А сама зміна умов протікання внутрішніх процесів у фотодіоді визначається як радіаційний ефект.

Виникаючі в кремнієвому фотодіоді під дією гама-випромінювання радіаційні ефекти по своїй природі розділяються на:

зворотні, які обумовлені додатковою генерацією електроно-діркових пар і які приводять за час впливу гама-випромінювання до зміни питомої провідності однорідних кристалів і зростанню через p-n перехід току  $I_T$ ;

незворотні, які повязані із стійким зміщенням атомів із вузлів кристалічної решітки, що впливає на внутрішній опір фотодіоду і, як наслідок, на значення току  $I_T$ .

Якісно незворотні радіаційні дефекти можуть бути оцінені потужністю поглиненої дози.

Технічні характеристики кремнієвих фотодіодов представлена в табл. 2.2.

Інтегральна чутливість по	Темновий	Пороговий	Постійна	Темновий	Напруга
еталонному	ток,	потік,	часу,	опір,	живлення,
випромінювачу,	МкА.	$Bт/см•ГЦ^{1/2}$	Мкс	кОм	В
Ма/Лм.					
0,5 - 15	0,3 - 5	$(1 - 10) \times 10^{-7}$	1 - 10	1 -2	20-40

Технічні характеристики кремнієвих фотодіодов

Виникнення незворотніх радіаційних ефектів в напівпровідникові залежить як від енергії гама-квантів, так і від виду, і характеристик їх взаємодії з речовиною, з якої виготовлений приймач інфрачервоного випромінювання.

При взаємодії гама-випромінювання з речовиною, через яку воно проходить, можуть виникнути два види реакції: пружне (непружне) розсіювання і справжнє поглинання.

Залежність  $\frac{I_{T_R}}{I_T}$  (тут  $I_{T_R}$  – значення темнового току приймача в полі впливу гама-випромінювання) від Р<sub>γ</sub> для діода на основі кремнію, представлена на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Залежність  $\frac{I_{T_R}}{I_T}$  кремнійового фотодіоду від  $P_{\gamma}$ .

В результаті реакції пружного (непружного) розсіювання спостерігається тільки зміна траєкторії руху гама-квантів, яка супроводжується втратою деякої частини їх енергії. Пружне (непружне) розсіювання не призводить до внутрішніх змін в речовині.

Справжнє поглинання гама-квантів речовиною супроводжується рядом процесів, які перетворюють їх енергію в кінетичну енергію частинок. Із відомих ефектів, які супроводжують процес перетворення енергії гама-випромінювання в кінетичну енергію руху частинок, найбільш ефективним (при енергіях гама-квантів 0,2–1,1 MeB) по зміні внутрішньої структури речовини буде ефект утворення пар і Комптон-ефект.

Ефект виникнення пар спостерігається при енергії гама - квантів більше 1,02 МеВ. Так як енергія гама-квантів, які випромінюються уламками ділення ядерного палива, лежить в межах 0,3 – 0,6 МеВ, ефект виникнення пар в умовах впливу техногенної аварії (типу аварії ВВЕР) спостерігатися не буде.

Сутність Комптон-ефекту полягає в іонізації атомів під впливом гамавипромінювання. Ця іонізація супровджується появою електронів віддачі з власною енергією  $E_{\beta_{0m}}$ , яка визначається як:

$$E_{\beta_{0m}} = \frac{\overline{E_{\gamma}}}{1 + \frac{0.511}{\overline{E_{\gamma}}(1 - \cos\varphi)}}$$
(2.6)

де:  $\varphi$  - кут зіткнення електрона віддачі з атомом речовини.

Отримана за допомогою виразу 2.6 залежність  $E_{\beta_{om}}$  від енергії падаючої на кремнієвий фотодіод гама-випромінювання, як наслідку техногенної аварії, з урахуванням середньоефективного кута зіткнення гама-квантів з атомами кремнію представлена на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Залежність  $E_{\beta_{om}}$  від  $\overline{E_{\gamma}}$ .

В процесі руху в речовині електрони віддачі, стикаючись з новими атомами, передають їм деяку кількість енергії, яка називається енергією зміщення  $E_{d_0}$ . Значення  $E_{d_0}$ , яку передають електрони віддачі, стикаючись з атомами в процесі утворення і послідуючого руху через кристалічну решітку речовини, визначається виразом [36]:

$$E_{d_0} = \left(\frac{560}{A}\right) \left(\frac{E_\beta}{m_0 C^2}\right) \left(2 + \frac{E_\beta}{m_0 C^2}\right), \qquad (2.7)$$

де: A – атомна маса речовини;  $m_0$  – маса спокою  $\beta$ -частинки; C – швидкість світла;  $E_{\beta}$  – енергія  $\beta$ -частинки. Якщо для атому речовини, в якій під впливом гама-квантів виникає Комптонефект, буде справедлива нерівність:

$$E_{d \operatorname{nop}} < E_{d \operatorname{o}} , \qquad (2.8)$$

де:  $E_{dnop}$  – порогова для даної речовини енергія зміщення, то в цій речовині, в результаті одиничного зіткнення і подальшого зсуву атома з вузла кристалічної решітки, виникає точковий дефект, що приводить до порушення структури речовини. Наприклад, в кремнії це буде дефект Френкеля, при виникненні якого утворюється пов'язана пара вакансії, зміщеної в міжвузля атома.

При збільшенні концентрації точкових дефектів, які пов'язані з ростом поглиненої речовиною дози випромінювання, утворюються комплекси радіаційних дефектів, які при подальшому зростанні величини поглиненої дози можуть утворювати мікроскопічні області з сильно порушеною кристалічною решіткою [12, 13].

Залежність енергії  $E_{do}$ , яка створена в кристалах кремнію електронами віддачі для випромінювань, характерних в умовах техногенної аварії, від енергії  $E_{\beta_{om}}$ представлені на рис.2.6.



Рис. 2.6. Залежність  $E_{do}$  від  $E_{\beta_{om}}$  для Si.

Виходячи з того, що у кремнію  $E_{dnop} = 10$ КеВ, по представленій на рис. 2.6 залежності, можна визначити, що в умовах техногенної аварії для кремнію буде виконуватися умова (2.8), тобто у приймачі інфрачервоного випромінювання, виготовленому на основі кремнію, буде спостерігатися процес відтворення незворотнього радіаційного ефекту.

Ймовірність появи незворотніх радіаційних ефектів в речовині визначається величиною поглиненої дози ( $D_{\gamma}$ , рад) гама-випромінювання.

Побічно продемонструвати цю тезу можна, привівши залежність  $\frac{I_{T_R}}{I_T}$  від  $D_{\gamma}$ , для приймачів інфрачервоного випромінювання, побудованих на основі кремнію, представлено на рис. 2.7.



Рис.2.7. Залежність залежність  $\frac{I_{T_R}}{I_T}$  кремнієвого фотодіоду від  $D_{\gamma}$ .

Графічні залежності, представлені на рис.2.5–2.7, показують, що в полі впливу гама-випромінювання спостерігається збільшення  $I_{T_R}$ , що, в кінцевому випадку, через функціональну залежність  $I_{T_R}$  сумарний внутрішній шум, приводить до зміни виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання.

## 2.3. Розробка методики оцінки впливу гама-випромінювання на приймач інфрачервоного випромінювання

Вибір критерію оцінки впливу гама-випромінювання на виявляючу здатність приймачі інфрачервоного випромінювання.

Основними характеристиками приймача, які будуть слугувати вхідними параметрами при виконанні розрахунків технічних характеристик АОЛЗ, є виявляюча здатність (Д\*) і порогова чутливість ( $\Phi^*_{nop}$ ). Вони зв'язані між собою співвідношенням  $\Phi^*_{nop} = 1/_{A^*}$ 

Виявляюча здатність визначається виразом:

$$\mathcal{A}^* = \frac{\left(S_U \sqrt{\Delta f q_n}\right)}{\left(m \sqrt{U_{\mathrm{III}}^2}\right)} \,,$$

де: *S*<sub>U</sub> – інтегральна чутливість приймача;

q<sub>n</sub> – площа чутливості елемента приймача;

т – коефіцієнт запасу;

Δ*f* – смуга пропускання вхідного сигналу;

 $U_{\rm m}^2$  – середньоквадратичне значення сумарного шуму приймача.

В свою чергу, середньоквадратичне значення сумарного шуму ( $\overline{U_{\rm m}^2}$ ) включає:

 $\overline{U_i^2}$  – токовий шум, обумовлений змінами внутрішнього опору приймача;

$$U_{\pi}^{2}$$
 – дробовий шум – наслідок флуктуації в часі потоку носіїв заряду;

U<sup>2</sup><sub>p</sub> – радіаційний шум, обумовлений наявністю кількох джерел
 випромінювання в полі зору приймача;

 $\overline{U_{r-p}^2}$  – генераційно-рекомбінаційний шум, викликаний випадковим процесом генерації носіїв заряду в приймачі інфрачервоного випромінювання;

 $\overline{U_{\rm T}^2}$  – тепловий шум, обумовлений хаотичним тепловим рухом носіїв заряду в різних напрямках.

Серед перерахованих шумів тільки  $\overline{U_i^2}$ ,  $\overline{U_d^2}$  і  $\overline{U_T^2}$  безпосередньо залежать від темнового току ( $I_T$ ). Токовий ( $\overline{U_i^2}$ ), дробовий ( $\overline{U_d^2}$ ) і тепловой ( $\overline{U_T^2}$ ) шуми визначаються залежностями:

$$\overline{U_i^2} = \mathbf{A} \frac{I^2 R_n}{f} \Delta f , \qquad (2.9)$$

$$\overline{U_{\mathcal{A}}^2} = 2eI\Delta f R_H \quad , \tag{2.10}$$

$$\overline{U_{\mathcal{A}}^2} = 4kTR_H\Delta f , \qquad (2.11)$$

де: *I* – ток, що протікає через приймач інфрачервоного випромінювання;

являється сумою темнового току  $(I_T)$  і фототоку  $(I_{\Phi})$  приймача;

А – постійна, яка враховує тип фотоприймача, для фотодіодів приймає значення 1•10<sup>-13</sup>;

f – частота модулюючого потоку;

*R<sub>H</sub>* – темновий опір приймача;

 $\Delta f$  – рабоча смуга частот;

е – заряд електрона;

*k* – стала Больцмана;

Т – робоча температура приймача.

Збільшення  $I_{T_R}$  приймача, розташованому в полі гама-випромінювання, призводить до зміни  $\overline{U_{\mathrm{m}}^2}$ .

Залежність відношення  $\frac{\overline{U_{mR}^2}}{\overline{U_m^2}}$ , виконано на прикладі розрахунку виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання, встановленому в одному з



зразків АОЛЗ, показані на рис.2.8-2.11.

Рис.2.8. Залежність сумарного шуму кремієвого фотодіоду від  $P_{\gamma}$ .



Рис. 2.9. Залежність сумарного шуму кремнієвого фотодіоду від  $D_{\gamma}$ .



Рис 2.10. Залежність  $\frac{\mathcal{A}_R^*}{\mathcal{A}^*}$ . кремнієвого фотодіоду від  $P_{\gamma}$ .



Рис 2.11. Залежність  $\frac{A_R^*}{A^*}$  кремнієвого фотодіоду від  $D_{\gamma}$ .

Де:  $\overline{U_{\mathfrak{W}R}^2}$  - сумарний шум фотодіода в полі впливу  $\gamma$  - випромінювання, від  $P_{\gamma}$  і  $D_{\gamma}$  і відповідне зростанню  $\overline{U_{\mathfrak{W}}^2}$  зміни відношення  $\frac{A_R^*}{A^*}$ , де:  $A_R^*$  - виявляюча здатність

приймача в полі гама-випромінювання.

Аналіз графічних залежностей (рис. 2.10, 2.11) показує, що сформовані під впливом гама-випромінювання зворотні радіаційні ефекти приводять до зниження  $Д^*$  до 33 раз при досягненні  $P_{\gamma}$  значень, рівних і вище 72 рад/год. Незворотні радіаційні дефекти знижають  $Д^*$  до 8 раз при досягненні  $D_{\gamma}$  значень, рівних і більше  $10^6$  рад.

Залежності (2.7 – 2.11) дозволяють зв'язати зміни темнового току приймача з його виявляючою здатністю, а також врахувати інші характеристики приймача інфрачервоного випромінювання. При цьому оцінка впливу гама-випромінювання на приймачі, виконана на основі аналізу кількісного показника відносно зміни виявляючої здатності  $\frac{A_R^*}{A^*}$ , дозволяє оперативно і достатньо точно оцінити ступінь її зниження. Значення виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання полі гама-випромінювання ( $A_R^*$ ) може бути визначено по формулі:

$$\mathcal{A}_R^* = \frac{(S_U \sqrt{\Delta f q_n})}{\left(m \sqrt{U_{\mathcal{L}} + U_i(I_{T_R}) + U_{\mathcal{A}}(I_{T_R}) + U_T(I_{T_R})}\right)},$$
(2.12)

де:  $U_{\Sigma}$  – включає радіаційні і генераційні-рекомбінаційні шуми приймача.

*S*<sub>*U*</sub> – інтегральна чутливість приймача;

*m* – коефіцієнт запасу;

Δ*f* – смуга пропускання вхідного сигналу.

Алгоритм оцінки впливу гама-випромінювання на приймачі інфрачервоного випромінювання.

Методика оцінки впливу гама-випромінювання на приймачі інфрачервоного випромінювання представляє собою програму визначення ступеню зміни показників працездатності вказаного приладу, які в подальшому здійснюють вплив на АОЛЗ. Згідно з п.2.3, таким показником працездатності є виявляюча здатність, а оцінити її зміни в полі впливу гама-випромінювання можливо по співвідношенню  $\frac{A_R^*}{A^*}$ . Виходячи з цього, в якості показника оцінки впливу гама-випромінювання на приймачі інфрачервоного випромінювання вибираємо відносне значення виявляючої здатності в полі дії гама-випромінювання  $\overline{A^*}$ .

$$\overline{\mathcal{A}^*} = \frac{\mathcal{A}_R^*}{\mathcal{A}^*}.$$

Розроблену методику можна представити як складну систему, мета функціонування якої досягається шляхом рішення ряду задач підсистемами, які входять до її складу. Ефективність рішення кожної часткової задачі підсистемою повинна оцінюватися відповідними показниками. Аналіз процесу визначення значень виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання в умовах впливу гама-випромінювання (тобто визначення  $\overline{Д^*}$ ) дозволяє представити дану методику в вигляді сукупності окремих алгоритмів.

Ця сукупність включає алгоритм визначення кількості іонізуючого випромінювання в суміші при техногенній аварії, алгоритм прогнозування поглиненої дози гама-випромінювання і її потужності, а також алгоритм визначення  $\overline{A^*}$ .

Завданням першого алгоритма є визначення значень поглиненої дози гамавипромінювання і її потужності з врахуванням характеристик суміші іонізуючого випромінювання. В подальшому значення вказаних параметрів використовуються для визначення  $\overline{A^*}$ . Таким чином, кінцевою метою розробленої методики є визначення величини показника оцінки  $\overline{A^*}$ , досягти яку можна, наприклад, виконавши оцінку впливу гама-випромінювання, яке випускається сумішшю радіоактивних речовин на приймачі інфрачервоного випромінювання. В свою чергу, визначення  $\overline{A^*}$  досягається через визначення значень часткових показників оцінки: поглиненої дози і її потужності, які формуються під час впливу гама випромінювання, що випускається сумішшю радіоактивних речовин.

Алгоритм оцінки впливу гама-випромінювання, яке випускається сумішшю радіоактивних речовин на приймачі інфрачервоного випромінювання представлені у вигляді блок-схеми на рис. 2.12.









Рис. 2.12. Алгоритм оцінки впливу гама – випромінювання на приймачі інфрачервоного випромінювання

#### Висновки до розділу 2

В результаті досліджень, вирішена наукова задача по розробці методики оцінки впливу гама-випромінювання, що випускається сумішшю радіоактивних речовин, на приймачі інфрачервоного випромінювання. Розроблена методика має істотне значення для проведення оцінки ступеня зниження виявляючої здатності приймачів в полі впливу гама-випромінювання і є основою для обгрунтування рекомендацій по модернізації конструкції АОЛЗ з метою підвищення можливостей їх застосування в умовах впливу гама-випромінювання.

В результаті досліджень встановлено наступне:

1. Збільшенням товщини передньої чистини в діапазонах від 6 до 16 мм, з урахуванням сумарної товщини тракту приймача, можна забезпечити кратність ослаблення потоку гама-квантів від 3 до 25 разів. Збільшення товщини передньої чистини від 16 до 48-50 мм за рахунок збільшення потоку гама-квантів при їх перевідбитті і з причини виникнення вторинного випромінювання в матеріалах не забезпечить необхідну кратність ослаблення гама-квантів на приймачі інфрачервоного випромінювання.

2. Внаслідок впливу гама-випромінювання, що випускається сумішшю радіоактивних речовин внаслідок техногенної аварії на приймачі інфрачервоного випромінювання в них формуються зворотні і незворотні радіаційні ефекти, які призводять до збільшення темнового струму приймача. Це викликає необхідність врахування значень як поглиненої приймачем дози зазначеного гамавипромінювання так і потужності дози випромінювання.

3. Розроблений алгоритм оцінки впливу гама-випромінювання, що випускається сумішшю радіоактивних речовин на приймачі інфрачервоного випромінювання. В якості оціночного показника в ньому визначено відносне значення виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання як функції дози гама-випромінювання і потужності дози гама-випромінювання.

96

# РОЗДІЛ З. ОБГРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ЗМЕНШЕННЮ ВПЛИВУ ГАМА-ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЩО ВИПУСКАЄТЬСЯ СУМІШШЮ РАДІОАКТИВНИХ РЕЧОВИН НА ПРИЙМАЧІ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

### 3.1. Моделювання умов та характеристик функціонування АОЛЗ

Моделювання функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку в умовах впливу гама-випромінювання, яке випускається сумішшю радіоактивних речовин, як наслідку техногенної аварії на атмосферно-оптичні лінії зв'язку (АОЛЗ) є складовою частиною загальної задачі забезпечення їх радіаційної стійкості.

Аналіз ступеню впливу кількісних показників [1,2,3], вихідних параметрів, які входять в функціональні залежності, показав, що одним із найбільш характерних факторів [4,5], які безпосередньо впливають на функціонування АОЛЗ в умовах аварійного об'єкту (як джерела іонізуючого випромінювання) є вплив гамавипромінювання на приймач інфрачервоного випромінювання. Це може привести до зниження його виявляючої здатності нижче деякого заданого значення.

Для оцінки впливу зміни виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання в умовах іонізуючого випромінювання доцільно вдосконалити математичну модель, яка б відтворювала умови функціонування.

Математичну модель, яка б відтворювала умови [10] функціонування АОЛЗ представимо у вигляді виконання покрокових процедур (рис. 3.1).

На першому етапі відтворюється генерування двійкових бітів по випадковому закону.

Випадкові двійкові біти, іншими словами – псевдовипадкова двійкова послідовність (PRBS) є вхідними даними і генеруються по рівномірному закону генерації випадкових чисел.

На другому етапі відбувається процес перетворення двійкових бітів в електричний сигнал.



Рис. 3.1. Алгоритм моделювання умов та характеристик функціонування АОЛЗ.

Двійкові біти PRBS шляхом передискретизації представляються таким чином, що кожному біту інформації відповідає значення NoS, яке залежить від часу та доступної пам'яті. Високим швидкостям передачі інформації (даних) відповідають більші часові інтервали. Наприклад для здійснення передачі інформації зі швидкістю v на деяку відстань  $\Delta l$ , час можна визначити як T= $\Delta l/v$ . При швидкості передачі інформації становить BR=1/Ts, де Ts - період, тоді NoS $\leq$ T= $\Delta l$ •BR.

$$NOS \le \frac{T_{travel}}{T_S} = \frac{\Delta l \cdot BR}{v}$$
(3.1)

На третьому етапі здійснюється процес перетворення електричного сигналу в оптичний сигнал.

Це здійснюється на основі середньої вихідної оптичної потужності сигналу Рвих, з врахуванням коефіцієнту загасання сигналу є, що відповідає значенням 1 та 0:

$$P_1 = \frac{2P_{\text{BMX}}}{1 + \frac{1}{\varepsilon}} \tag{3.2}$$

$$P_0 = \frac{2P_{\text{BMX}}}{1+\varepsilon} \tag{3.3}$$

$$\Delta P = P_1 - P_0. \tag{3.4}$$

Сформований електричний сигнал  $S_{elec}$  на другому кроці алгоритму шляхом множення на  $\Delta P$  і з врахуванням оптичного зсуву середнього значення оптичної потужності можна вивести залежність оптичного сигналу. що генерується передавачем і представити її як:  $\Delta P \cdot S_{elec} + P$ вих.

Четвертий етап відтворює характеристики каналу АОЛЗ шляхом моделювання.

Основою розрахунку коефіцієнтів каналу  $h \in$ оптична потужність, що генерується на третьому етапі і множиться на коефіцієнти. Таким чином отримуємо оптичну потужність на стороні приймача інфрачервоного випромінювання. Коефіцієнт h, залежно від цілей моделювання, може застосовуватися до змінного оптичного сигналу  $P_{sig}$  або середньої оптичної потужності  $P_{вих}$ . Отриманий сигнал

становить  $h \cdot \Delta P \cdot S_{elec}$ , якщо обчислення ймовірності помилки BER є ціллю моделювання.

Прийнятий сигнал при моделюванні реальної системи буде описуватися залежністю h · (ΔP · S<sub>elec</sub> + Pвих).

На п'ятому етапі проводиться перетворення отриманого оптичного сигналу в електричний сигнал на основі чутливості фотодіода.

На шостому етапі до електричного сигналу додається гаусовий шум і отримується значення SNR (сигнал/шум).

При цьому необхідна потужність шуму Pn обчислюється на третьому кроці алгоритму. Адитивний шум генеруються на основі випадкового нормального закону розподілу  $N(0, \sqrt{Pn})$ , якому відповідають випадкові числа

На сьомому етапі отриманий електричний сигнал перетворюється у двійкові біти.

Шляхом порівняння середнього рівня кожного отриманого біта з пороговим, прийнятий біт визначається рівним 0 або 1. При цьому застосовується адаптивне порогове значення, усереднення здійснюється по всій довжині прийнятого сигналу. Пороговий рівень встановлюється на основі середнього значення прийнятого електричного сигналу.

На восьмому етапі вихідні біти, що передаються порівнюються з отриманими бітами, що відтворює значення ймовірності помилкового прийняття сигналу BER.

Q- коефіцієнт, який виділяється з прийнятого сигналу:

$$Q - \kappa oe \phi i цi єнт = \frac{|V_1 - V_0|}{\sigma_0 + \sigma_1},$$
(3.5)

де: V<sub>1</sub> і V<sub>0</sub>- середнє значення прийнятого сигналу, яке відповідно відповідає 1 і 0.  $\sigma_1$  і  $\sigma_0$  - значення стандартного відхилення прийнятого сигналу, яке відповідно відповідає 1 і 0.

Потужність оптичного сигналу рівна ΔР, і на приймачі призводить до зростання напруги, яка визначається як

$$V_{sig} = G \cdot \eta \cdot \Delta P \tag{3.6}$$

де: G i η - трансцендентне підсилення і чутливість відповідно. Знаючи навантаження R<sub>Load</sub> потужність сигналу буде:

$$P_{sig} = \frac{(G \cdot \eta \cdot \Delta P)^2}{R_{Load}}$$
(3.7)

На основі заданої еквівалентної потужності шуму (NEP) приймача і відомої ширини смуги сигналу BW, можливо розрахувати потужність шуму детектора:

$$P_{det} = NEP\sqrt{BW} \tag{3.8}$$

Врахування фонового світла і дробового шуму розраховуємо:

$$i_n^2 = 2 \cdot q \cdot I \cdot BW \tag{3.9}$$

де: q - заряд електрона, I – індукований ток через шуми. Для фонового шуму  $I_{bg} = \eta P_{bg}$ , де  $P_{bg}$  - потужність фонового засвічення. Для дробового шуму, якщо середня оптична потужність  $P_r$ , тоді  $I_{sn} = \eta P_r$ . У підсумку потужність шуму на виході буде становити:

$$P_n = \frac{2q\eta G^2 BW}{R_{Load}} \left( P_{bg} + P_r \right). \tag{3.10}$$

Загальна потужність шуму буде:

$$P_{noise} = NEP\sqrt{BW} + \frac{2q\eta G^2 BW}{R_{Load}} \left( P_{bg} + P_r \right).$$
(3.11)

На дев'ятому етапі здійснюється генерація випадкових чисел моделі каналу. Турбулентність - це випадкові явища. Для нормального режиму:

$$X = N(\mu_{x,turb}, \sigma_{x,turb}) \tag{3.12}$$

$$H_{t-LN} = exp(2X) \tag{3.13}$$

Варіант В- турбулентність, гама-гама-модель:

$$X = \Gamma(\alpha, 1) \tag{3.14}$$

$$Y = \Gamma(\beta, 1) \tag{3.15}$$

$$h_{t-GG} = \frac{1}{\alpha\beta} XY \tag{3.16}$$

Варіант С - помилка наведення, нормальний закон розподілу:

$$X = N(\mu_{x,PE}, \sigma_{j,PE}) \tag{3.17}$$

$$Y = N\left(\mu_{x,PE}, \sigma_{j,PE}\right) \tag{3.18}$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{3.19}$$

$$h_{PE} = A \exp\left(-\frac{2r^2}{w_{eq}^2}\right) \tag{3.20}$$

На десятому етапі здійснюється моделювання характеристик каналу, таких як похибка наведення, затухання, турбулентність.

Згенеровані значення передискретизують. Якщо швидкість DR після передискретизації бітів на другому кроці частота дискретизації буде  $F_s = DR \cdot NoS$ .

Типова когерентність каналу становить 1 м, частота  $F_{sading} = 500\Gamma$ ц.

BER по чистому каналу:

$$BER = Q\left(\frac{hI_0}{\sqrt{2N_0}}\right),\tag{3.21}$$

де 
$$Q(X) = \frac{1}{2\pi} \int_{x}^{\infty} exp(-\frac{u^2}{2}) du$$
 є функцією Q.

BER в каналі помилок наведення:

$$BER = exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_s^2}\right) \cdot \sum_{i=1}^k \omega_i Q\left[\frac{hI_0A_0}{\sqrt{2N_0}}exp\left(-\frac{4\sigma_s^2}{w_{eq}^2}x_i\right)\right] I_0\left(s\sqrt{\frac{2x_i}{\sigma_s^2}}\right)$$
(3.22)

і базується на квадратурній формулі Гаусса-Лагурера.

 $I_0(\cdot)$  є модифікована функція Бесселя для нульового порядку першого роду. ВЕR може мати наступні значення:

А) в каналі турбулентності нормального закону розподілу (А):

$$BER = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{i=1}^{k} \omega_i Q \left[ \frac{\eta I_0}{\sqrt{2V_0}} exp\left( -2\sigma_s^2 + x_i\sqrt{9\sigma_x^2} \right) \right]$$
(3.23)

і базується на квадратурній формулі Гаусса-Ерміта [1].

В) в каналі турбулентності побудованому в гама-гама моделі (варіант В):

$$BER = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\sqrt{\pi^{3}}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{5,2}^{2,4} \left[ \left(\frac{2}{\alpha\beta}\right)^{2} \cdot 2 \cdot \frac{hI_{0}}{\sqrt{2N_{0}}} \middle| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \\ 0, \frac{1}{2} \right],$$
(3.24)

де:  $G_{5,2}^{2,4}$  [·] - це функція G Мейєра [3].

С) в каналі турбулентності для нормального занону (варіант С):

$$BER = \frac{2^{\gamma^{2-1}} \Gamma\left(\frac{\gamma^{2}}{2} + \frac{1}{2}\right) exp\left(\frac{s^{2}}{\sigma_{s}^{2}} + 2\sigma_{s}^{2}\gamma^{2} + 2\sigma_{s}^{2}\gamma^{4}\right)}{\sqrt{\pi}(A_{0})^{\gamma^{2}}} \cdot \left(\frac{hI_{0}}{\sqrt{2N_{0}}}\right)^{-\frac{\gamma^{2}}{2}}$$
(3.25)

BER при помилках наведення та каналі турбулентності в гама-гама моделі визначається:

$$BER = \frac{2^{\beta-1}\Gamma\left(\frac{\beta}{2}+\frac{1}{2}\right)exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_s^2}+\frac{-s^2\frac{\gamma^2}{\sigma_s^2}}{2\beta-2\gamma^2}\right)\left(\frac{\alpha\beta}{A_0}\right)^{\beta}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\sin[(\alpha-\beta)\pi]\Gamma(-(\alpha-\beta)+1)|\gamma^2-\beta|\beta}\cdot\Gamma\left(\frac{\beta+1}{2}\right)\cdot\sqrt{\pi}\gamma^2\cdot\left(\frac{\eta I_0}{\sqrt{2V_0}}\right)^{-\frac{\beta}{2}}$$
(3.26)

У випадку, якщо приймач має апертуру діаметром d<sub>s</sub> , то для гама-гама-моделі параметри будуть:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{3.27}$$

$$d = \left(\frac{kd_s^2}{4L^{0.5}}\right) \tag{3.28}$$

$$\sigma_{lnX}^2 = \frac{0.49\sigma_R^2}{\left(1+0.65d^2+1.11\sigma_R^{12/5}\right)^{7/6}}$$
(3.29)

$$\sigma_{lnY}^2 = \frac{0.51\sigma_R^2 \left(1+0.69\sigma_R^{12/5}\right)^{-5/6}}{1+0.90d^2+0.62d^2\sigma_R^{12/5}}$$
(3.30)

Для моделювання по нормальному закону розподілу можна записати співвідношення як:

$$\frac{\sigma_I^2(d_s)}{\sigma_I^2(0)} \approx [1 + 1,062d^2]^{-7/6}$$
(3.31)

На одинадцятому етапі враховуються такі характеристики як туман або дим, геометричні параметри, світло тощо.

Залежність ослаблення та видимість під час слабкого туману показано на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Залежність питомого загасання в дБ/км від видимості в км.

За допомогою моделі Кіма, а також на основі характеристик видимості Vis параметр q [4]:

$$q = \begin{cases} 1.6, & Vis > 50 \\ 1.3, & 6 < Vis < 50 \\ 1.6 \cdot Vis + 0.34, & 1 < Vis < 6 \\ Vis - 0.5, & 0.5 < Vis < 0.1 \\ 0, & Vis < 0.1 \end{cases}$$
(3.32)

Знаючи довжину хвилі лазера  $\lambda$  (нм), параметр  $\beta_{\lambda}$  в 1/км визначається як:

$$\beta_{\lambda} = -\frac{\ln 0.02}{Vis} \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q} \tag{3.33}$$

Втрата від туману або диму враховується на основі закону Ламберта-Біра:

$$h_{PS} = exp(-\beta_{\lambda}L) \tag{3.34}$$

де L - відстань зв'язку в км.

Будемо вважати, що площа апертури приймача  $A_{R_{x-apr}}$  значно менше розміру променю в площині W(Z).

Геометрію променю і приймача в умовах впливу іонізуючого випромінювання представлено на рис. 3.3, при цьому відстань від апертури приймача до джерела випромінювання  $L \gg \lambda$ .



Рис. 3.3. Геометричні залежності параметрів апертури приймача інфрачервоного випромінювання.

При нормальній інтенсивності випромінювання врахування геометричих параметрів I<sub>n</sub>(ρ; Z) можна представити наступним чином:

$$h_{GL} = I_n(\rho; Z) \cdot T_r \cdot A_{R_{x-apr}} \cdot \cos\varphi, \cos\varphi \le \frac{1}{2}AFOV$$
(3.35)

де AFOV, T<sub>r</sub> - відповідно кутові кути поля зору та пропускання апертури приймача інфрачервоного випромінювання.

Кут φ лежить між вектором, що з'єднує лазер з апертурою та вектором нормалі до діафрагми приймача інфрачервоного випромінювання.

При рівномірному випромінюванні:

$$I_n(\rho; Z) = \frac{1}{\pi \cdot w_h(Z) \cdot w_\nu(Z)}$$
(3.36)

де: РТх - загальна потужність променя;  $w_h(Z)$  та  $w_v(Z)$  - радіус променя вздовж горизонтальних і вертикальних напрямків відповідно.

$$w_h(Z) = w_{0h} + Z\theta_{0h} \tag{3.37}$$

$$w_{\nu}(Z) = w_{0\nu} + Z\theta_{0\nu} \tag{3.38}$$

w<sub>0h</sub>та w<sub>0v</sub> - радіуси променя зі сторони передавача вздовж горизонтального та вертикального напрямків відповідно.

θ<sub>0h</sub> та θ<sub>0v</sub> - розбіжність променю (критерій 1/е) на стороні передавача відповідно вздовж горизонтальних та вертикальних напрямків.

При випромінюванні розподіленому по гаусовому закону:

$$I_n(\rho; Z) = \frac{2}{\pi \cdot w_h(Z) \cdot w_v(Z)} \exp\left(-\frac{2x^2}{w_v(Z)^2} - \frac{2y^2}{w_h(Z)^2}\right)$$
(3.39)

$$w_h(Z) = w_{0h} \sqrt{1 + \varepsilon_h \left(\frac{\lambda Z}{\pi w_{0h}^2}\right)^2}$$
(3.40)

$$w_{\nu}(Z) = w_{0\nu} \sqrt{1 + \varepsilon_{\nu} \left(\frac{\lambda Z}{\pi w_{0\nu}^2}\right)^2}$$
(3.41)

$$\varepsilon_h = 1 + 2 \frac{w_{0h}^2}{\rho_0(Z)^2} \tag{3.42}$$

$$\varepsilon_{\nu} = 1 + 2 \frac{w_{0\nu}^2}{\rho_0(Z)^2} \tag{3.43}$$

$$\rho_0(Z) = (0.55C_n^2 k^2 Z)^{-\frac{3}{5}}.$$
(3.44)

На останньому кроці враховується вплив іонізуючого випромінювання з врахуванням того, що падаючий на перешкоду потік гама-квантів з щільністю потоку  $\Phi_{0\gamma}$ , пройшовши перешкоду, прийме значення:

$$\Phi_{x\gamma} = B_{\gamma} \Phi_{0\gamma} e^{\left(-\frac{d}{d_{0,5}^{\gamma}}\right)}, \qquad (3.45)$$

де: В<sub>γ</sub> – фактор накопичення ү-квантів, які проходять через речовину товщиною d;

 $d_{0.5}^{\gamma}$  – шар половинного ослаблення гама-випромінювання.

Розроблена модель дозволяє відтворити умови функціонування АОЛЗ, в тому числі і такі специфічні умови, які можуть виникнути під впливом гамавипромінювання як наслідку техногенної аварії і привести до незворотніх і зворотніх радіаційних дефектів. В подальшому, аналіз ступеня зниження виявляючої здатності приймачів інфрачервоного випромінювання дозволить обгрунтувати рекомендації, направлені на підвищення ефективності та доцільність застосування АОЛЗ в тих чи інших умовах впливу іонізуючого випромінювання.

Подальшим напрямком досліджень є розробка рекомендацій по мінімізації впливу гама-випромінювання на існуючі АОЛЗ.

3.2. Оцінка впливу гама-випромінювання, що випускається сумішшю радіоактивних речовин на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання

Згідно з [83] оцінка впливу гама-випромінювання, яка випускається сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду ВВЕР, як наслідку техногенної аварії на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання є складовою частиною загальної задачі забезпечення радіаційної стійкості АОЛЗ.

Результати рішення задачі по оцінці впливу гама-випромінювання, на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання дозволяють визначити ступінь зниження виявляючої здатності приймача в умовах впливу гама випромінювання під впливом як незворотніх так і зворотніх радіаційних дефектів. В подальшому, аналіз ступеня зниження виявляючої здатності приймачів інфрачервоного випромінювання дозволить обгрунтувати необхідні рекомендації, направлені на доцільність та підвищення ефективності застосування АОЛЗ в умовах впливу іонізуючого випромінювання.

Аналіз ступеня впливу кількісних показників вихідних параметрів, які входять в функціональні залежності, як складові основи методики прогнозування поглиненої дози і її потужності, що формується гама-випромінюванням, яке випускається сумішшю радіовипромінювання аварійного викиду атомної енергетичної установки, показав, що одним із найбільш характерних факторів, який безпосередньо впливає на значення вказаних параметрів, є відстань від аварійного об'єкту. Отже, варіюванням точки розміщення АОЛЗ можна знизити вплив гама випромінювання на приймач інфрачервоного випромінювання. Цього можна досягти шляхом вибору такої точки місцевості, підданої радіоактивному зараженню, знаходження в якій приймача інфрачервоного випромінювання не приведе до зниження його виявляючої здатності нижче деякого заданого значення.

Для оцінки впливу зміни виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання в залежності від відстані до аварійної атомної установки (типу BBEP -1000 і BBEP – 440) було здійснено математичне моделювання, виконане по
алгоритму п. 2.3. Оцінка проводилась при наступних умовах: термін, який пройшов від початку техногенної аварії – 3 роки; швидкість середнього вітру – 0-10 м/с (дискретність 2, 5, 10); заданий стан атмосферної стійкості – конвекція (А), ізотермія (D), інверсія (G).

При проведенні моделювання ослаблення випромінювання трактом прийому випромінювання враховувалося значенням  $K_{\text{осл}_{\Sigma}}^{\gamma}$ , рівним 5,5, що відповідає характеристикам тракту прийому АОЛЗ [27, 79].

Результати моделювання в вигляді залежностей  $\overline{A^*}$  від відстані до аварійної атомної енергетичної установки типу BBEP-1000 і BBEP-440 для різних атмосферних умов з врахуванням проведення спеціальної обрабки АОЛЗ і без обробки приведені на графіках рис.3.1 – 3.4.



Рис. 3.1. Залежність виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від відстані до аварійного ВВЕР-1000 при категорії стійкості атмосфери «А» і швидкості вітру: 1 - 2 м/с, 2 - 2 м/с з СО, 3 - 5 м/с, 4 - 5 м/с з СО, 5 - 10 м/с, 10 м/с з СО.



Рис. 3.2. Залежність виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від відстані до аварійного ВВЕР-1000 при категорії стійкості атмосфери «D» і швидкості вітру: 1 - 2 м/с, 2 - 2 м/с з CO, 3 - 5 м/с, 4 - 5 м/с з CO, 5 - 10 м/с, 10 м/с з CO.

Аналіз залежностей, приведених на рис. 3.1, 3.2 показав, що зниження виявляючої здатності, що має місце в умовах, відтворених в результаті виникнення аварії загального виду на BBEP-1000, більш ніж в 2 рази, в залежності від стану атмосферної стійкості і швидкості приземного вітру буде спостерігатися на відстанях до 320 км. При цьому, у випадку коли швидкість приземного вітру сягає більше 10 м/с і категорії стійкості атмосфери «G» (стійкі умови), вплив гамавипромінювання на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання спостерігатися не буде. Проведення спеціальної обробки поверхні приймача інфрачервоного випромінювання скорочує цю відстань до 230 км.

Аналіз залежностей, приведених на рис. 3.3, 3.4 показав, що аналогічне зниження виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання, що формується у відтворених умовах, створених в результаті виникнення аварії загального виду BBEP-440, буде спостерігатися на відстанях до 180 км. При цьому, якщо швидкість приземного вітру більше 5 м/с і категорія стійкості атмосфери «G»,

вплив гама-випромінювання на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання спостерігатися не буде. Проведення спеціальної обробки поверхні приймача інфрачервоного випромінювання скорочує цю відстань до 150 км.



Рис. 3.3. Залежність виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від відстані до аварійного ВВЕР-440 при категорії стійкості атмосфери «А» і швидкості вітру: 1 - 2 м/с, 2 - 2 м/с з СО, 3 - 5 м/с, 4 - 5 м/с з СО.

Виходячи з вищевикладеного, в якості однієї з рекомендацій, направленої на підвищення ефективності приймачів інфрачервоного випромінювання в умовах впливу гама-випромінювання можна запропонувати варіювання місцем розміщення приймачів інфрачервоного випромінювання. При цьому можна досягти зниження виявляючої здатності не нижче деякого заданого (порогового) значення, що в кінцевому випадку дозволить знизити вплив гама-випромінювання, яке випускається сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду ВВЕР, на ефективність використання АОЛЗ.



Рис. 3.4. Залежність виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від відстані до аварійного ВВЕР-440 при категорії стійкості атмосфери «D» і швидкості вітру: 1 - 2 м/с, 2 - 2 м/с з CO, 3 - 5 м/с, 5 м/с з CO.

# 3.3. Рекомендації по модернізації конструкції приймачів інфрачервоного випромінювання, направлені на збереження виявляючої здатності в умовах впливу гама-випромінювання

Згідно з [14,26,83], а також проведеними дослідженнями, забезпечити радіаційну стійкість приймачів інфрачервоного випромінювання при відомому рівні впливу гама-випромінювання можна шляхом підбору приймачів інфрачервоного випромінювання з заданими значеннями цього параметру, а також за рахунок зміни параметрів схеми його включення в систему управління і шляхом організації захисту приймача інфрачервоного випромінювання методом його екранування.

Відповідно до [84], підбір інфрачервоного приймача здійснюється з врахуванням характеристик схеми його включення в систему управління. Згідно з

формулою 2.12 одним із параметрів, який впливає на значення виявляючої здатності і залежить від характеристик схеми включення інфрачервоного приймача в систему управління, є його інтегральна чутливість. Таким чином, підбір приймача інфрачервоного випромінювання необхідно провести по такому значенню його інтегральної чутливості, яке, при заданій частоті випромінювання лазера (з врахуванням частотної характеристики приймача інфрачервоного випромінювання), в умовах впливу гама-випромінювання забезпечить значення його виявляючої здатності не нижче заданої [83, 85, 92, 93].

В свою чергу, результати проведеного в п. 2.1 аналізу захищеності приймача від впливу гама-випромінювання і аналіз залежностей (3.9) – (3.12) показали, що можливими шляхами зниження впливу гама-випомінювання на виявляючу здатність приймача може бути [33,80,83,84]:

підвищення частоти випромінювання лазера;

звуження робочої смуги пропусканняя вхідного сигналу схемою включення приймача інфрачервоного випромінювання;

підвищення коефіцієнта ослаблення гама-випромінювання шляхом збільшення товщини переднього обтічника.

При цьому підвищення частоти модуляції або звуження робочої смуги пропускання схеми включення приймача інфрачервоного випромінювання може компенсувати ріст  $I_{T_R}$ , а підвищення  $K_{\text{осл}_{\Sigma}}^{\gamma}$  знизить інтенсивність гамавипромінювання, яке безпосередньо впливає на приймач.

Для забезпечення надійної модуляції сигналу, приймаємого сигналу практично допустимою частотою опромінення приймача (f) вважається така, при якій його частотна характеристика  $S_U(f)$ , зв'язана зворотньо пропорційно з (f), зменшується не більше, чим в 2 рази. Загальною умовою вибору максимально допустимої частоти модуляції служить наближене рівняння [79]:

$$(f)_{max}\tau_n \approx 0.3 , \qquad (3.46)$$

де:  $\tau_n$  – постійна часу приймача інфрачервоного випромінювання.

Вибір частоти випромінювання лазера, в даному випадку частоти модуляції, в межах, задовільняючих вираз 3.46, проводиться експериментально по результатах вимірювань чутливості інфрачервоного приймача випромінювання ЛО випромінювання заданої довжини хвилі і потужності [79]. При цьому враховується і те, що підвищення частоти модуляції зменшує відношення  $\frac{\Delta f}{f}$ , відповідно, зменшує надлишковий шум приймача і підвищує відношення сигнал/шум. В процесі розробки АОЛЗ при призначенні робочої частоти модуляції променистого потоку в вибирається значення, близьке до аналізаторі зображення верхньої межі оптимального діапазону частот приймача інфрачервоного випромінювання. Виходячи з того, що у кремнієвих фотодіодів оптимальний діапазон частот лежить в межах 2–11 кГц [79], значної компенсації збільшення I<sub>T<sub>R</sub></sub> шляхом підвищення f добитися неможливо, так як, по-перше, перевищення значення f вище i різкому оптимального буде також сприяти зниженню частотної характеристики приймача інфрачервоного випромінювання, по-друге, вимагатиме використання високочастотних лазерів, що мають більш високу вартість, масу і розміри [79, 80]. Виходячи з вищенаведеного, можна зробити висновок про те, що підвищення частоти модуляції в загальному випадку не компенсує падіння виявляючої здатності кремнієвого фотодіода, а шлях зниження рівня впливу гама-випромінювання на приймачі інфрачервоного випромінювання через підвищення частоти модуляції є безперспективним [33].

Смуга пропускання схеми включення приймача (df) визначається його частотними властивостями. При цьому ширина ефективної смуги пропускання деякого певного приймача інфрачервоного випромінювання оцінюється двома способами [79]: у вигляді (df) для частотної характеристики приймача  $S_U(f)$ , без врахування спектру шумів, і в вигляді  $(df_d)$  для частотної залежності порогової чутливості приймача, числено рівного відношенню сигнал/шум на одиницю падаючого потоку [79]. Ефективна смуга пропускання зв'язана з постійною часу приймача  $(\tau_n)$  наступним співвідношенням:

114

$$\tau_{\rm n} = \frac{1}{4\rm df}.\tag{3.47}$$

При врахуванні спектру шумів [79]:

$$\tau_{\rm nd} = \frac{1}{4({\rm df})_d} \,. \tag{3.48}$$

Практикою встановлено, що ефективна постійна часу приймача  $\tau_{nd}$  не змінюється під впливом варіацій коефіцієнта підсилення попереднього підсилювача схеми включенняя приймача по частоті. Відповідно, зміна смуги пропускання для приймача інфрачервоного випромінювання не вплине на рівень його шумів [79, 85].

Таким чином, аналізуючи вирази (3.47), (3.48) можна припустити, що якщо при розробці нових або при модернізації існуючих приймачів інфрачервоного випромінювання включити в електронну схему з вузьким інтервалом смуги пропускання вхідного сигналу то, в загальному випадку можна значно знизити вплив гама-випромінювання на характеристики даного приймача [33, 84].

Для оцінки впливу поглиненої дози гама-випромінювання і її потужності на приймачі інфрачервоного випромінювання з різною інтегральною чутливістю, які включені в схеми з різними смугами пропусканняя, було проведено математичне моделювання, виконане з використанням (3.49) – (3.52) і з врахуванням залежностей рис.3.5, 3.8. При цьому кратність зміни смуги пропускання визначалася як:

$$k_{df} = \frac{df}{df_R}, \qquad (3.49)$$

де:  $df_R$  - змінена в процесі реалізації смуга пропускання схеми включення приймача інфрачервоного випромінювання.



Рис. 3.5. Зміна виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від  $D_{\gamma}$  при відносному збільшенні його інтегральної чутливості в 3 рази: 1 - задана  $\Delta f$ , 2 - знижена  $\Delta f$  в 2 рази, 3 - знижена  $\Delta f$  в 10 разів.



Рис. 3.6. Зміна виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від  $D_r$  при відносному збільшенні його інтегральної чутливості в 5 разів: 1 - задана  $\Delta f$ , 2 - знижена  $\Delta f$  в 2 рази, 3 - знижена  $\Delta f$  в 10 разів.

Результати моделювання в вигляді графічних залежностей зміни виявляючої здатності приймачів інфрачервоного випромінювання з різною інтегральною чутливістю, які включені в схеми з різною кратністю зміни смуги пропускання (вираз (3.49)), від дози гама-випромінювання і її потужності на фоні зміни характеристик приймача інфрачервоного випромінювання, представлені на рис. 3.5 – 3.8 [27, 33, 79, 80].

Аналіз графіків рис. 3.5 – 3.8 підтверджує висновки про те, що шляхом підбору приймача з необхідним значенням інтегральної чутливості, а також за рахунок зменшення смуги пропускання вхідного сигналу схемою включення приймача можна досягти зниження рівня впливу гама-випромінювання, яке формується внаслідок техногенної аварії.



Рис. 3.7. Зміна виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від  $P_{\gamma}$  при відносному збільшенні його інтегральної чутливості в 3 рази: 1 - задана  $\Delta f$ , 2 - снижена  $\Delta f$  в 2 рази, 3 - знижена  $\Delta f$  в 10 разів.



Рис. 3.8. Зміна виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від  $P_{\gamma}$  при відносному збільшенні його інтегральної чутливості в 5 разів: 1 – задана  $\Delta f$ , 2 - знижена  $\Delta f$  в 2 рази, 3 - знижена  $\Delta f$  в 10 разів.

При розгляді методу екранування приймача інфрачервоного випромінювання від впливу гама-випромінювання необходно врахувати, що згідно п. 2.1 функція ослаблення гама-випромінювання елементами тракту прийому АОЛЗ кількісно визначається коефіцієнтом ослаблення  $K_{осл_{\Sigma}}^{\gamma}$ .

Сумарний коефіцієнт по відношенню до схеми побудови тракту прийому випромінювання (рис. 2.1) визначається як добуток коефіцієнта ослаблення випромінювання переднім обтікачем АОЛЗ ( $K_{\text{осл}_{RO}}^{\gamma}$ ) на коефіцієнт ослаблення випромінювання вторинним дзеркалом ( $K_{\text{осл}_{RJ}}^{\gamma}$ ) і на коефіцієнт ослаблення випромінювання коректуючою лінзою ( $K_{\text{осл}_{KJ}}^{\gamma}$ ). З врахуванням ослаблення гамавипромінювання елементами тракту прийому, безпосередньо впливаючі на приймач інфрачервоного випромінювання потужність дози ( $P_{\gamma}^{B}$ ) і дозу гама-випромінювання ( $D_{\gamma}^{B}$ ) можна визначити як:

$$P_{\gamma}^{B} = \frac{P_{\gamma}^{\Pi}}{K_{ocn_{\Sigma}}^{\gamma}}, \qquad (3.50)$$

$$D_{\gamma}^{B} = \frac{D_{\gamma}^{\Pi}}{K_{\text{ocn}\Sigma}^{\gamma}}, \qquad (3.51)$$

Вирази (3.50) і (3.51) через функціональні залежності  $K_{\text{осл}_{\Sigma}}^{\gamma} = f(d)$ , де: d – товщина переднього обтічника,  $\frac{A_R^*}{A^*} = f(P_{\gamma}, D_{\gamma})$ , дозволяє пов'язати падіння  $A^*$  в полі впливу гама-випромінювання з товщиною переднього обтічника приймача інфрачервоного випромінювання.

Оцінюючи ефективність методу екранування приймача від впливу гама випромінювання, необхідно прийняти до уваги те, що цей метод може бути застосований як до існуючих, так і до модернізованих (шляхом установки приймача інфрачервоного випромінювання з необхідним значенням інтегральної чутливості і (або) зниженням смуги пропускання вхідного сигналу схеми включення приймача інфрачервоного випромінювання.

Залежності зміни виявляючої здатності від товщини переднього обтічника АОЛЗ, отримані методом математичного моделювання при деяких можливих значеннях  $P_{\gamma}^{B}$  для приймачів інфрачервоного випромінювання з різною інтегральною чутливістю, включених в схеми з різною кратністю зміни смуги пропускання, від дози гама-випромінювання і її потужності на фоні зміни характеристик існуючих типів приймачів інфрачервоного випромінювання представлені на рис. 3.9 – 3.12 [27, 33, 79, 80].

Аналіз залежностей рис. 3.9 показав, що шляхом збільшення товщини переднього обтічника до 12–16 мм можна забезпечити зниження виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання в діапазоні потужностей дози гама-випромінювання 10 – 50 рад/год від 2,5 до 6,5 разів.

При цьому, збільшення товщини переднього обтічника від 16 до 45 мм приводить до зниження виявляючої здатності приймача інфрачервоного

випромінювання. Це пояснюється підсиленням потоку гама-квантів за рахунок їх перевідбиття і виникнення вторинного випромінювання, що виникає в матеріалі переднього обтічника під впливом падаючого випромінювання [26, 77].

Таким чином, шляхом варіювання значення товщини переднього обтічника АОЛЗ в діапазонах від 3 до 16 мм можна забезпечити зниження виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання не нижче 5 – 6.5 раз (при  $P_{\gamma}^{B}$  = 50 рад/год).

В свою чергу, аналіз залежностей, представлених на рис. 3.10 – 3.12 показує, що, застосовуючи даний метод до вже модернізованих приймачів інфрачервоного випромінювання, можна забезпечити зниження виявляючої здатності приймачів інфрачервоного випромінювання в умовах впливу гама-випромінювання в діапазоні потужностей 10 – 50 рад не нижче чим в два рази.



Рис. 3.9. Залежності відносної зміни виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від товщини переднього обтічника приймача при  $P_{v}^{B}$ : 1) 50 рад/год, 2) 20 рад/год, 3) 10 рад/год.



Рис. 3.10. Залежності відносної зміни виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від товщини переднього обтічника приймача при  $P_{\gamma}^{B}=10$  рад/год і відносному збільшенні його інтегральної чутливості в 3 (1,2,3) і 5 (4,5,6) разів для різних кратностей звуження  $\Delta f$ .



Рис.3.11. Залежності відносної зміни виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від товщини переднього обтічника приймача при

 $P_{\gamma}^{B}$ =20 рад/год і відносному збільшенні його інтегральної чутливості в 3 (1,2,3) і 5 (4,5,6) разів для різних кратностей звуження  $\Delta f$ .



Рис.3.12. Залежності відносної зміни виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання від товщини переднього обтічника приймача при  $P_{\gamma}^{B}$ =50 рад/год і відносному збільшенні його інтегральної чутливості в 3 (1,2,3) і 5 (4,5,6) разів для раізних кратностей звуження  $\Delta f$ .

Метод екранування шляхом збільшення товщини переднього обтічника, як рекомендацію по зниженню впливу гама-випромінювання на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання, можна розглядати тільки з врахуванням того, що передній обтічник є частиною оптичної системи приймача інфрачервоного випромінювання, яка приймає участь у перетворенні сигналу [86]. Тому, при виготовленні переднього обтічника з запропонованою товщиною, необхідно враховувати опрацьовані на етапі проєктування даного зразку АОЛЗ вимоги по перетворенню оптичних променів [79, 86].

Виконана оцінка впливу поглиненої дози випромінювання на приймач інфрачервоного випромінювання показала, що її значення до 3000 рад за рахунок

ослаблення інтенсивності випромінювання передньою частиною з товщиною більше 3 мм не буде впливати на виявляючу здатність приймача інфрачервоного випромінювання.

Збільшення товщини переднього обтічника до 16 мм дозволить забезпечити захист приймача інфрачервоного випромінювання від впливу зовнішнього гама випромінювання дозами із значеннями до 2·10<sup>4</sup> рад і більше.

Одним з можливих напрямків вдосконалення функціонування атмосфернооптичної лінії зв'язку є використання синергії безпровідних оптичних та радіотехнологій, наприклад поєднання атмосферної-оптичної лінії зв'язку з радіорелейною лінією зв'язку. За рахунок отримання повідомлень про можливості інфракрасних систем при роботі в умовах сильної радіаціації радіосистеми дозволяють створювати гігабітні безпроводні з'єднання на відстані до 3 кілометрів при оперативній доступності 99,999%. При цьому 97-99% часу (за період) передача даних здійснюється через атмосферно-оптичні лінії зв'язку, які стійкі до радіозавад і не створюють їх, а до 3% часу передача забезпечуватиметься міліметровою системою передачі даних. Таке поєднання крім високої доступності дозволить будувати системи стійкі до впливу радіаційного випромінювання та з дублюванням каналів.

Доцільним також є здійснення реконфігурації, яка замінює сегменти гібридної інформації мережі передачі і усуває дію дестабілізуючих факторів, які фізично впливають на них [5,6].

## 3.4. Апробація розроблених рекомендацій по зниженню впливу гамавипромінювання на працездатність АОЛЗ

В якості показника оцінки впливу гама-випромінювання, яке випускається сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду ВВЕР, як наслідку техногенної аварії на можливості застосування АОЛЗ, використовується параметр δ – відносне зменшення розмірів ЗВП приймача АОЛЗ під впливом гама-випромінювання. Вибір

даного параметру обумовлений тим, що розміри і конфігурація ЗВП приймача АОЛЗ безпосередньо зв'язані з критерієм ймовірності виявлення сигналу [4,87].

Аналіз основ використання АОЛЗ показує, що дальність виявлення приймачем інфрачервоного випромінювання більше максимальної дальності на деяку величину  $d_p$  [89]. Значення  $d_p$  лежить в межах 15 – 25% максимальної дальності АОЛЗ [5,27,28,29,88]. Таким чином, для АОЛЗ основною характеристикою, яка визначає розміри зони виявлення сигналу, буде максимальна дальність виявлення [5,87].

При визначенні дальності виявлення приймача інфрачервоного випромінювання коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання атмосферою  $\tau_n$  розраховується по формулі [74]:

$$\tau_{\rm n} = \exp[-A_{\rm i}(W_0 D_m)^{0.5}] K_H , \qquad (3.52)$$

де: А<sub>і</sub> – енергетичний коефіцієнт;

*W*<sub>0</sub>- коефіцієнт, що враховує поглинання випромінювання парами води:

$$W_0 = \frac{0,2167}{\mathrm{T}} \cdot \frac{f^0}{100} E_{\Pi};$$

Т – температура повітря;

 $f^{0}$  – відносна вологість повітря;

 $E_{\Pi}$  – пружна насиченість повітря парами води;

*D<sub>m</sub>* – шар атмосфери, що розглядається;

*К<sub>Н</sub>* – коефіцієнт, що враховує висоту застосування АОЛЗ.

Коефіцієнт розсіювання випромінювання в шарі атмосфери т<sub>р</sub> визначається [74]:

$$\tau_{\rm p} = \exp\left[-\frac{3.91}{V \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{\lambda_{\rm H}}{0.55}\right)_{\rm i}^{-a} D_m\right],\tag{3.53}$$

де: *V* – метеорологічна дальність видимості, км;

λ<sub>И</sub> – довжина хвилі лазера, мкм;

a – коефіцієнт прозорості шару повітря;  $a = 0,58V^{\frac{1}{3}}$ .

Як було зазначено Д<sup>\*</sup> залежить від Р<sub>γ</sub> і  $D_{\gamma}$ , відповідно Д<sub>виявл</sub>, і разом з нею розміри ЗВП, будуть залежати від Р<sub>γ</sub> і  $D_{\gamma}$ . Таким чином.  $\delta = \frac{\mathcal{A}_{\text{виявл}R}}{\mathcal{A}_{\text{виявл}} - d_P}$ , при  $\mathcal{A}_{\text{виявл}R} \leq \mathcal{A}_{\text{виявл}} - d_P$ , де  $\mathcal{A}_{\text{виявл}R}$  – дальність виявлення в полі впливу гама випромінювання.

Для виконання практичної апробації запропонованих рекомендацій було проведено математичне моделювання зміни  $\delta$  від Р<sub> $\gamma$ </sub> і  $D_{\gamma}$ . По результатам розрахунків були побудовані схеми АОЛЗ при середньому вітрі в 80 км від аварійного BBEP-1000 при категорії стійкості атмосфери "А" і швидкості середнього вітру 2 м/с.

В процесі моделювання і побудови схем застосування АОЛЗ,  $Д_{виявл}$  і  $\mathcal{A}_{виявлR}$  розраховувались при вихідних даних, прийнятих для розрахунку  $\mathcal{A}_{виявл}$  АОЛЗ:  $P_U = 10^7$  Вт,  $K_1 = 0.65$   $K_1 = 0.45$ ,  $K_{\lambda} = 0.72$ ,  $d_{виявл} = 89$  мм,  $S_{\mu} = 70$  м<sup>2</sup>,  $\rho_{\mu} = 0.25$ , n = 2,  $\tau_a = 0.713$  ( $\tau_n = 0.72$  ( $A_i = 0.03$ ,  $T = 273^0$ K,  $f^0 = 80$  %,  $E_{\pi} = 2.33^*10^{-2}$  мб,  $D_m = 15$  км,  $K_n = 0.72$ ),  $\tau_p = 0.991$  (V = 15 км,  $\lambda_H = 1.06$  мкм, a = 1.43)),  $\theta_{\lambda} = 0.75$  рад,  $m_{\mu} = 10$ .

Результати моделювння показали, що при досягненні Р<sub> $\gamma$ </sub> деякого критичного значення на поверхні АОЛЗ (Р<sup>кр</sup><sub> $\gamma$ </sub>) (при 10,8 рад/год) значення Д<sub>виявл</sub> знижуючись, досягає значення Д<sup>max</sup> і таким чином буде спостерігатися вплив Р<sub> $\gamma$ </sub> на  $\delta$ .

Подальше зниження  $\delta$  до деякого порогового значення  $P_{\gamma}$  -  $P_{\gamma}^{nop}$  (при 71,0 рад/год) приводить до того, що  $\mathcal{A}_{виявл} = \mathcal{A}_{виявлmin}$  - границя дальності виявлення АОЛЗ знизилася і досягає мінімальної дозволеної дальності, а значення  $\delta$  досягне порогового значенняя 0,25.

Таким чином, діапазон значень δ від 0,25 до 1,0 буде визначатися як критичний. Діапазон значень δ нижче 0,25 визначається як пороговий, досягнення якого не дозволить застосувати даний тип АОЛЗ.

Побудова АОЛЗ з урахуванням результатів оцінки впливу гамавипромінювання, яке випускається сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду BBEP–1000, і вплив запропонованих рекомендацій, показані на рис.3.13, 3.14.



Рис. 3.13. Залежності виявляючої задності приймача інфрачервоного випромінювання з урахуванням реалізації рекомендацій по звуженнию смуги пропускання вхідного сигналу, схеми його включення і екранування його корпусу від впливу гама – випромінювання.



Рис.3.14. Залежності виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання з урахуванням реалізації рекомендацій по звуженнию смуги пропускання вхідного сигналу, схеми його включення і екранування його корпусу від впливу гама – випромінювання.

Іх аналіз показав, що вибрані умови моделювання: характеристики аварії і відстань до АОЛЗ, забезпечили значення  $\delta$ =0,27 - в даних умовах застосувати даний тип АОЛЗ є недоцільним. Шляхом заміни приймача інфрачервоного випромінювання з інтегральною чутливістю вище існуючої в 3 рази можна підвищити значення  $\delta$ , при тих же умовах оцінки до значення 0,34, і відповідно виявляючу здатність до 2,7 км.

Відносне збільшення інтегральної чутливості приймача в 5 разів дозволить підвищити значення  $\delta$  до 0,4 од., а виявляюча здатність збільшиться на 0,5 км - до 3,2 км.

Якщо одночасно із заміною приймача зменшити смугу пропускання вхідного сигналу схеми його включення, то при відносному збільшенні інтегральної

чутливості в 3 або 5 раз звуження смуги пропускання вхідного сигналу в 2 рази забезпечить значення δ відповідно 0,37 і 0,42, а виявляюча здатність виросте відповідно до 3 і 3,4 км. При такому ж відносному збільшенні інтегральної інфрачервоного випромінювання, чутливості приймача звуження смуги пропускання вхідного сигналу в 10 разів забезпечить значення  $\delta = 0.47$ , що дозволить досягти значення виявляючої здатності відповідно 3,75 і 4,8 км. При цьому, звуження смуги пропускання вхідного сигналу схеми в 2 або 10 разів без приймача інфрачервоного випромінювання забезпечить заміни значення  $\delta$ відповідно 0,3 і 0,4, що дозволить досягти значень виявляючої здатності відповідно 2,4 і 3,2 км.

Результати моделювання показали, що збільшення товщини переднього обтічника до 16 мм дозволить отримати значення  $\delta$  рівне 0,6, відповідно збільшити виявляючу здатність до 4,8 км.

В свою чергу, у поєднанні із збільшенням товщини переднього обтічника можна додатково застосувати рекомендації по заміні типу приймача інфрачервоного випромінювання і звуженню смуги пропускання. При цьому відносне збільшення інтегральної чутливості приймача інфрачервоного випромінювання в 3 рази і зменшення смуги пропускання вхідного сигналу в 2 рази, дозволить забезпечити значення  $\delta$  рівне 0,9, а дальність виявлення до 7,2 км. Подальше звуження смуги пропускання приймача інфрачервоного випромінювання до 10 раз, а також зниження в 2 рази і більше разів смуги пропускання вхідного сигналу в забезпечить значення  $\delta$  більше о 5 разів відносною інтегральною чутливістю забезпечить значення  $\delta$  більше 0,9 і таким чином знімуться всі обмеження на використання АОЛЗ в даних умовах.

Таким чином, проведена апробація розроблених рекомендацій по зниженню впливу іонізуючого випромінювання на АОЛЗ показала адекватність їх застосування в умовах, які сформовані внаслідок техногенної аварії на атомному енергетичному обєкті.

128

#### Висновки до розділу 3

1. В розділі проведена оцінка впливу гама-випромінювання, яке випускається сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду водо - водяного енергетичного реактора, на виявляючу здатність, виконану на прикладі приймача інфрачервоного випромінювання. Результати оцінки пропонуються у вигляді запропонованих рекомендацій по вдосконаленню конструкції та розміщенню АОЛЗ.

2. Разроблені рекомендації по модернізації конструкції АОЛЗ, направлені на зниження впливу гама-випромінювання, яке випускається сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду водо - водяного енергетичного реактора, на виявляючу здатність, виконану на прикладі приймача інфрачервоного випромінювання. В якості рекомендацій запропоновано: використовувати в інфрачервоному приймачі з великими значення інтегральної чутливості; звуження смуги пропускання вхідного сигналу схемами їх включення, а також екранування приймачів шляхом збільшення товщини переднього обтічника АОЛЗ.

3. Проведена апробація запропонованих рекомендацій по зниженню впливу гама-випромінювання на можливості АОЛЗ. В результаті отримано порогове значення гама-випромінювання, при якому використання АОЛЗ даного типу недоцільно із-за обмеження його технічних можливостей (величина виявляючої здатності менше дальності на якій здійснюється передача інформації), а також підтверждена адекватність разроблених рекомендацій та спостерігається збіг отриманих результатів з відомими результатами.

#### ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблена методика оцінки впливу іонізуючого випромінювання, сформованого сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енергетичної установки типу водо - водяний енергетичний реактор AEC (як наслідку техногенної аварії), на приймачі інфрачервоного випромінювання і на її основі розроблені рекомендації з модернізації конструкції АОЛЗ, спрямовані на збереження значення виявляючої здатності приймачів в умовах впливу іонізуючого випромінювання, сформованого сумішшю радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енергетичної установки.

На основі досліджень, проведених у роботі, можна зробити висновки.

1. Аналіз процесу формування в приймачах інфрачервоного випромінювання радіаційних ефектів, що виникли під впливом іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії, показав що вид радіаційного ефекту і ступінь його впливу на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання залежить від концентрації радіоактивних речовин в атмосфері, зв'язаної з їх кількістю в суміші аварійного викиду атомної енергетичної установки, щільності розподілу радіоактивних речовин на місцевості і поверхні обладнання, а також від енергетичних, активностних, фізико – хімічних характеристик радіоактивних речовин, які визначають щільність їх розподілу на поверхні обладнання, з врахуванням їх агрегатного стану. Одним з факторів, що впливають на значення характеристик іонізуючого випромінювання, є дезактивація радіоактивних речовин з поверхні обладнання АОЛЗ.

2. Для визначення кількості радіоактивних речовин у суміші аварійного викиду атомної енергетичної установки в роботі запропонована методика, що враховує особливості розвитку техногенної аварії, тип, час стаціонарної роботи атомної енергетичної установки по виробленню електроенергії, а також кількість завантаженого в атомну енергетичну установку ядерного палива. Методика дозволяє визначити кількість як повної суміші радіоактивних речовин, викинутих в атмосферу за час розвитку техногенної аварії, так і окремо для груп

мілкодисперсних твердих і газоподібних радіоактивних речовин по стадіях розвитку техногенної аварії.

Розрахунки, проведені за запропонованою методикою, показали, що в залежності від типу атомної енергетичної установки і кількості завантаженого в неї ядерного палива сумарна кількість радіоактивного аварійного викиду атомної енергетичної установки за 3 роки стаціонарної роботи змінюється від  $6,01 \cdot 10^{20}$  до  $4,35 \cdot 10^{21}$  Бк і, відповідно, складає від 56,7% до 77,0% від накопиченої кількості радіоактивних речовин, які знаходяться під оболонкою атомної енергетичної установки. При цьому кількість газоподібних радіоактивних речовин у даній суміші змінюється від 77,6% до 83,1%.

3. Енергетичні й активністні характеристики суміші радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енергетичної установки не залежать від періоду її стаціонарної роботи. При цьому максимальна енергія бета – випромінювання суміші радіоактивних речовин за 70 діб з моменту виникнення техногенної аварії зростає від 1,02 до 1,41 МеВ. Ефективна енергія гама – випромінювання за той же період зростає від 0,364 до 0,51 МеВ.

Зміна активності суміші радіоактивних речовин із моменту виникнення техногенної аварії визначається степеневою функцією Вей і Вінгерра, показник якого для мілкодисперсних твердих і газоподібних радіоактивних речовин відповідно приймає значення 0,4 і 0,8.

4. Щільність розподілу мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин зі складу суміші техногенної аварії на поверхні обладнання АОЛЗ в залежності від стадії розвитку аварії приймає значення 0,43 – 0,64 відносних одиниць від щільності зараження мілкодисперсними твердими радіоактивними речовинами місцевості.

Дезактивація мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин із поверхні обладнання АОЛЗ, оцінюється коефіцієнтом, що приймає значення 3,9 – 16,4 відносних одиниць.

Дезактивація мілкодисперсних твердих радіоактивних речовин із поверхні обладнання оцінюється коефіцієнтом, який за період від 1 до 10 хвилин обробки поверхні, що безпосередньо формує вплив іонізуючого випромінювання на приймач інфрачервоного випромінювання, приймає значення від 56 до 92 відносних одиниць.

5. Експериментально визначені коефіцієнти, що зв'язують концентрацію газоподібних радіоактивних речовин зі складу суміші аварійного викиду атомної енергетичної установки в атмосфері і на поверхні обладнання АОЛЗ. Чисельно ці коефіцієнти приймають значення відповідно 0,18 і 0,16 1/м.

Дезактивація газоподібних радіоактивних речовин оцінюється експериментально і встановлено, що при вивезенні обладнання з зони поширення в атмосфері суміші радіоактивних речовин аварійного викиду, концентрація газоподібних радіоактивних речовин на його поверхні за час 1-2 години, знижується на 3 – 5 відсотків від початкової. Проведення дезактивації фактично не робить впливу на кількість газоподібних радіоактивних речовин, що залишиться на поверхні обладнання АОЛЗ за такий же період часу.

6. Для вирішення задачі визначення потужності дози і дози гама випромінювання в роботі запропонована окрема методика, що дозволяє отримати значення потужності і поглиненої дози гама - випромінювання в заданій точці, а також визначити границі радіоактивного зараження місцевості за заданим значенням потужності дози або дози іонізуючого випромінювання. Дана методика враховує енергетичні, активністні і фізико - хімічні характеристики суміші радіоактивних речовин аварійного викиду атомної енергетичної установки типу водо-водяний енергетичний реактор.

7. Аналіз енергетичних характеристик гама - випромінювання показав що в умовах техногенної аварії, у приймачі інфрачервоного випромінювання будуть формуватися як зворотні так і не зворотні радіаційні ефекти. При цьому ріст потужності гама - випромінювання до 72 рад/год, через ріст темнового струму, приводить до зниження виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання до 30 і більше разів, а накопичення приймачем інфрачервоного випромінювання дози гама – випромінювання приводить до зниження його випромінювання до 30 і більше разів.

8. Для оцінки впливу потужності дози і дози гама - випромінювання на виявляючої здатність приймачів інфрачервоного випромінювання у роботі розроблена окрема методика, що дозволяє зв'язати ріст темновго струму під дією іонізуючого випромінювання з падінням виявляючої здатності приймача інфрачервоного випромінювання.

9. Удосконалено метод встановлення видів радіаційних ефектів у приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку, що утворяться під дією іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті. Вказаний метод, на відміну від існуючих, враховує характристики суміші радіонуклідів аваріного викиду з радіаційно небезпечного об'єкту та особливості формування різних видів радіаційних ефектів в приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку;

10. Для зниження впливу іонізуючого випромінювання, сформованого в умовах техногенної аварії, на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання у роботі розроблені рекомендації як по модернізації, так і по вибору розташування обладнання.

Як рекомендації по модернізації приймачів інфрачервоного випромінювання у роботі запропоноване використання кремнієвих фотодіодів з вузькою смугою пропускання вхідного сигналу, використання фотоприймачів на основі LPE i-GaAs кристалів, а також запропоноване збільшення товщини переднього обтічника приймача інфрачервоного випромінювання до товщини не більш, як 16 мм.

11. У результаті практичної апробації застосування розроблених рекомендацій для зниження впливу іонізуючого випромінювання на приймачі інфрачервоного випромінювання, виконаної за критерієм відносного зниження границь зони застосування АОЛЗ, встановлено що за допомогою використання приймача з вузькою смугою пропускання можна усунути вплив іонізуючого випромінювання. Збільшення товщини переднього обтічника дозволяє частково (до значень потужності гама - випромінювання більш 140 рад) усунути вплив гама випромінювання на приймач інфрачервоного випромінювання.

12. Вперше розроблено методику оцінки впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті, на виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку. Розроблена методика, на відміну від існуючих, враховує характеристики іонізуючого випромінювання та види радіаційних ефектів, що можуть сформуватись в приймачах інфрачервоного випромінювання атмосферно-оптичних ліній зв'язку під його впливом та дозволяє оцінити вплив іонізуючого випромінювання на виявляючу здатність приймачів в залежності від відстані до аварійного радіаційно небезпечного об'єкту та характеристик іонізуючого випромінювання в точці оцінки впливу.

13. Вперше розроблена модель оцінки впливу гама-випромінювання, наукова новизна якої полягає в тому, що вона враховує характеристики іонізуючого випромінювання та види радіаційних ефектів та застосування якої дозволяє підвищити на 15-17% виявляючу здатність приймачів інфрачервоного випромінювання в умовах впливу іонізуючого випромінювання, як наслідку техногенної аварії на радіаційно небезпечному об'єкті.

14. Вірогідність отриманих результатів підтверджується фундаментальними теоретичними викладеннями й експериментальними дослідженнями.

15. Подальшим напрямком досліджень є розробка практичних рекомендацій та інструкцій по мінімізації впливу гама-випромінювання на АОЛЗ.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Blazhennyi N. Estimation of cosmic radiation on free space optical communication lines. // Modern engineering and innovative technologies (Germany) – 2021. No17. p.6-10.

2. Blazhennyi Nazarii. Development of methods for the assessment of vulnerability of the receiver input of free-space optical communication from the effects of radiation, as the effects of the destruction of radiation hazardous objects. / Nazarii Blazhennyi, Oleksandr Turovsky, Liudmyla Kyrpach, Yana Kremenetskaya, Olena Zhukova // ScienceRise (Estonia). – 2021. No. 3, p.21-28.

3. Nazarii Blazhennyi «Evaluation method of the physical compatibility of equipment in a hybrid information transmission network»: Pavlo Anakhov, Viktoriia Zhebka, Alina Tushych, Vladislav Kravchenko, Nazarii Blazhennyi, Pavlo Skladannyi, Volodymyr Sokolov, Journal of theoretical and applied information technology (E-ISSN 1817-3195 / ISSN 1992-8645). 30th November 2022. Vol.100. No 22. pp.6635-6644. (Scopus).

4. Блаженний Н.В. Обгрунтування наукового завдання по оцінці впливу факторів іонізуючого випромінювання на ефективність застосування атмосфернооптичних ліній зв'язку. / Кирпач Л.А., Туровський О.Л., Блаженний Н.В. / Науковий журнал «Телекомунікаційні та інформаційні технології». К.: ДУТ, 2021. № 1 (70). С. 54 – 64.

5. Блаженний Н.В. Результати досліджень впливу радіоактивного випромінювання на конструктивні елементи атмосферно-оптичних ліній зв'язку. / Кирпач Л.А., Блаженний Н.В., Туровський О.Л. // Науково-практичний журнал «Зв'язок». К.: ДУТ, 2021. № 2 (2021). С. 9 – 12.

6. Блаженний Н.В. Постановка задачі структурного синтезу атмосфернооптичної системи. / Кирпач Л.А., Блаженний Н.В., Голубенко О.І. / Науковопрактичний журнал «Зв'язок». К.: ДУТ, 2021. № 3 (2021). С. 22 – 26.

7. Блаженний Н.В. Вплив сонячного випромінювання (космічної радіації) на оптичні лінії зв'язку: огляд джерел. / Вчені записки Таврійського національного

університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2021, Том 32 (71) № 4, С. 40-47.

8. Блаженний Н.В. Алгоритм оцінки впливу гама–випромінювання на приймачі атмосферно-оптичних ліній зв'язку.// Туровський О.Л., Блаженний Н.В. // «Проблеми інформатизації та управління», К.: НАУ - 2021, Том 2 № 66, С 54-62.

 9. Блаженний Н.В. Моделювання функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку в умовах радіоактивного випромінювання. // Туровський О.Л., Блаженний Н.В.// «Наукоємні технології», К.: НАУ – 2021, Том 50 № 2, С 140-146.

10. Blazhennyi N.V. The role and place of atmospheric-optical communication lines in information transmission systems. Тези доповідей: XII Міжнародна науковотехнічна конференція студентства та молоді «Світ інформації та телекомунікацій» м. Київ.: ДУТ, 20 травня 2021 р. С.15-16.

11. Блаженний Н.В. Оцінка захищеності атмосферно-оптичних ліній зв'язку від гама-випромінювання. Науково-технічна конференція «Сучасні інфокомунікаційні технології» Збірник тез. К.: ДУТ – 2021, С. 127-128.

12. Blazhennyi N.V. Statement of the problem of structural synthesis of atmospheric-optical system. // Blazhennyi N.V.// International scientific and practical conference «Technical sciences: the analysis of trends and development prospects»: Conference proceedings, July 2–3, 2021. Prague: «Baltija Publishing», 2021. p.63-65.

13. Nazarii Blazhennyi. Spatial Modulation of Signals Using Polarization Methods for Wireless Communication Systems in the Optical and Radio Bands. Yana Kremenetskaya; Anatoliy Makarenko; Natalia Rudenko; Vsevolod Yakovets; Andriy Lemeshko; Nazarii Blazhennyi. 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 10-14 October 2022. Kyiv, Ukraine.

14. Патент на корисну модель 150761 Україна (заявка № u202106129), Спосіб визначення впливу радіоактивності на конструктивні елементи атмосфернооптичних систем,/ Блаженний Н.В., Кравченко В.І., Руденко Н.В., Туровський О.Л. Заявники і патентовласники Блаженний Н.В., Кравченко В.І., Руденко Н.В., Туровський О.Л.; Патент заявл. 01.11.2021. Опубліковано 13.04.2022, Бюл.№ 15. 15. Патент на корисну модель 147896 Україна (заявка № u202100905), Прилад визначення і ліквідації постановників завад, працюючих в навколоземному просторі та на земній поверхні / Блаженний Н.В., Кравченко В.І., Кирпач Л.А., Туровський О.Л. Заявники і патентовласники Блаженний Н.В., Кравченко В.І., Кирпач Л.А., Туровський О.Л.; Патент заявл. 25.02.2021. Опубліковано 16.06.2021, Бюл. № 24.

16. Висновок про видачу патенту на винахід (корисну модель) Україна (заявка № а201911422), Система управління процесом технічної експлуатації літальних та космічних апаратів / Блаженний Н.В. Заявник і патентовласник Блаженний Н.В.; Патент заявл. 25.11.2019. Опубліковано 26.05.2021, Бюл. № 21/2021.

17. Кирпач Л.А., Блаженний Н.В. Супутникові інформаційні технології. К.: ДУТ, 2021.

18. Koval S.A., Gorzhiy V.A., Pulnev A.S.: Analysis of the possibilities of organizing communication in the field area with the help of atmospheric optical communication lines. Technical sciences: traditions and innovations: materials of international correspondence scientific conf., Chelyabinsk, January 2012, edited by G.D. Akhmetova, Chelyabinsk: Two Komsomol Members, 2012, p. 168.

19. Myronenko L.: Increasing the Radiation Resistance of Integrated Circuits, Constructive Methods Based on Industrial Technology, L. Myronenko, V. Yudintsev, ELECTRONICS: Science, Technology, Business, 2012, No 8 (00122), pp. 74 - 87.

20. Poplavskyi O.A., Poplavska A.A., Korotun I.A.: Peculiarities of the Organization of Laser Information Transission through the Atmosphere for the Development of Methods and Software and Hardware for Predicting the Characteristics of Signal Images, Fiber-optic Technologies in Information (Internet, Intranet, etc.) and Energy Networks, Vinnytsia, 2014, pp. 206-209.

21. Turovsky O.L.: To the question of determining of the activity of the mixture of accidental emissions from a nuclear power plant in case of a common type accident, Works of the Academy No 6, Kyiv, NADU, 1998, C.84-88.

22. Yudintsev V.: Radiation-Resistant Integrated Circuits, Reliability in Space and on Earth, V. Yudintsev, NTB Electronics Publ., 2007, No 5, pp. 72-77.

23. Ohshima T., Onodaa S.: Radiation Resistance of Semiconductors. In: Kudo H. (eds) Radiation Applications. An Advanced Course in Nuclear Engineering, vol 07. Springer, Singapore 2018.

24. Беркман, Л. Н. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку / Л. Н. Беркман, В. К. Стеклов, Є. В. Кільчицький.— К.: Техніка, 2004.— 576 с.

25. Зеленцов В.В., Казаковцев В.П. Основы баллистического проєктирования искусственных спутников Земли: учеб. пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. - 174 с.

26. Козелков С.В., Козелкова Е.С. Измерения орбитальных параметров КА наземным РТК // Системи обробки інформації. 2010 Вип. 2 (83). С. 100-102.

27. Фролов В.Ф., Кирпач Л.А., Ільїн О.Ю. Використання узагальнених критеріїв при проєктуванні супутникових систем// Зв'язок. – 2018.- №1. С.9-11.

28. Сторчак К.П. Методи інформаційно-технологічної побудови супутникової системи збору та обробки даних // Зв'язок. - 2017. - № 6 (130) – С. 31-34.

29. Толубко В. Б. Підвищення показників якості системи управління послугами мережами майбутнього / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, Л. П. Крючкова, А. Ю. Ткачов // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. - 2018. - № 3. - С. 5-11. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzundiz\_2018\_3\_3.

Військова дозиметрія: навч. посіб. / І. Ю. Чернявський, В. В. Марущенко, І.
 М. Мартинюк. – Х.: ФВП НТУ «ХПІ», 2011. – 528 с.

31. Телекомунікаційні системи та мережі [Електронний ресурс]: Педадог.навч.засіб для вищих навч.закладів // Под ред. ХНУР., [2011 р. –] Том 2. URL: http://www.znanius.com/3640.html. (дата звернення 05.05.2021).

32. Поплавський О.А., Поплавська А.А., Коротун І.А. Особливості організації передачі інформації лазером через атмосферу для розробки методів та програмноапаратних засобів прогнозування характеристик зображень сигналу.//Волоконнооптичні технології в інформаційних (Internet, Intranet тощо) та енергетичних мережах. – Вінниця, 2014. С.206-209.

33. Мироненко Л. Повышение радиационной стойкости интегральных схем. Конструктивные методы на базе промышленной технологи / Л.Мироненко,

В.Юдинцев // ЭЛЕКТРОНИКА: наука, технология, бізнес. – 2012. –№8 (00122). – С. 74 – 87.

34. 3GPP, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz", TR 38.901 V14.0.0, May. 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.etsi.org/deliver/etsi\_tr/138900\_138999/138901/14.00.00\_60/tr\_138901v1 40000p.pdf.

35. G. R. Maccartney, T. S. Rappaport, S. Sun, and S. Deng, "Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks", IEEE Access, vol. 3, pp. 2388–2424, Oct. 2015.

36. S. Piersanti, L. A. Annoni, and D. Cassioli, "Millimeter waves channel measurements and path loss models", in Proc. 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 2012, pp. 4552–4556.

37. G. R. MacCartney and T. S. Rappaport, "Rural macrocell path loss models for millimeter wave wireless communications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 7, pp. 1663–1677, July 2017. 301

38. E. Björnson, P. Zetterberg, M. Bengtsson, and B. Ottersten, "Capacity limits and multiplexing gains of MIMO channels with transceiver impairments", IEEE Commun. Lett., vol. 17, no. 1, pp. 91–94, Jan. 2013. Areas in Communications, vol. 35, no. 7, pp. 1663–1677, July 2017.

39. P. Devgan, "A review of optoelectronic oscillators for high speed signal processing applications", ISRN Electron., vol. 2013, pp. 1-16, 2013.

40. Y. A. Kremenetskaya, I. O. Lis-kovskiy, E. R. Zhukova, "Quasi-optical approach to the analysis of the energy model of millimeter wave propagation and antenna characteristics", in Proc. IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques, Ukraine, Kyiv, 2017. pp. 395-398

41. Arvidsson B., Dunn K., Issever C., Huffman B. T., Jones M., Kierstead J., Kuyt G., Liu T., Povey A., Regnier E., Weidberg A. R., Xiangf A., Yef J. The radiation tolerance of specific optical fibres exposed to 650 kGy (Si) of ionizing radiation. Journal

ofInstrumentation.2009.Vol. 4.P07010.URL:https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/4/07/P07010/pdf.

42. Berghmans F., Deparis O., Coenen S., Decréton M., Jucker P. Trends in Optical Fibre Metrology and Standards / Ed. by Soares O. D. D. NATO ASI Series E: Applied Sciences, 1995. № 285. P. 131-156.

43. Brichard B., Fernandez A. F. Conference RADECS 2005, Short Course Notebook – New challenges for Radiation Tolerance Assessment / Ed. by Fernandez A. F. Cap d'Agde, 2005. P. 95-137.

44. Burkitt-Gray A. SDN fibre/satellite carrier plans to start services in first half of 2021. Capacity. 21 July 2020. URL: https://www.capacitymedia. com/articles/ 3825997/sdn-fibre-satellite-carrier-plans-to-start-services-in-first-half-of-2021.

45. Campbell A. B., Frieble E. J., Marshall P. W., Summers G. P., Chen Y. J. Fiber
Optic Data Bus Radiation Effects Study. Naval Research Laboratory: Washington, 1992.
91 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/235060324 \_Fiber \_Optic \_Data \_Bus\_Radiation\_Effects\_Study.

46. CMS Outreach. URL: http://cmsinfo.cern.ch/outreach/ (дата звернення 1.06.2021).

47. Fernandez A. F., Gusarov A. I., Brichard B., Bodart S., Lammens K., Berghmans F., Decreton M. C., Megret P., Blondel M., Delchambre A. Temperature monitoring of nuclear reactor cores with multiplexed fiber Bragg grating sensors. Optical Engineering. 2002. №41. P. 1246-1254.

48. Fielder R. S., Klemer D., Stinson-Bagby K. L. High neutron fluence survivability testing of advanced fiber Bragg grating sensors. AIP Conference Proceedings. 2004. № 699. P. 650-657. URL: https://doi.org/10.1063/1.1649627.

49. Friebele E. J., Long K. J., Askina C. G., Gingerich M. E., Marrone M. J., GriacomD. L. Overview Of Radiation Effects In Fiber Optics. SPIE Proceedings. 1985. Vol. 0541. URL: https://doi.org/10.1117/12.975360.

50. Friebele E. J., Wasserman L. R. Development of Radiation-Hard Fiber for IFOGs. 18th International Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, ME2. Washington DC, 2006. DOI:10.1364/OFS.2006.ME2.

51. Friebele E. J., Long K. J., Askina C. G., Gingerich M. E., Marrone M. J., GriacomD. L. Overview Of Radiation Effects In Fiber Optics. SPIE Proceedings. 1985. Vol. 0541. URL: https://doi.org/10.1117/12.975360.

52. Fruit M., Gusarov A. I., Doyle D. B., Ulbrich G. J., Hermanne A. Space radiation sensitivity of glasses: first results toward a comprehensive dose coefficients database. SPIE Proceedings. 2000. Vol. 4134. DOI: 10.1117/12.405352.

53. Girard S., Ouerdane Y., Origlio G., Marcandella C., Boukenter A., Richard N., Baggio J., Paillet P., Cannas M., Bisutti J., Meunier J. P., Boscaino R. Radiation Effects on Silica-Based Preforms and Optical Fibers - I: Experimental Study With Canonical Samples. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. №55. P. 3473-3482. DOI:10.1109/TNS.2008.2007297

54. Griscom D. L., Gingerich M. E., Friebele E. J. Radiation-induced defects in glasses: Origin ofpower-law dependence of concentration on dose. Physical Review Letters. 1993. №71. P. 1019-1022. URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.1019.

55. Gusarov A. I., Doyle D. B., Karafolas N., Berghmans F. Fiber Bragg gratings as a candidate technology for satellite optical communication payloads: radiation-induced spectral effects. SPIE Proceedings. 2000. Vol. 4134. P. 253-260. DOI:10.1117/12.405331.

56. Henschel H. Radiation hardness of present optical fibers. SPIE Proceedings. 1994. Vol. 2425. P. 21-31. URL: https://doi.org/10.1117/12.198638.

57. Henschel H., Körfer M., Kuhnhenn J., Weinand U., Wulf F. Fibre optic radiation sensor systems for particle accelerators. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2004. № 526. P. 537-550.

58. Huffman B. T., Issever C., Ryder N. C., Weidberg A. R. The radiation hardness of specific multi-mode and single-mode optical fibres at -25°C beyond a full SLHC dose to a dose of 500 kGy(Si). Journal of Instrumentation. 2010. №5, C11023. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/5/11/C11023.

59. Inaudi D., Glisic B., Fakra S., Billan J., Redaelli S., Perez J. G., Scandale W. Development of a displacement sensor for the CERN-LHC superconducting cryodipoles. Measurement Science and Technology. 2001. № 12. P. 887-896.

60. ITER. URL: http://www.iter.org (дата звернення 1.06.2021)

61. Ito Chikara, Naito Hiroyuki, Ishikawa Takashi, Ito Keisuke and oth. Development of Remote Sensing Technique Using Radiation Resistant Optical Fibers under High-Radiation Environment Conference. Proceedings of the Second International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses. 2018. DOI:10.7566/JPSCP.24.011038.

62. Ito Chikara, Naito Hiroyuki, Ohba Hironori, Saeki Morihisa and oth. In-Vessel Inspection Probing Technique Using Optical Fibers Under High Radiation Dose. 22nd International Conference on Nuclear Engineering, Prague, Czech Republic. July, 2014. DOI:10.1115/ICONE22-31110.

63. Jimenez J .J., Alvarez M. T., Tamayo R., Oter J. M., Dominguez J. A., Arruego I., Sanchez-Paramo J., Guerrero H. Proton radiation effects in high power LEDs and IREDs for optical wireless links for intra-satellite communications. IEEE Radiation Effects Data Workshop, Workshop Record. IEEE, 2006. P. 77-84.

64. Johnston A. H., Rax B. G. Proton damage in linear and digital optocouplers. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2000. № 47(3). P. 675-681. DOI: 10.1109/23.856497.

65. Juergens J., Adamovsky G. Performance Evaluation of Fiber Bragg Gratings at Elevated Temperatures. SPIE Proceedings. 2004. Vol. 5272. DOI:10.1117/12.525232.

66. Kimura A., Takada E., Fujita K., Nakazawa M., Takahashi H., Ichige S. Application of a Raman distributed temperature sensor to the experimental fast reactor joyo with correction techniques. Measurement Science and Technology. 2001. № 12. P. 966-973.

67. Kuhnhenn J., Metzger S., Henschel H. Radiation testing of optical fibres and systems at Fraunhofer Institute. ESA-NASA working meeting on Optoelectronics. 2005. №10.

68. Lauenstein J.-M., Barth J. L. Radiation Belt Modeling for Spacecraft Design: Model Comparisons for Common Orbits. GSFC.NASA.GOV. URL: https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nsrec05\_w16.pdf (дата звернення 02.06 2021). 69. Lu P., Bao X., Kulkarni N., Brown K. Gamma ray radiation induced visible light absorption in P-doped silica fibers at low dose level. Radiation Measurements. 1999. № 30. P. 725-733. URL: https://www.sciencedirect. com/science/article/abs /pii/S1350448799002334.

70. Nevlyudov I., Malik B., Tokareva O., Nevlyudova V. Підвищення ефективності оптоволоконних каналів зв'язку. Системи управління, навігації та зв'язку : збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2020. Т. 1(59). С. 151-154. URL: doi:https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.151.

71. Optical fibre sensing and systems in nuclear environments / Ed. by Berghmans F. and Decréton M. SPIE Proceedings. 1994. № 2425.

72. Ott M. Fiber Laser Components, Technology Readiness Overview. NASA, 2003. URL:

https://www.researchgate.net/publication/2918681\_Fiber\_Laser\_Components\_Technology \_Readiness\_Overview (дата звернення 02.06.2021).

73. Ott M. N. Radiation Effects Data on Commercially Available Optical Fiber: Database Summary, 2002. IEEE Radiation Effects Data Workshop, Workshop Record. 2002. P. 24-31.

74. Ott M., Friedberg P. Technology Validation of Optical Fiber Cables for Space Flight Environments. SPIE Proceedings. 2001. Vol. 4216. P. 206-217. URL: https://doi.org/10.1117/12.414117.

75. Passaro V. M. N., Armenise M. N. Neutron and gamma radiation effects in proton exchanged optical waveguides. Optics Express. 2002. Vol. 10. № 8. P. 960-964. URL: https://doi.org/10.1364/OE.10.000960.

76. Risch Brian, Achten Frank, Jaap Jensma, Myrna Boon and oth. Bend Insensitive Optical Fibers for High Radiation Environments. Project «Bend Insensitive Optical Fibers for High Radiation Environments». October, 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/282777698\_Bend\_Insensitive\_Optical\_Fibers\_f or\_High\_Radiation\_Environments.

77. Risch Brian, Overton Bob, Rosko Jack, Bergonzo Aurelien and oth. Optical Fiber and Cable Reliability for High Radiation Environments. 62nd International Wire and

CableConference.November,2012.URL:https://www.researchgate.net/publication/270893155\_Optical\_Fiber\_and\_Cable\_Reliability\_for\_High\_Radiation\_Environments.

78. Shikama T., Kakuta Tsunemi, Shamoto Naoki, Narui Minoru and oth. Behavior of developed radiation-resistant silica-core optical fibers under fission reactor irradiation. Fusion Engineering and Design. November, 2000. № 51. P. 179-183. DOI:10.1016/S0920-3796(00)00463-4.

79. Sibeck D. G., Mauk B. H., Grebowsky J. M., Fox N. J. The Living With a Star Radiation Belt Storm Probes Mission and Related Missions of Opportunity. American Geophysical Union. Fall Meeting. November 2006. URL: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006AGUFMSM33A0330S/abstract.

80. Taylor E. W. Advancement of radiation effects research in photonic technologies: application to space platforms and systems. SPIE Critical Reviews of Optical Science and Technology. 1997. CR 66. P. 58-92.

81. The ATLAS Experiment. URL: http://atlas.ch/ (дата звернення 02.06.2021).

82. Uffelen M. Van, Berghmans F., Decreton M. C., Nowodzinski A., Lecompte J. C. Evaluation of a pragmatic approach for the prediction of radiation-induced losses in optical fibers exposed to a gamma-ray environment. SPIE Proceedings. 2000. Vol. 4134. DOI:10.1117/12.405332.

83. Van Allen Probes / former RBSP Mission / За вид. Крамера Герберта Дж.Спостереження за Землею та її середовищем: огляд місій та датчиків. Springer:Verlag.EarthOnline.PortalEuropeanSpaceAgency.URL:https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/van-allen-probes(датазвернення 03.02.2006).

84. Wijnands T., De Jonge L. K., Kuhnhenn J., Hoeffgen S. K., Weinand U. Optical Absorption in Commercial Single Mode Optical Fibers in a High Energy Physics Radiation Field. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. №55. P. 2216-2222. DOI:10.1109/TNS.2008.2001859.

85. Williams R. T., Friebele E. J. CRC Handbook of laser science and technology III. Optical Materials / Ed. by Weber M.J. CRC press Inc., 1986. P. 299-499.
86. Викулин И. М., Курмашев Ш. Д., Горбачев В. Э., Криськив С. К. Деградация элементов волоконно-оптических линий связи при радиационном облучении. Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. 2012. № 1. С. 57-63. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nponaz\_2012\_1\_12.

87. Дудикевич В. Б., Опірський І. Р. Загасання оптичного сигналу у ВОЛЗ. Ukrainian Information Security Research Journal. DOI: 10.18372/2410-7840.12.1964.

88. Дудикевич В. Б., Опірський І. Р., Глущак О. Р. Модель впливів фізичних, технічних і НСД факторів на контроль захищеності і працездатності ВОЛЗ. Системи обробки інформації. 2012. №8. С. 79-82. URL: file:///C:/Documents%20and%20Settings/Dmytro/My%20Documents/Downloads/soi\_201 2\_8\_21.pdf.

89. Лук'яненко О. А, Науменко А. М. Аналіз волоконно-оптичних датчиків уякості лінії передачі. Збірник наукових праць Харківського університету ПовітрянихСил.2015.Вип.3(44).С.88-90.URL:file:///C:/Documents%20and%20Settings/Dmytro/My%20Documents/Downloads/zhups\_2015\_3\_23.pdf.

90. Малик Б. О., Токарєва О. В., Малик-Заморій С. Б. Підвищення працездатності оптоволоконних структур в умовах високих рівнів потужності іонізуючого випромінювання. Вопросы атомной науки и техники. 2018. № 2. С. 13-18.

91. Nevlyudov I., Malik B., Tokareva O., Nevlyudova V. Підвищення ефективності оптоволоконних каналів зв'язку. Системи управління, навігації та зв'язку : збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2020. Т. 1(59). С. 151-154. URL: doi:https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.151.

92. Викулин И. М., Курмашев Ш. Д., Горбачев В. Э., Криськив С. К. Деградация элементов волоконно-оптических линий связи при радиационном облучении. Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. 2012. № 1. С. 57-63. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nponaz\_2012\_1\_12.

93. Van Allen Probes / former RBSP Mission / За вид. Крамера Герберта Дж. Спостереження за Землею та її середовищем: огляд місій та датчиків. Springer:

Verlag.EarthOnline.PortalEuropeanSpaceAgency.URL:https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/van-allen-probes.

# додатки

## **ДОДАТОК А**

### ПЕРЕЛІК

## напівпровідникових пристроїв, які пропонується використовувати в приладах атмосферно-оптичних ліній зв'язку за результатами дисертаційних досліджень

№ п/п	Виріб	Основні характеристики	Призначення
1.1.	Високочутливі	Розмір кристалу, мм2 – 2,4х2,4	Спеціальна техніка,
	фотодіоди на середній	Рабоча температура, К – 80	медичне обладнання,
	інфрачервоний	Діапазон чутливості, мкм – 3-5.1	системи моніторингу
	діапазон на основі	Інтегральна струмова	навколишнього середовища
	сполук АЗВ5	чутливість, А/Вт ≥0,09	
1.2.	Інфрачервоні	Довжина хвилі генерації λг (при	Спеціальна техніка, системи
	світлодіоди з	25 ⁰С), нм – 950	охорони та сигналізації,
	довжиною хвилі	Напівширина піку	системи моніторингу
	генерації 950 нм	люмінісценції (при Ін = 100 мА,	навколишнього середовища
		25 ºC), нм – не більше 50	
		Потужність випромінювання,	
		mW – 20-22	
1.3.	Діоди Ганна на основі	Гранична частота генерації –	Напівпровідникові НВЧ
	GaAs на пористих	80-90 Пц	генератори, модулятори,
	буферних шарах,		атенюатори, хвильові
	потужні НВЧ		комутатори та активні
	транзистори		елементи фазованих
	міліметрового		антенних решіток
	діапазону довжин		
1 /	ХВИЛЬ		
1.4.	інфранорраці	$(\pi p \mu 25^{\circ} C)$ $\lambda p M m = 1.06 \pm$	точніки борторих систом
	інфрачервоні	$(1104 25 C) = 71, MKM = 1,00 \pm 0.005$	техніки, обртових систем
		Απέκτροπωμίμεςμεμμίϊ (πρι/ Ιμ. –	та тепловізорів
	на основі GaAs/InGaAs	100 мА 25°С) нм – не більше	
		50 Потужність випромінювання	
		чіпа з мікролінзою (при	
		імпульсному живленні	
		Іпр=20А), mW – 40-45	
1.5.	Ізоморфні	Параметри двовимірного	Застосовуються для
	епітаксіальні	електронного газу: Рухливість,	виготовлення
	гетероструктури на	см2/B•c – 10000	високошвидкісних і
	основі АЗВ5	Концентрація, см-3 – 3,0•1012	широкосмугових НВЧ-
	для виготовлення НВЧ	Параметри транзисторів на	приладів, МІС мм- і суб-мм-
	приладів	основі структур: Гранична	діапазонів для систем
	(в системі	частота, ГГц – 190	зв'язку, радіолокації,
	InP/InAlAs/InGaAs)	Крутизна транзистора, см – 800	радіоастрономії,
		Щільність струму, мА/мм2 ≈500	радіометрії, автомобільної
			електроніки та ін.
1.6.	Арсенід-галієві	Рабоча частота, ГТц – 0,9-3,5	Швидкодіючі потужні НВЧ-
1	високовольтні	Рабоча напруга, В – 50-600	перемикачі, підсилювачі

	гетероперехідні	Потужність навантаження, Вт –	для спеціальних систем
	транзистори	200-1000 Коефіцієнт посилення	зв'язку, радіолокації,
			радюметри
17	LPE i-GaAs ліолні	Концентрація електронів см-3	Виготовлення на основі
1.7.	структури	– 1018-1019 Рухливість	GaAs структур потужних
		електронів. см2/В*с3 – 9200-	високовольтних
		11000 Концентрація дірок, см-3	високотемпературних
		- (0.7-3)x1017	діодів
1.8.	Діоди арсенід-галієві,	Гранична частота, мін., ГГц – 0,8	Для використання в
	планарно-	Ємність діода при нульовому	перетворювачах частоти та
	епітаксіальні, з	зміщенні, ф0 – 25	детекторах сантиметрового
	бар'єром Шотткі,	Показники ідеальності ВАХ, не	і міліметрового діапазонів
	змішувально-	більше – 1,2 Пробивна напруга	довжин хвиль в складі
	детекторні	мінімальна, В – 3,0 Втрати	гібридних інтегральних
		перетворення максимальні, дь	схем
		– 6,0 Чутливість по струму, не	
		менше, $A/BT = 5,0 I абаритнірозміри ми 0.45*0.14*0.06$	
10			
1.7.	пари арсеніл- галієві	ГГи – 0.8 Ємність ліола при	для використання в
	планарно-	нульовому змішенні ф – 25	летекторах сантиметрового
	епітаксіальні. з	Пробивна напруга мінімальна.	і міліметрового діапазонів
	бар'єром Шотткі,	В – 3,0 Втрати перетворення	довжин хвиль в складі
	змішувальні	максимальні, дБ – 6,0	гібридних інтегральних
		Неідентичність параметрів	схем
		діодів в парі, не більше, % – 7,0	
		Габаритні розміри, мм –	
		0,6*0,3*0,06	
1.1	Помножувальні діоди	Загальна ємність діода без	Для помножувачів частоти
0.	на основі GaAs з	зміщення, ф – 60 Ємність діода	сантиметрового і
	бар єром Шотткі	при нульовому зміщенні, ф –	міліметрового діапазонів
		60-70	довжин хвиль, для
		Послідовний одір втрат Ом <5	
		Гранична частота з напругою	діапазону
		змішення -6	
		ГГц ≥1500	
		Пробивна напруга на рівні	
		струму 10мкА, В	
		>10	
		Габаритні розміри, мм –	
		0,45*0,14*0,06	
1.1	Помножувальні діоди	Загальна ємність діода без	Для помножувачів частоти
1.	на основі GaAs з	зміщення, ф – 400 Ємність діода	сантиметрового і
	оар єром Шотткі	з напругою зміщення, ф 140-	міліметрового діапазонів
			довжин хвиль, для
		Послідовний одів вторт $0x < 2$	підстроювання частоти ПВЧ
		Гослидовний опр втрат, ОМ 55 Гранична частота, а напригою	діапазону
1	1	i pannina iaciora, s nanpyron	

		ЗМІЩЕННЯ -6V, ГГЦ ≥500	
		пробивна напруга на рівні	
		струму ТОМКА, В	
		>10	
1 1			<b></b>
1.1	Перетворювачі	діапазон температур, к – 4,2-	перетворення температури
Ζ.	первинні термодіодні		досліджуваного об'єкта або
			середовища в електричнии
		100MAJ, D = 1,8-5	сигнал - напруга постиного
			струму
		Temilepatyp 4,250 K – 2-55	
		MB/K	
		Чутливість в інтервалі	
		температур 30423 К 17.2 год.///	
		від розв'язуваної задачіј, к 0,05-	
		$MC \leq 200$ TepMin Chymon (B	
		Габаритиі розміри, мм 2 2 * 2 <i>4</i> *	
		1 4 (бор	
		виведення), довжина виводу 13	
		-	
11	НВЧ варакторні ліоли	Повна смність ліола при	Лля використання в
1.1	НВЧ варакторні діоди	Повна ємність діода при змішенні -6В, пФ – 0,6-0,8	Для використання в пристроях параметричних
1.1 3.	НВЧ варакторні діоди	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при	Для використання в пристроях параметричних пілсилювачів, помножувачів
1.1 3.	НВЧ варакторні діоди	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ
1.1 3.	НВЧ варакторні діоди	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для
1.1 3.	НВЧ варакторні діоди	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти
1.1 3.	НВЧ варакторні діоди	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур,	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів
1.1 3.	НВЧ варакторні діоди	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів
1.1 3.	НВЧ варакторні діоди	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів
1.1 3.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві,	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно-	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового,
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі,	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5-	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально-	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально- детекторні	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10 Показник ідеальних ВАХ, не	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль в складі
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально- детекторні	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10 Показник ідеальних ВАХ, не більше – 1,2 Втрати	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль в складі гібридних інтегральних
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально- детекторні	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10 Показник ідеальних ВАХ, не більше – 1,2 Втрати перетворення, не більше, дБ –	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль в складі гібридних інтегральних схем
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально- детекторні	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10 Показник ідеальних ВАХ, не більше – 1,2 Втрати перетворення, не більше, дБ – 5,0-7,5 Чутливість по струму, не	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль в складі гібридних інтегральних схем
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально- детекторні	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10 Показник ідеальних ВАХ, не більше – 1,2 Втрати перетворення, не більше, дБ – 5,0-7,5 Чутливість по струму, не менше, А/Вт – 5 Пробивна	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль в складі гібридних інтегральних схем
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально- детекторні	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0C – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10 Показник ідеальних ВАХ, не більше – 1,2 Втрати перетворення, не більше, дБ – 5,0-7,5 Чутливість по струму, не менше, А/Вт – 5 Пробивна напруга, не менше, В – 5	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль в складі гібридних інтегральних схем
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально- детекторні	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10 Показник ідеальних ВАХ, не більше – 1,2 Втрати перетворення, не більше, дБ – 5,0-7,5 Чутливість по струму, не менше, А/Вт – 5 Пробивна напруга, не менше, В – 5 Габаритні розміри, мм – 2*1*1	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль в складі гібридних інтегральних схем
1.1 3. 1.1 4.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально- детекторні Малошумливі	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10 Показник ідеальних ВАХ, не більше – 1,2 Втрати перетворення, не більше, дБ – 5,0-7,5 Чутливість по струму, не менше, А/Вт – 5 Пробивна напруга, не менше, В – 5 <u>Габаритні розміри, мм – 2*1*1</u> Початковий струм стоку, мА –	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль в складі гібридних інтегральних схем
1.1 3. 1.1 4. 1.1 5.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально- детекторні Малошумливі транзистори арсенід-	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0C – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10 Показник ідеальних ВАХ, не більше – 1,2 Втрати перетворення, не більше, дБ – 5,0-7,5 Чутливість по струму, не менше, А/Вт – 5 Пробивна напруга, не менше, В – 5 <u>Габаритні розміри, мм – 2*1*1</u> Початковий струм стоку, мА – 8-80 Напруга відсічення, В – -2,5	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль в складі гібридних інтегральних схем Для використання в герметичних гибридно-
1.1 3. 1.1 4. 1.1 5.	НВЧ варакторні діоди Діоди арсенід-галієві, планарно- епітаксіальні, з бар'єром Шотткі, змішувально- детекторні Малошумливі транзистори арсенід- галієві епітаксійно-	Повна ємність діода при зміщенні -6В, пФ – 0,6-0,8 Коефіцієнт перекриття при напрузі 0-15 В – 6,5-9,8 Добротність, більше – 80 Пробивна напруга, В – 15-30 Діапазон робочих температур, 0С – -60+85 Габаритні розміри, мм – 2*1*1 Ємність діода при нульовому зміщенні, ф – 85-270 Послідовний опір втрат, не більше, Ом – 3,5- 10 Показник ідеальних ВАХ, не більше – 1,2 Втрати перетворення, не більше, дБ – 5,0-7,5 Чутливість по струму, не менше, А/Вт – 5 Пробивна напруга, не менше, В – 5 <u>Габаритні розміри, мм – 2*1*1</u> Початковий струм стоку, мА – 8-80 Напруга відсічення, В – -2,5 0,6 Крутизна, С – 8-45	Для використання в пристроях параметричних підсилювачів, помножувачів частоти НВЧ і КВЧ діапазонів або для перебудови частоти коливальних контурів Для використання в перетворювачах частоти та детекторах дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль в складі гібридних інтегральних схем Для використання в герметичних гибридно- інтегральних схемах

	Шотткі та каналом n-	не більше 0,3 Мінімальний	підсилювально-
	типу провідності	коефіцієнт шуму, дБ – 0,4 -1,55	перетворювальних
		Коефіцієнт посилення по	пристроїв наземного і
		потужності, дБ – 5- 14	супутникового зв'язку і
			телебачення,
			радіоастрономічної і
			радіометричної апаратури в
			частотному діапазоні
			0,0345ГГц
1.1	Арсенід-галієві	Потужність, Вт – 5-20 Прямий	Високовольтні
6.	високовольтні	струм, А – 15-30	високотемпературні
	гетероперехідні p-i-n-	Зворотня напруга, В – 700-1000	швидкодіючі діоди на
	діоди	Швидкодія, ns – 30	основі арсеніду галію (p-i-n
		Робоча температура, ОС – -	GaAs діоди).
		65260	Для використання в силовій
		Гранична частота перемикання,	електроніці, вторинних
		ГГц – 2,0-5,0	джерелах живлення,
			инверторах.
1.1	Транзистори середньої	Початковий струм стоку, мА -	Для використання в
7.	потужності арсенід-	40-500 Напруга відсічки, В – -	гібридно-інтегральних
	галієві епітаксійно-	0,42,5 Крутизна, С – 20-120	схемах підсилювальних і
	планарні з бар'єром	Зворотний струм затвору, мкА -	підсилювально-
	Шотткі та каналом n-	не більше 10 Коефіцієнт	перетворювальних
	типу провідності	посилення по потужності, дБ -	пристроїв наземного і
		4,0-8,0	супутникового зв'язку,
		Вихідна потужність, мВт - 40-	телебачення,
		500	радіоастрономічної і
			радіометричної апаратури в
			частотному діапазоні
			820ГГц

# додаток б

Електронна компонентна база, які пропонується використовувати в атмосфернооптичних лініях зв'язку за результатами дисертаційних досліджень

N⁰	Виріб	Характерист	Імпортний	Характеристики	Призначення
п/п		ики	аналог		
21	Транзистори	Вихілна	M/A-COM	Вихілна	телевізійні і
2.1.	i-GaAs	потужність1	Technology	потужність	раліомовні
	MOSFET n-	0	Solutions	100 Вт на частоті	передавачі
	канал	÷ 500 Вт в	(CIIIA) -	500	передава п, ретранслятори.
	(вертикальн	ліапазоні	UF28100H	МГц. 28B. ККЛ	рагрански гори,
	ий	частот	(LDMOS), n-	50%	військового
		$300 \div 4000$	канал	0070	призначення
		МГиз	managi		базові станції зв'язку
		ККЛ ло 80%			авіоніка
		при			abioinita
		напрузі			
		живлення			
		UDS = +220			
		B/110 B:			
		+300C			
2.2.	Транзистори	Вихідна	Freescale	Вихідна	телевізійні і
	i-GaAs	потужність	(США) -	потужність	радіомовні
	MOSFET p-	10 ÷ 500 Вт /	серія LDMOS	на частоті 960 ÷	передавачі,
	канал	500 МГц	транзисторів	1300	ретранслятори,
	(вертикальн	при	MMRF	МГц 10 ÷ 1000 Вт	радари цивільного і
	ий)	UDS = -220		при	військового
		B/-110 B,		напрузі живлення	призначення,
		ККД – 80%		50B	базові станції зв'язку,
				(КПД до 74,7%) і	авіоніка
				320	
				Вт в діапазоні	
				2700 ÷	
				2900 МГц, 30 В,	
				50%.	
2.3.	Транзистори	Вихідна	NXP	Вихідна	транзистори для
	i-GaAs	потужність	Semiconductor	потужність	базових
	JMOSFET, p-	до 500 Вт	S	85 Вт в діапазоні	станціи
	канал	/500 МГЦ;	(Нідерланди) -	1805	
		-50, -110, -	BLC8G20LS-	÷ 1880 МГЦ, при	
		220 B;	400AV	напрузі 32 В, ККД	
		ККД – до 80%	(LDMOS), n-	44%	
2.4	T	Dereitare	канал	(0 D - / 1000 ME)	
۷.4.	і Сала	<i>Бихідна</i>	INAF Somiconductor		транзистори для
	I-GAAS		Semiconductor	при	оазових
	JMUSPET, p-	$10 \div 200 \text{ BT}/$	S (Uinon nour-ui)	ЭU Ď, ККД – 40%; 100 Pm / 1000 MP	станци
	канал	U,3 ÷ 4,0	(підерланди) -		
			ΔΓΓΩΡΖΥΓΡΑ Ευνλη	при 28 В, ККД –	
				50%	
1	1	μητα – μυ δυ‰	[[]] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []	1	

			канал		
2.5.	Транзистори i-GaAs HJFET, n- канал (вертикальн ий)	Струм стоку 10 ÷ 100А; Вихідна потужність 50 ÷ 1000 Вт / 50 В, 110 В, 220 В в L – діапазоні; 20 ÷ 200 Вт / 50 В в С –діапазоні; ККД – 60 ÷ 80%; Tj = +300C	Toshiba (Японія) - Серія TIM5359-80SL ÷ TIM8996-30	Струм стоку 10 ÷ 18А; Вихідна потужність 30 ÷ 80 Вт / 10 В в L, S – діапазонах; гранична частота підсилення 5,3 ÷ 9,6 ГГц; ККД – 25 ÷ 39%	наземна та супутникова радіозв'язок, радіолокація, вхідні каскади підсилювачів, змішувачів і генераторів СВЧ діапазону
2.6.	Транзистори i-GaAs HJFET, р- канал (вертикальн ий)	Струм стоку 10 ÷ 50А; Вихідна потужність 50 ÷ 1000 Вт / 50 В, 110 В, 220 В в L – діапазоні; ККД до 60%, Tj = +300C	Toshiba (Японія) - TGI8596-50 ÷ TGI14M-50L	Струм стоку – 4,5 ÷ 5А; Вихідна потужність 50 Вт / 10В в С – діапазоні; гранична частота підсилення 8,5 ÷ 14,5 ГГц; КПД – 29 ÷ 35%	наземний та супутниковий радіозв'язок, радіолокація вхідні каскади підсилювачів, змішувачів і генераторів НВЧ діапазону
2.7.	Транзистори i-GaAs HJFET, n- канал (горизонтал ьний)	Струм стоку 1 ÷ 50А; Вихідна потужність 100 Вт / 28 В в X – діапазоні; 20 ÷ 50 Вт / 10 В в Ки – діапазоні; ККД > 45%; Tj = +300C	Mitsubishi (Японія) - Cepiя MGFL, MGFS, VGFC, MGFX, MGFK	Струм стоку 2,4 ÷ 8,0 А; Вихідна потужність 60 Вт / 10 В в L – діапазоні ÷ 8 Вт / 10В в К – діапазоні; гранична частота підсилення 1,9 ÷ 14,5 ГГц; ККД 30%	наземна та супутникова радіозв'язок, радіолокація, вхідні каскади підсилювачів, змішувачів і генераторів НВЧ діапазону
2.8.	Транзистори i-GaAs PHEMT	Гранична частота 100 ГГц;	United Monolithic Semiconductor	Гранична частота 65 ГГц;	супутниковий радіозв'язок, радіолокація

1		NF менше	S	NF = 0,5 дБ/12	
		0,35 дБ/40	(Франція) -	ГГц; NF	
		ГГц (L = 0,13)	EC2612	= 1,3 дБ/30 ГГц;	
			(P-HEMT)	NF =	
			( )	1.5 дБ/40 ГГц:	
				(L = 0,15)	
2.9.	Транзистори	Гранична	OMMIC	Гранична частота	супутниковий
	i-GaAs MJ-	частота 200	(Франція) -	100	радіозв'язок,
	HEMT	ГГц;	D01PH	ГГц; 200 ГГц;	радіолокація
		NF менше 0.5	D01MH.	NF менше 1.5	
		лБ / 60 ГГц (L	D007IH (P-	лБ/60 ГГш (L =	
		= 0.095	HEMT /	$0.13 \cdot L =$	
		= 0,0 > 0 j	DHEMT)	0 07)	
2.1	Лавинно-	10 ÷ 100 Вт /	M/A-COM	30 Вт. 9 ÷ 10 ГГи:	генерація коливань в
0	прольотні	$1 \div 20$	(CIIIA) -	10 ВТ. 17.5 ГГЦ.	НВЧ
	ліоли i-GaAs	ГГи:	Cenia	ККЛ менше 20%:	ліапазоні
	ЛПЛ	КПЛ > 30%.	MA46019 ÷	IIRRM менше 75 B.	A
	(IMPATT)	$\text{IIRRM} = 30 \div$	MA46048	$I = 15 \div 35 \text{ A}$	
		300 B	Microsemi	$C = 35 \div 70  \text{m}\Phi$	
		I0 = 0.5 A	(CIIIA) -	12 Вт / 12 ГГи	
		/πΦ T =	Cenig MI5001 ÷	КПЛ менше 18%	
		3000	MI5022	IIRRM MEHILE 70 B.	
		5000	1113022	$I = 1.0 \div 1.7 \text{ A}$	
				C = 20 ÷ 80 πΦ	
21	Тпанзистори	Неперервна	OuinStar	Неперервна	генерація коливань в
1	i-GaAs	потужність Р	Technology	потужність Р	НВЧ ліапазоні
1.	IMPATT	(MBT) = 5000	(CIIIA) - Cenig	$(MB_T) = 1000/Ka_1$	IID I dianasoni
		± 1000		(MD1) = 10007  Ku,	
1				$= \times 1117$	
		. 1000 в ліапагонах	QID	= 800/V; - 400/W:	
		в діапазонах Ка ÷ D V = 70	QID	= 800/V; = 400/W; = 20/D;	
		ы 1000 в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 В:	QID	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B:	
		в діапазонах Ka $\div$ D V = 70 $\div$ 5 B;	QID	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0.7 ÷ 2 πΦ	
		в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 B; C = 0,3 ÷ 1,5	QID	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 $\pi\Phi$	
21	і-СаАс Ганна	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 B; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ P = 100 ÷	Microsemi	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ	генерація і
2.1	i-GaAs Ганна – ліоли	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 B; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ P = 100 ÷ 3000 мВт / С	Microsemi (CIIIA) - Cenia	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 πΦ P = 500 ÷ 50  MBT / C ÷	генерація і
2.1 2.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори	в діапазонах Ka ÷ D V = 70 ÷ 5 B; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ P = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W –	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W = ліапазони:	генерація і перетворення коливань в НВЧ
2.1 2.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 B; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ P = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W – ліапазони:	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Von= 12 ÷ 15 B;	генерація і перетворення коливань в НВЧ ліапазоні на частотах
2.1 2.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 B; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ P = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W – діапазони; Von= 30 ÷ 3 B:	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Ion = 400 ÷ 1800	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0 1 до 100 ГГи
2.1 2.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий емітер»)	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 B; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ Р = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W – діапазони; Vop= 30 ÷ 3 B; Ion = 400 ÷	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Iop = 400 ÷ 1800 мA:	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0,1 до 100 ГГц
2.1 2.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий емітер»)	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 B; C = 0,3 ÷ 1,5 <u>пФ</u> P = 100 ÷ 3000 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 30 ÷ 3 B; Iop = 400 ÷ 4000 мА:	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Iop = 400 ÷ 1800 мА; ККЛ не більше	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0,1 до 100 ГГц
2.1 2.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий емітер»)	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 B; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ Р = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W – діапазони; Vop= 30 ÷ 3 B; Iop = 400 ÷ 4000 мА; ККЛ не	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Iop = 400 ÷ 1800 мА; ККД не більше 15%	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0,1 до 100 ГГц
2.1 2.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий емітер»)	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 В; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ Р = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W – діапазони; Vop= 30 ÷ 3 В; Iop = 400 ÷ 4000 мА; ККД не	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Iop = 400 ÷ 1800 мА; ККД не більше 15%	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0,1 до 100 ГГц
2.1 2.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий емітер»)	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 B; C = 0,3 ÷ 1,5 <u>пФ</u> P = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W – діапазони; Vop= 30 ÷ 3 B; Iop = 400 ÷ 4000 мА; ККД не менше 30%; Ti = 300C	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Iop = 400 ÷ 1800 мА; ККД не більше 15%	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0,1 до 100 ГГц
2.1 2.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий емітер»)	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 В; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ Р = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W – діапазони; Vop= 30 ÷ 3 В; Iop = 400 ÷ 4000 мА; ККД не менше 30%; Tj = 300C	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 πΦ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Iop = 400 ÷ 1800 мА; ККД не більше 15%	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0,1 до 100 ГГц
2.1 2. 2.1	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий емітер») Лавинно-	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 В; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ Р = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W – діапазони; Vop= 30 ÷ 3 В; Iop = 400 ÷ 4000 мА; ККД не менше 30%; Tj = 300C 300B, 10 ÷ 50	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060 Oulu University	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Iop = 400 ÷ 1800 мА; ККД не більше 15% 300 B, 10 Bт / L,S -	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0,1 до 100 ГГц радіолокація,
2.1 2. 2.1 3.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий емітер») Лавинно- прольотні	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 В; C = 0,3 ÷ 1,5 пФ Р = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W – діапазони; Vop= 30 ÷ 3 В; Iop = 400 ÷ 4000 мА; ККД не менше 30%; Tj = 300C 300B, 10 ÷ 50 Вт / L,	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060 Oulu University (Фінляндія) -	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Iop = 400 ÷ 1800 мА; ККД не більше 15% 300 B, 10 Bт / L,S - діапазони	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0,1 до 100 ГГц радіолокація, супутниковий зв'язок,
2.1 2. 2.1 3.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий емітер») Лавинно- прольотні транзистори	<ul> <li>в діапазонах</li> <li>Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 В;</li> <li>С = 0,3 ÷ 1,5 пФ</li> <li>Р = 100 ÷</li> <li>3000 мВт / С ÷ W –</li> <li>діапазони;</li> <li>Vop= 30 ÷ 3 В;</li> <li>Iop = 400 ÷</li> <li>4000 мА;</li> <li>ККД не</li> <li>менше 30%;</li> <li>Тј = 300С</li> <li>300В, 10 ÷ 50 Вт / L,</li> <li>S, С –</li> </ul>	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060 Oulu University (Фінляндія) - аналоги GaAs	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Iop = 400 ÷ 1800 мА; KKД не більше 15% 300 B, 10 Bт / L,S - діапазони	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0,1 до 100 ГГц радіолокація, супутниковий зв'язок, робототехніка
2.1 2. 2.1 3.	i-GaAs Ганна – діоди, транзистори Ганна («прозорий емітер») Лавинно- прольотні транзистори i-GaAs ЛПТ	в діапазонах Ка ÷ D V = 70 ÷ 5 В; C = 0,3 ÷ 1,5 <u>пФ</u> P = 100 ÷ 3000 мВт / С ÷ W – діапазони; Vop= 30 ÷ 3 В; Iop = 400 ÷ 4000 мА; ККД не менше 30%; <u>Tj = 300C</u> 300B, 10 ÷ 50 Вт / L, <i>S</i> , С – діапазони	QID Microsemi (США) - Серія MG1001 ÷ MG1060 Oulu University (Фінляндія) - аналоги GaAs ЛПТ (ПРОТОТИП)	= 800/V; = 400/W; = 20/D; V = 50 ÷ 7 B; C = 0,7 ÷ 3 пФ P = 500 ÷ 50 мВт / C ÷ W – діапазони; Vop= 12 ÷ 15 B; Iop = 400 ÷ 1800 мА; ККД не більше 15% 300 B, 10 Bт / L,S - діапазони	генерація і перетворення коливань в НВЧ діапазоні на частотах від 0,1 до 100 ГГц радіолокація, супутниковий зв'язок, робототехніка

2.1	Транзистори	Сі0 не більше	Microsemi	$Ci0 = 0.06 \div 0.12$	низьковольтні
4.	i-GaAs	0.04 πΦ:	(CIIIA) -	пФ:	ланиюги блоків
	HIFET, n-	RS не більше	Cenia MS8001-	RS не більше 6 :	живлення.
	канал	3:	MS8004	частота $9.3 \div 3.6$	стабілізатори.
	(вертикальн	f не менше	Cenia MS8250	ГГи:	схеми захисту
	ий)	200 FFu:	÷	UF не більше 0.85	
		$UF = 0.3 \div 0.4$	P2920. MS8350	B	
		B	÷	Ci0 0.45 πΦ: RS 3 :	
		_	P2819	частота до 100	
			Skyworks	ГГи:	
			Solutions	$UF = 0.65 \div 0.75 B$	
			Inc. (CIIIA) -	Сі0 не більше 0.05	
			Серія	пФ:	
			DMK2790 ÷	RS не більше 7 :	
			DMK2308	f не менше 100	
				ГГи:	
				$UF = 0.65 \div 0.75 B$	
2.1	i-GaAs n+ - i –	Напруга	Microsemi	Напруга	силова електроніка
5.	n+ HEMD -	блокування	(США) - Серія	блокування від 20	різного призначення -
	гетеродіоди	від 10 до 300	GC4200 ÷ 4900	до 1000 В;	інвертори,
	i-GaAs p-i-n	B;		$UF = 0.8 \div 0.3 B;$	перетворювачі,
	діоди	UF не більше		ємність при (U =	джерела
		0,4 В; ємність		0)	живлення
		0,01 ÷ 0,5 πΦ;		0,1 ÷ 1,0 пФ;	
		частотний		частотний	
		діапазон 0,3		діапазон 0,3 ÷ 40	
		÷ 100 ГГц		ГГц	
		Напруга		,	
		блокування			
		від 200 до			
		1200 B;			
		ємність 0,01			
		÷ 0,5 пФ;			
		частотний			
		діапазон			
		0,3 ÷ 80 ГГц			
2.1	Транзистори	Вихідна	н/д	н/д	наземний і
6.	i-GaAs	потужність	-		супутниковий
	MOSFET n-	10 ÷ 50 Вт на			радіозв'язок
	канал	частотах			-
		8 ÷ 20 ГГц			
		при			
		напрузі			
		живлення			
		+10 B; +28B;			
		ККД до			
		60 ÷ 70%.			

2.1	Транзистори	Вихідна	н/д	н/д	зв'язок в
7.	i-GaAs	потужність			мікрохвильовому і
	MOS - HEMT	10 Вт (Ka) ÷			міліметровому
		1,0 Вт			діапазоні
		(W) при			довжин хвиль, радари
		відповідній			i
		напрузі 10 ÷			радіоастрономія,
		3 вольт;			мобільні
		ККД 50%.			телефони,
					широкосмугові
					супутникові
					ресивери,
					системи
					електронного
					виявлення
2.1	Фотоприйма	ачі на основі	Вперше в світ	совій практиці план	нуються до розробки
8	MOCVD	на LPE i-	фотоприй	і́мачі на основі LPE	i-GaAs кристалів
	GaAs кристал	ів в діапазоні			
	3 ÷ 5	МКМ			

Програма для реалізації алгоритму та моделювання умов та характеристик

#### функціонування АОЛЗ

```
18.05.2023
```

```
% Scr-F07
% параметрів для системи АОЛЗ
% Автор: Блаженний Назарій Валерійович
% Опис: Цей файл використовується для визначення всіх
параметрів АОЛЗ, включаючи вплив радіації, як наслідку
техногенної аварії.
%% моделювання
Sim Par = ' POW '; % параметру моделювання; 'POW' = середня
оптична сила варірується, 'EXR' = коефіцієнт розширення
варірується.
Avg_Opt_Pow_start = 0,1e-3 ; % середньої оптичної потужності -
початкове значення (Вт)
Avg_Opt_Pow_end = 5e-3 ; % середньої оптичної потужності -
значення зупинки (Вт)
Avg_Opt_Pow_step = 5 ; % середньої оптичної потужності -
значення кроку (Вт)
Avg_Opt_Pow_const = 100e-3 ; % постійної оптичної середньої
потужності (Вт)
ext ratio start = 2 ; % коефіцієнта заимирання = Р max / Р min
- початкове значення
ext_ratio_end = 200 ; % коефіцієнта заимирання = P_max / P_min
- значення зупинки
ext_ratio_step = 10 ; % коефіцієнта заимирання = P_max / P_min
- значення кроку
ext ratio const = 20 ; % коефіцієнта постійного заимирання =
P_max / P_min
RepOrd = 2 ; % повторення Замовлення
%% бітових операцій
Sync_EN = false ; %, якщо потрібна синхронізація
NoB = 5e6 ; % кількості бітів для кожної пакетної передачі
BR = 1e6 ; % Швидкість передачі даних (біт / с)
NoS = 5 ; % Кількість зразків на біт
%% модуляції базової смуги
лямбда = 1550е-9 ; % довжини хвилі лазера (м)
Sig_Step = 5e-3 ; % кроку сигналу для кожного рівня сигналу
(A)
BW = BR * 1,25 ; % смуги пропускання сигналу базової смуги
%% лазер
Las_Eff = 0,5 ; % ефективності внутрішньої лазерної модуляції
(BT / A)
Sig_Level = 0,5 ; % калібрувальна константа - рівень
```

```
постійного струму оптичного сигналу для модуляції NRZ-OOK
%% фонове світло
P_background = 0,01e-3 ; % потужності фонового світла (Вт);
випромінювання, розсіяне від сонця та неба
%% впливу іонізуючого випромінювання
background = 0,01e-3 ; % потужності іонізуючого випромінювання
(BT);
%% геометричних втрат
GL_EN = помилковий ; %, якщо враховувати геометричні втрати
Prop_Mod = 'UNI '; % поширення променя / модель освітлення;
'UNI' = рівномірне поширення / освітлення, 'GUS' = поширення /
освітлення Гауса
%% канал втрат
MiscLoss = 0; % різної втрати каналу (дБ)
Link_Len = 500 ; % довжини ланки (м)
Fading Add = ' M2 '; % ефект вицвітання; 'M1' = затухання
впливає на середню потужність, 'M2' = затухання впливає на
сигнал, 'M3' = затухання впливає на середню потужність + сигнал
%% канал туману / диму
FS EN = помилковий ; %, якщо присутній ефект туману / диму
Vis FS = 2,25 ; % видимість туману / диму (км)
лямбда 0 = 550е-9; % опорної довжини хвилі (зелене світло)
(M)
T th FS = 2 / 100; % nopir контрасту (типове значення = 2\%)
%% канал турбулентності
Turb EN = true ; %, якщо присутній ефект турбулентності
Cn2 = 4e- 13 ; % коефіцієнта структури показника заломлення (m
^ -2 / 3)
F_t = 500 ; % максимальної частоти турбулентності (Гц);
зворотна тепморальної когерентності (1 - 10 мС)
Resamp_Turb = ' RECT '; % метод передискретизації зразків
турбулентності; 'RES' = використовує функцію 'resample', 'RECT'
= використовує функцію 'rectpulse'
Turb Mod = 'GG '; модель турбулентності %; 'LN' =
Логарифмічна модель, 'GG' = Гама-Гама модель
%% канал помилки вказівки
PE EN = істина ; %, якщо присутній ефект помилок наведення
sig_j_PE = 0,5 ; % похибок наведення при горизонтальному
тремтінні (м)
mu_h_PE = 0 ; % горизонтального зміщення
mu_v_PE = 0 ; % вертикального зміщення
F p = 500 ; % максимальних частот помилок наведення (Гц);
зворотна тепморальної когерентності (1 - 10 мС)
Resamp_PE = ' RECT '; % метод передискретизації зразків
помилок наведення; 'RES' = використовує функцію 'resample',
'RECT' = використовує функцію 'rectpulse'
%% оптика передавача
```

```
TX_AP_Type = ' ANG '; % типу параметра променя передавача;
'ANG' = задано кут розбіжності, 'DIA' = діаметр діафрагми Тх
Prop Type = ' GUS '; % моделі поширення лазера; 'GUS' =
модель поширення Госсена, 'UNI' = рівномірна модель поширення
theta_d_v = 10 ; % повного кута вертикальної розбіжності
(град)
theta_d_h = 10 ; % повного кута горизонтальної розбіжності
(град)
w_tx_v = 5e-3 ; % розміру вертикальної балки (м)
w_tx_h = 5e-3 ; % розміру горизонтальної балки (м)
Tx Pos = [0;0;0]; % декартового положення джерела лазера
в глобальній координаті (м, м, м)
Tx_Dir = [cosd ( 90 ); sind ( 90 ); 0 ]; % напрямок поширення
джерела; не може бути 0
Tx_Ori = 0 ; % орієнтація джерела (град); навколо місцевої осі
z
%% оптика приймача інфрачервоного випромінювання
Rx_Ap_dia = 0,005 ; % діаметр діафрагми приймача
інфрачервоного випромінювання (м)
Rx Pos = [sqrt (Link Len ^ 2 - 2 ^ 2); 2; 0]; % декартового
положення діафрагми приймача інфрачервоного випромінювання в
глобальній координаті (м, м, м)
Rx_Dir = [cosd (45 + 180); синд (45 + 180); 0]; %
напрямок діафрагми приймача інфрачервоного випромінювання до
нормальний до поверхні детектора; не може бути 0
Rx Ori = 0 ; % орієнтація діафрагми (град); навколо місцевої
oci z
Rx Trn = 85 ; % смуги пропускання приймача інфрачервоного
випромінювання (%)
AFOV = 1 ; % плоси приймача інфрачервоного випромінювання,
кутове поле зору (град)
%% фотодетектор
PD Resp = 0,5; % чутливості фотодіоду (A / W)
PD Gain = 1e1 ; % посилення підсилювача (В / А)
PD_NEP = 1e- 12 ; % еквівалентної потужності шуму (NEP)
приймача інфрачервоного випромінювання (Вт / квт (Гц))
PD RL = 50 ; % навантаження приймача інфрачервоного
випромінювання (Ом)
BW BR r = 1,25 ; % співвідношення пропускної здатності до
швидкості передачі даних (Гц / біт / с)
q_ch = 1 .60217662e- 19 ; % заряду електрона (C)
%% виявлення
Thresh Len Coeff = 1 ; \% цей коефіцієнт використовується для
скорочення / розширення тривалості оцінки адаптивного порогу
```