Т.В. Критська, Д.Г. Алексієвський, Є.М. Кісельов

Електронні пристрої та технології для промисловості, енергозбереження та екологічних напрямів

Монографія

ОЛДІ ПЛЮС

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОСТІ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ НАПРЯМІВ

Монографія

Одеса • 2023 • Олді+

УДК 004.384:502.171:620.9
Е50

Автори:
Критська Т. В., Алексієвський Д. Г., Кісельов Є. М., Биткін С. В., Світанько М. В., Верьовкін Л. Л., Ніконова З. А., Ніконова А. О., Небеснюк О. Ю., Туришев К. О., Шмалій С. Л.

Рецензенти:
Андрієнко П. Д. – доктор технічних наук, професор;
Коваленко В. Л. – доктор технічних наук

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
Запорізького національного університету
Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні
(протокол № 3 від 13.10.2023 р.)

Е50 **Електронні** пристрої та технології для промисловості, енергозбереження та екологічних напрямів : монографія / Т. В. Критська, Д. Г. Алексієвський, Є. М. Кісельов [та ін.]. – Одеса : Олді+, 2023. – 154 с.

ISBN 978-966-289-812-5

Монографія є результатом розгляду технологічних аспектів і математичного моделювання процесів сучасної мікроелектроніки, оптоелектроніки, фотовольтаїки та вітроенергетики. У монографії надаються результати новітніх досліджень з фізики твердого тіла, технології енергоефективних фотоелектричних перетворювачів, оптоелектронних інформаційних систем. Освітлено нові напрями розробок вітроенергетичних устаткувань, розглянуто альтернативний напрям побудови ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням, який сприяє підвищенню ефективності і удосконалює систему управління пристроями. У зв'язку з постійним інтересом до промислових технологій вироблення і поширенням областей використання активного кисню (металургія, водопостачання, медицина, екологія), удосконалено метод одержання озону та синтезовано модель вимірювального тракту системи визначення концентрації озону у повітрі.

УДК 004.384:502.171:620.9

ISBN 978-966-289-812-5

© Колектив авторів, 2023

ЗМІСТ

Вступ **5**

1. Методика моделювання експериментальних результатів опромінення α-частинками тестових NPN-структур ІС у розрахунковому середовищі OriginPRO (*Биткін С. В., Критська Т. В.*) **6**

2. Технологічні аспекти формування енергоефективних фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії (*Небеснюк О. Ю., Ніконова З. А., Ніконова А. О.*) **25**

3. Пристрої оптичної логіки на ефектах мультистабільності у випадковому полі (*Світанько М. В., Верьовкін Л. Л.*) **45**

3.1. Моделювання розповсюдження сигналу в нелінійному середовищі **45**

3.2. Мультистабільний логічний пристрій оптоелектронної інформаційної системи для солітонних систем зв'язку **53**

4. ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням як альтернативний напрям побудови вітроелектрогенеруючих систем (*Алексієвський Д. Г., Туришев К. О.*) **57**

5. Синтез моделі вимірювального тракту системи визначення концентрації озону (*Кісельов Є. М.*) **70**

5.1. Аналіз методів вимірювання концентрації озону **70**

5.1.1. Вимірювання концентрації озону на основі поглинання ультрафіолетового випромінювання **70**

5.1.2. Колориметричний метод **72**

5.1.3. Амперметричні методи **74**

5.1.4. Порівняльна характеристика методів вимірювання концентрації озону **78**

5.2. Синтез візуально-блочної моделі оптичного каналу системи визначення концентрації озону **81**

5.2.1. Структура датчика системи визначення концентрації озону **81**

5.2.2. Опис блоку розрахунку поглинання ультрафіолетового випромінювання **88**

5.2.3. Опис блоків джерел і приймачів випромінювання **95**
5.3. Синтез трипроменевої моделі системи вимірювання концентрації озону **101**
5.3.1. Структура трипроменевої системи вимірювання концентрації **101**
5.3.2. Опис основного датчика вимірювального каналу **103**
5.3.3. Синтез моделі опорного каналу **105**
5.3.4. Синтез моделі широкосмугового датчика **106**
5.3.5. Комплексна модель системи визначення концентрації озону **108**
5.4. Моделювання системи визначення концентрації озону **111**
5.4.1. Моделювання системи з джерелами випромінювання постійної інтенсивності **111**
5.4.2. Моделювання впливу випадкових процесів на точність визначення концентрації озону **114**
5.4.3. Моделювання системи з модуляцією інтенсивності випромінювання **117**
5.5. Висновки **121**

6. Використання хмарних технологій для обробки даних із мікроконтролерів в умовах промисловості (*Шмалій С. Л.*) **122**
6.1. Основні поняття та технології **123**
6.2. Технології навігації всередині приміщення **130**
6.3. Публічні хмарні сервери для візуалізації інформації від IoT-пристроїв **134**

Висновки **137**

Список використаних джерел **143**

ВСТУП

Розглянуто технологічні аспекти й математичне моделювання процесів сучасної мікроелектроніки, оптоелектроніки, фотовольтаїки та вітроенергетики. У монографії надаються результати новітніх досліджень із фізики твердого тіла, технології енергоефективних фотоелектричних перетворювачів, оптоелектронних інформаційних систем. Освітлено нові напрями розробок вітроенергетичних устаткувань, розглянуто альтернативний напрям побудови ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням, який сприяє підвищенню ефективності й удосконалює систему управління пристроями. У зв'язку з постійним інтересом до промислових технологій вироблення і поширенням областей використання активного кисню (металургія, водопостачання, медицина, екологія), удосконалено метод одержання озону та синтезовано модель вимірювального тракту системи визначення концентрації озону в повітрі. Також розглянуті питання використання зберігання та обробки інформаційних даних із мікроконтролерів, які можуть використовуватися в умовах виробництва.

Монографію підготовлено авторським колективом активно взаємодіючих протягом череди років науковців, які є викладачами кафедри мікроелектронних і електронних інформаційних систем Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету. У звіті представлено не тільки результати досліджень і розробок, які готові до використання в технологіях електроніки, але й у ряді випадків гіпотетичні погляди та припущення, які спонукають до активного та конструктивного пошуку в розглянутих напрямах. У підготовці рукопису монографії допомогу надали магістранти: Ю. О. Кулькін, Т. П. Панченко і С. С. Сохань, за що автори висловлюють їм щиру подяку.

Автори будуть вдячні за доброзичливу та конструктивну критику.

1

МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ОПРОМІНЕННЯ α-ЧАСТИНКАМИ ТЕСТОВИХ NPN-СТРУКТУР ІС У РОЗРАХУНКОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ORIGINPRO

Запропонована методика обробки експериментальних результатів дослідження характеру радіаційної деградації тестових вертикальних NPN-структур ІС, вироблених із використанням технології «кремній із діелектричною ізоляцією» (КСДІ) на монокристалічних пластинах Si n-типу (CZ n-Si <P>) при застосуванні α-опромінення. Опромінення α-частинками здійснювалася безпосередньо на пластинах із тестовими транзисторними NPN-структурами після нанесення металізації, з подальшим вимірюванням коефіцієнта підсилювання за струмом до та після опромінення. Використана спеціально розроблена та виготовлена лабораторна установка, у якій застосовані радіоізотопні джерела типу АІП-Н (80 % ^{238}Pu, 15,8 % ^{239}Pu, максимальна активність ізотопів плутонію в джерелі 3×10^{8} Бк ($8{,}1\times10^{-3}$ Кі). Вимірювання коефіцієнтів посилення струму (h_{21E}) проводилися із застосуванням вимірювача статичних вольт-амперних характеристик планарних NPN-структур, підключеного до стандартної багатозондової установки. Показано, що методика спільного застосування α-опромінення та апроксимації експериментальних результатів із застосуванням пакету OriginPRO дає змогу отримати явний вид залежності деградації h_{21E} від дози іонізуючого випромінювання при дії релятивістських частинок на тестові структури ІС.

Вирішення наукових проблем, прикладних завдань із використанням космічних апаратів (КА) доцільно та економічно виправдано лише у разі їх тривалої безаварійної експлуатації [1]. Це можливо при застосуванні ІС із високою стійкістю до радіації [2], оскільки значні потенційні ризики з метою забезпечення надійної експлуатації КА, що визначають ресурс роботи

бортової радіоелектронної апаратури (БРЕА) КА, пов'язані з несприятливими факторами космічного простору. Основним фактором ризику для БРЕА КА є радіаційні впливи потоків заряджених частинок радіаційних поясів Землі (переважно протонів та електронів) на технологічні системи КА. Виникають збої та відмови в роботі електронних схем, деградація сонячних батарей та інші позаштатні режими роботи КА. При геомагнітних збуреннях, пов'язаних із впливом активних сонячних процесів на магнітосферу, спостерігаються значні зміни в просторовій структурі та енергетичних спектрах потоків електронів ЗРПЗ. Енергія потоку релятивістських електронів може зростати на 2–3 порядки (до величин суттєво більших 1 МеВ, що підвищує основні дозові навантаження на елементну базу та, відповідно, експлуатаційні ризики для КА. Близько третини всіх відмов, що спостерігаються на КА, пов'язані з потоками прискорених у магнітосфері електронів («електрони-вбивці»). Фактори космічного простору, що негативно впливають на функціонування обладнання та апаратури КА, систематизовані в [3] (рис. 1.1, див. с. 8) (переклад назв колонок таблиці дається в тексті поза рисунком):

Електризація КА (spacecraft charging). Відрізняють поверхневу (surface) та внутрішню (internal) види електризації. Основною причиною виникнення електростатичних розрядів (ЕСР) на КА, що працюють на геостаціонарній орбіті (ГСО), високоеліптичних орбітах, а також в авроральних зонах магнітосфери Землі, є зарядження (електризація) елементів зовнішньої поверхні КА [4]. Різниці потенціалів на поверхнях КА можуть досягати 20 кВ, що може викликати протікання по корпусу КА імпульсних струмів амплітудою до 100 А, що призводить до виникнення електромагнітних перешкод (ЕМП) в елементах кабельних систем КА. ЕМП призводять як до короткочасних збоїв та оборотних відмов роботи БРЕА, так і до її катастрофічних відмов і, як наслідок, втрати працездатності КА.

Ефекти одиночної події (single-eventeffects) пов'язані з космічними променями (cosmicrays), радіаційним впливом захоплених частинок (trappedradiation), сонячними космічними

частинками (СКЧ, solarparticles), галактичними космічними променями (ГКП). Відрізняють оборотні (м'які) збої (Soft Errors) у тому числі SEU (Single Event Upset), зумовлені трековим імпульсом струму та незворотні катастрофічні відмови, зокрема,

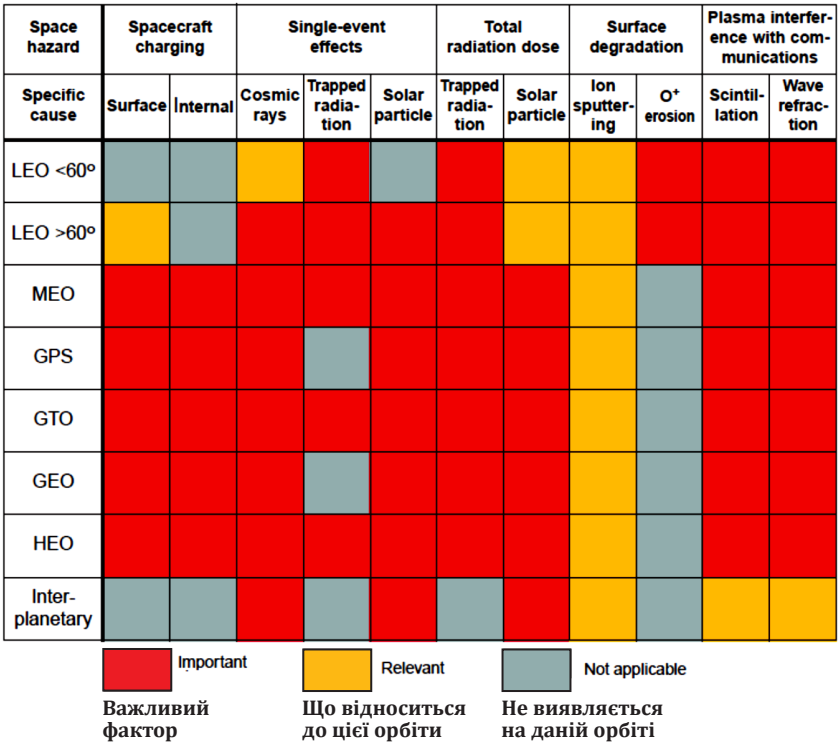


Рисунок 1.1 – Несприятливі чинники космічного простору (space hazards та їх форми (specific cause)), що виявляються на різних орбітах КА у вигляді різних ефектів

Позначення: LEO < 60° – низька навколоземна орбіта, нахил менше 60 градусів; LEO>60° – те ж із нахилом більше 60 градусів; MEO – середня навколоземна орбіта; GPS – супутникова орбіта Global Positioning System; GTO – геосинхронна перехідна орбіта; GEO – геосинхронна орбіта; HEO – високоеліптична орбіта; O^+ – атомарний кисень.

Переклад назв інших полів таблиці наведено в тексті.

SEE (single event latchup – засувка), SEB (singl eevent burnout) – пробій та ін.

Сумарна накопичена доза радіації (total radiation dose, TID) пов'язана зі ЗРПЗ, СКЛ, ГКЛ (за механізмом гальмівного випромінювання). Основні ефекти впливу іонізуючих випромінювань (ІВ) на БРЕА обумовлені параметричними відмовами БРЕА внаслідок деградації характеристик ІС та дискретних приладів у міру накопичення дози. Ефекти, пов'язані з впливом сумарної дози опромінення (Irradiation Dose Effects, TID), призводять до зниження насамперед коефіцієнтів посилення NPN-структур ІС по струму [5]. Деградація окремих елементів інтегральних схем призводить до зміни параметрів при опроміненні всієї ІС у цілому; ця зміна носить надзвичайно складний характер [6]. Основні механізми деградації електрофізичних властивостей кремнію та приладів на його основі при дії ІВ, що призводять до відмов БРЕА, досить докладно розглянуті в [7; 8; 9]. Експериментальне вивчення ефективності конструктивно-технологічних методів підвищення радіаційної стійкості ІС проводиться зазвичай лише на рівні окремих елементів (транзисторів). Моделювання деградації коефіцієнта посилення транзисторної структури є актуальним завданням із погляду визначення сфери її працездатності при опроміненні.

У роботі [10] вказується, що є кілька шляхів підвищення радіаційної стійкості БРЕА КА: застосування спеціалізованих технологічних процесів і матеріалів на етапі виготовлення бортової апаратури та інтегральних мікросхем (ІМС), конструкційний захист із матеріалів на основі алюмінію, метод мажоритування та ін. У багатьох випадках ці методи захисту недостатні, тому для найбільш вразливих елементів апаратури слід використовувати додатковий радіаційний захист. Екранування елементної бази РЕА перестав бути підвищенням її радіаційної стійкості. Зокрема, розроблено та виготовлено екрани радіаційного локального захисту (РЛЗ) для металокерамічних корпусів ІМС.

Проведені на серійних ІМС випробування показали, що РЛЗ на основі композитів W-Cu товщиною 1,2–1,5 мм (стандартна товщина кришки корпусу ІС дорівнює 0,1 мм) забезпечує

зниження радіаційного навантаження за електронами з енергією 1,6–1,8 МеВ у 145–155 разів, за протонами з енергією від 0,04 до 500 МеВ – у 6 разів. У [11] розраховані спектри втрат на іонізацію багатошарових структур Bi / Al / Al_2O_3 та Al / Al_2O_3 / Bi (товщиною 1,4 та 1,5 мм). Моделювання лінійних пробігів частинок показало, що серед розглянутих матеріалів найменш ефективні екрани з алюмінію, найбільш ефективні – з вісмуту, середню ефективність мають багатошарові структури. Але на орбітах КА, де є високі потоки релятивістських електронів, поглинена доза радіації переважно визначається не електронами, а їх гальмівним випромінюванням [12]. Зі збільшенням атомного номера речовини зменшується глибина проникнення електронів у захисний екран, але збільшується інтенсивність гальмівного γ-випромінювання. Розсіювання електронів та квантів гальмівного випромінювання тим сильніше, чим більший атомний номер речовини пластини (Pb № 82, Bi № 83, W № 74) (рис. 1.2).

Від 13 до 18 % маси всього КА становить маса екрануючих конструкцій, що вимагає зменшення щільності металу та товщини екрана [13], тобто виникають вимоги, не сумісні з товщиною екрану 1,2–1,5 мм, виготовленого із застосуванням матеріалу

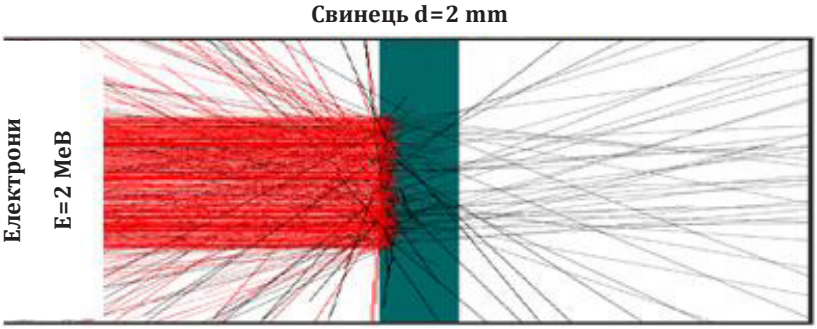


Рисунок 1.2 – Модель проходження пучка електронів з енергією 2 МеВ через свинцеву пластину товщиною 2 мм (червоний колір – електрони; чорний колір – гальмівне γ-випромінювання)

з високим атомним номером. Екранування абсолютно необхідне при використанні комерційної ЕКБ (Industrial, COTS), радіаційна стійкість якої не регламентується [14]. Отже, радіаційну стійкість кремнієвого чипа необхідно збільшити навіть під час екранування ІС. Відповідно до [15], призначення (область застосування) ЕКБ визначається видом приймання на підприємстві-виробнику:

– «1» (відділом технічного контролю заводу-виробника);

– «5» (ВП – військовим представництвом, позначається знаком ◊ на корпусі);

– «9» (ОС – особлива серія). В останню групу входять вироби підвищеної надійності, що випускаються малими партіями (ОСМ – приймання «7»). Виготовлення біполярних ІС із прийманням 5, 7, 9 потребує проведення робіт по підвищенню радіаційної стійкості ЕКБ, понад усе для забезпечення строків активного функціонування (САФ) космічних апаратів [16]. Причини такого становища – у високих темпах зростання функціональної та апаратної складності електронних систем КА та недостатньої надійності електронної компонентної бази. За останні 35 років зафіксовано більш ніж 10-кратне зростання складності електронних систем КА, але помітного збільшення надійності ЕКБ не спостерігається, що призводить до відмови бортової апаратури в процесі експлуатації.

Елементом технології високонадійної електронної апаратури тривалого функціонування насамперед БРЕА КА та ін. є використання біполярних транзисторів, як у складі ІС, так і в дискретному виконанні, з високим рівнем надійності за поступовими відмовами, тобто, що виникають у результаті поступової (за часом) зміни значень однієї чи кількох параметрів приладу, так званих «критеріальних параметрів». Це насамперед коефіцієнт посилення по струму h_{21E} біполярного транзистора [17]. Поступові відмови, які при дії джерела випромінювання є наслідком внутрішніх необоротних змін у матеріалах напівпровідникових приладів, виключити неможливо в принципі. Деградаційні відмови біполярних транзисторів можна прогнозувати. При дії джерела випромінювання при індивідуальному прогнозуванні в конкретного екземпляра виробів цього типу контролюються найбільш

специфічні параметри (h_{21E}) і за отриманими чисельними значеннями приймається рішення про надійність або відбракування цього екземпляра або всього виробу.

Для оцінювання надійності всієї вибірки переважно застосовувати стандартні статистичні методи [18]. Можливе моделювання радіаційної зміни фізичних властивостей транзисторної структури із застосуванням опису процесів, що протікають у приладі при опроміненні [19]. У роботі [20] проведено фізико-математичне моделювання деградації чисельного значення коефіцієнту підсилення біполярних транзисторів при опроміненні нейтронами та γ-квантами. Використано чисельне рішення рівняння безперервності для нерівноважних носіїв заряду в базі при застосуванні емпіричних рівнянь, що описують час життя інжектованих неосновних носіїв заряду, що нелінійно зменшується при опроміненні нейтронами та γ-квантами. Отримані результати, що відображають нелінійний характер залежності коефіцієнта посилення від типу радіаційного впливу та його дози описуються лише якісно.

Метою цієї роботи є моделювання деградації підсилювальних властивостей (коефіцієнта посилення струму h_{21E}) тестових NPN-структур ІС, виготовлених за технологією «кремній із діелектричною ізоляцією» (КСДІ) при різних дозах α-опромінення (Φ_α) для отримання аналітичних залежностей виду $h_{21E}=f$, що характеризують радіаційну стійкість транзисторів ІС.

Технологічний маршрут виготовлення тестових NPN-структур. У якості вихідної підкладки використані монокристалічні пластини Si n-типу, підготовка яких до формування тестових NPN-структур наочно описана, наприклад, у [21] (V-groove isolation за термінологією англомовної технічної літератури; «кремній з діелектричною ізоляцією» в російськомовних публікаціях. На одній зі сторін пластини формують шар n^+-типу, проводять окислення поверхні підкладки, з використанням фотолітографії в плівці SiO_2 розкриваються вікна для анізотропного травлення, через які витравлюють V-подібну канавку в кремнії, стінки якої окислюються. Поверх плівки SiO_2 нарощують епітаксійний полікристалічний шар кремнію товщиною

300–600 мкм. Потім пластину перевертають, шліфують і полірують із боку монокристалічного кремнію. У результаті виходить підкладка з ізольованими областями («кишенями»). Шар полікристалічного кремнію, у якому сформовані поглиблені області монокристалічного Si, є несучою підкладкою. У кожній із кишень за звичайною планарною технологією формують NPN-структури, на яких проводяться вимірювання до й після опромінення (рис. 1.3).

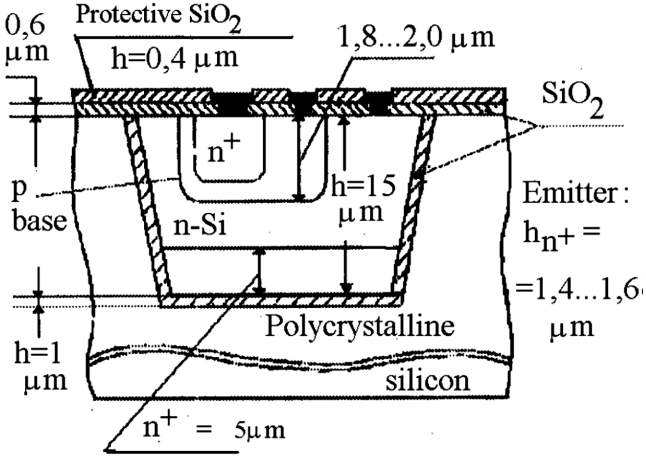


Рисунок 1.3 – Вертикальна структура вимірюваного тестового NPN-транзистора. Площа емітера SE=65×35 мкм². Експериментально досліджувалися NPN-структури з двома товщинами бази: 0,25 та 0,35 мкм

Ізоляція діелектриком дає змогу виготовляти ІС із поліпшеними характеристиками в порівнянні зі схемами, у яких застосовується ізоляція PN-переходом, а саме [22]: істотно збільшити напругу пробою ізолюючої області, значно (приблизно на 6 порядків) зменшити струми витоку, в тому числі між колектором та підкладкою тощо. Іншими словами, використання КСДІ давало змогу досліджувати деградацію h_{21E} у транзисторах із різною шириною бази без ефектів, пов'язаних з ізоляцією NPN-структур. Технологічний процес формування КСДІ

надано в [23]. Методи ізоляції для радіаційно стійких швидкодіючих ІС представлено в [24].

При проведенні досліджень використовувалися монокристали кремнію марки КЕФ 0,2, вирощені за методом Чохральського. Вихідною сировиною служив полікристалічний кремній-сирець, маса завантаження становила 4 кг. Використовувалися тиглі із синтетичного кварцу діаметром 200 мм; вирощування проводилося в потоці Ar з витратою газу 7 л/хв або азоту (4 л/хв). Швидкість вирощування циліндричної частини монокристалів змінювалася за програмою від 2,2 до 0,8 мм/хв, частоти обертання кристала $\omega_{кр}$=15 об/хв і тигля $\omega_{т}$=5 об/хв. У вирощених монокристалах проводився контроль питомого електроопору ρ, щільності дислокацій, наявності свірлевих дефектів; оцінка вмісту кисню та вуглецю вироблялася методом ІЧ-поглинання з використанням спектрофотометра PerkinElmer 580 при 300 К (концентрації Oi і Cі по верхньому / нижньому торцям становили $(2{,}8–3{,}2)\times10^{17}/(5–6)\times10^{16}$ см$^{-3}$ і $(3{,}5–3{,}8)\times10^{12}/(2–3)\times10^{16}$ см$^{-3}$) відповідно.

Виготовлення кремнієвих підкладок (пластин) для структур із діелектричної ізоляцією (КСДІ). Підкладки виготовлялися на напівпровідниковому металургійному підприємстві із застосуванням таких етапів технологічних операцій.

Етап 1 – Виготовлення підкладок:

– різання монокристалічних зливків на пластини товщиною 615±20 мкм на верстаті «Алмаз-6»;

– перше полірування (паста АСМ 2/1 до товщини 520±5 мкм) на верстаті СДП-100;

– друге полірування за тією ж технологією до товщини 510±5 мкм;

– хіміко-механічне полірування до товщини 500±3 мкм.

Вихід придатної продукції під час обробки пластин із монокристалів n-Si становив ≅80 %, тобто відповідав плановому рівню.

Етап 2 – Виготовлення пластин з n^+-шаром, легованим миш'яком (As). Формування n^+-прихованого шару проводили з використанням дифузії As у запаяній ампулі за температури 1150±2 °С.

Етап 3 – формування мікрорельєфу на пластинах за серійним технологічним маршрутом напівпровідникового підприємства, а саме:

– окислення перед фотолітографією проводилося на печі СДО-125/3-12,0 в атмосфері вологого кисню протягом 90 хв за температури 1150 °С із поступовим прогріванням «човника» з пластинами під час завантаження (8,5 хв за 1000 °С), прогріванням до робочої температури (25 хв) та при вивантаженні пластин (30 хв за 1020 °С);

– фотолітографія («Роздільна ізоляція»), розтин «вікон» та анізотропне травлення з кінцевою глибиною кишені 20±1 мкм;

– окислення після фотогравування включало знаходження «човника» в печі за робочою температурою 1150 °С протягом 240 хв. Товщина термічного ізолюючого окислу 1,0–1,2 мкм.

Виготовлення кремнієвих структур із діелектричною ізоляцією (КСДІ). Нарощування опорного шару полікристалічного кремнію проводили на 2 стадії в процесі водневого відновлення трихлорсилану. На першій стадії температуру підтримували на рівні 1080...1120 °С, при цьому відношення $SiHCl_3/H_2=1/(15–40)$. На другій стадії процесу температуру підвищували до 1160...1190 °С, а відношення концентрацій трихлорсилану до водню становило 1 : 5–6. Завершальною операцією було т. зв. «розкриття КСДІ», що включає шліфування полі- та монокристалічних сторін сформованої структури (верстат САШ-420М). Виготовлення інтегральних схем проведено відповідно до серійного технологічного маршруту ІС серії 185. Термічні операції виконані із застосуванням дифузійної печі СДО-125/3-15.0, для фотолітографії використані установки суміщення АМК-2104-16.

Основні технологічні операції:

– окислення перед фотолітографією «База» (після відмивання пластин): температура (t)=1100 °С, час окиснення 47 хв, тривалість завантаження та вивантаження 8 хв в атмосфері вологого кисню;

– фотогравірування («розтин вікон») «База»;

– дифузія бору (I стадія, «загонка») проводилася в атмосфері азоту й кисню протягом 15 хв за t=940 °C, завантаження та вивантаження пластин протягом 2 хв за t=800 °C;

– зняття боросилікатного скла в буферному травнику (водний розчин HF та NH4F);

– дифузія бору (II стадія, «розгін») за t=1150 °C протягом 100 хв, завантаження та вивантаження «човника» з пластинами за t=940 °C протягом 8 хв;

– фотогравірування «Емітер»;

– дифузія фосфору (I стадія, «загонка») проводилася в атмосфері азоту й кисню протягом 20 хв за t=1060 °C, завантаження та вивантаження пластин протягом 5 хв за t=800 °C;

– зняття фосфоросилікатного скла;

– дифузія фосфору (II стадія, «розгін») проводилася в атмосфері азоту й кисню протягом 60 хв за t=1250 °C, завантаження та вивантаження пластин протягом 5 хв за t=800 °C;

– фотогравірування «Контакти»;

– напилення Al (чистота 99,99) на установці УВН-83П-1 (температура нагріву підкладок ≅400±1,5 °C), що дає змогу виключити операцію запалювання Al;

– фотогравірування «Металізація»;

– нарощування діелектричної плівки;

– фотогравірування «Діелектрична плівка»;

– контроль (вимірювання) статичних параметрів тестових NPN-структур.

Опромінення тестових структур та проведення вимірювань радіаційної деградації коефіцієнта посилення NPN-структур. Виникнення рекомбінаційних центрів та структурних порушень в активних структурах ІС при впливі нейтронів із різних джерел, електронів та протонів космічного простору імітували за допомогою α-випромінювання закритих радіонуклідних джерел [25].

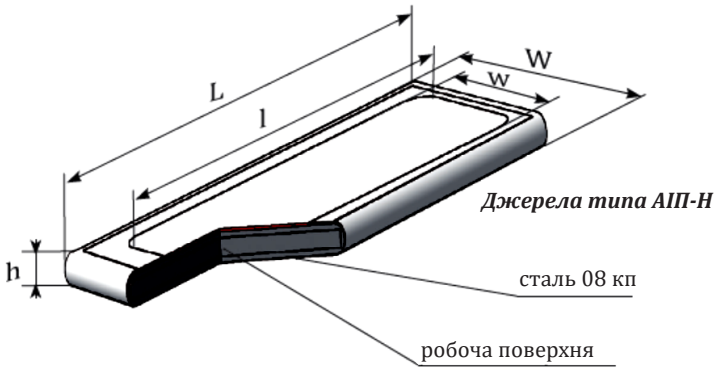
Використовували закрите джерело на основі плутонію, у якому за рахунок α-розпаду виникають частинки з енергією ≅5 МеВ, що мають пробіг у кремнії 20–25 мкм, тобто здатні рівномірно проникати в активні області NPN-структур. Випробування

переважно проводити безпосередньо на пластинах із тестовими транзисторними структурами після нанесення металізації з подальшим вимірюванням параметрів за допомогою зондів. У цьому випадку опромінення не корпусованих тестових NPN-структур α-частинками [26] проводили в спеціально розробленій та виготовленій лабораторній установці з використанням радіоізотопних джерел типу АІП-Н. Виготовлення джерел проводилося згідно з ТІ 45.Т.АДІ «Технологічна інструкція з виготовлення та контролю джерел типів АІП-Н, АІП-ЕДГХ, АІП-РІГ, АІП-МІР-3А, АІП-РІД, ІРІПЛ» [27]. Технологія активного шару заснована на електрофоретичному [28] осадженні препарату плутонію в складі склоплаву на електропровідному шарі емальованої або глазурованої сталевої підкладки з подальшою фіксацією препарату шляхом термічної обробки (випалювання) підкладки. Потім наносилося захисне покриття у вигляді оксиду титану з послідуючей дезактивацією, а саме: контроль рівня радіоактивного забруднення (УРЗ) та герметичності, вимірювання потоку енергії зовнішнього α-випромінювання, контроль зовнішнього вигляду, маркування, пакування. Джерела α-випромінювання типу АІП-Н являють собою підкладки з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т розміром 70×35×2,8 мм, на які у вигляді емалі наносять активний шар розміром 60×25 мм і товщиною 2,5 мкм із суміші PuO_2 та емалі-59, ізотопний склад плутонію: 80 % ^{238}Pu, 15,8 % ^{239}Pu, 4,2 % ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu. На активний шар наноситься захисний шар із двоокису титану (TiO_2) завтовшки 2,5 мкм [29]. Конструкція джерела наведена на рис. 1.4 [30].

Робота з обладнанням, що використовує радіоізотопні джерела, є досить складною з погляду радіаційної безпеки внаслідок частого пошкодження тонкого захисного покриття джерела та появи на його поверхні радіонуклідів у вигляді PuO_2, величина активності яких може служити критерієм міри пошкодження джерела. Для визначення герметичності джерел α-випромінювання проводиться протирання його поверхні тампоном, зволоженим етиловим спиртом, із зусиллям 0,2–0,5 кг/см^2. Якщо активність тампона вбирається в 185 Бк, джерело вважається герметичним. При необхідності проводять дезактивацію

(очищення від забруднення радіоактивними речовинами) поверхні джерела α-випромінювання на основі Pu за допомогою ватного тампона, змоченого в 5 % водному розчині ацетату амонію, який утворює з плутонієм комплексне з'єднання $NH_4[PuO_2(C_2H_3O)]$.

Залишкова забрудненість джерел після дезактивації становить 10 % від початкового рівня. Можливе застосування інших доступних методів дезактивації.



Тип джерела	Радіонуклід	Розміри джерела (робочої поверхні), мм			Потік зовнішнього α-випромінювання джерела, Вт, не менше	МЕД рентгенівського та γ-випромінювання на відстані 0,5 м, А/кг, не більше	Максимальна активність ізотопів плутонію в джерелі, Бк (Кі)
		довжина, L(l)	ширина, W(w)	висота, h			
АІП-Н	^{239}Pu	70,95 (60)	35,8 (25)	2,8	$1{,}0\times10^{-5}$	$3{,}9\times10^{-11}$	3×10^{8} $(8{,}1\times10^{-3})$

Рисунок 1.4 – Схематичне зображення джерела α-випромінювання АІП-Н
(МЕД – максимальна еквівалентна доза)

Методика експерименту. Безпосередньо вимірювання проводилися із застосуванням вимірювача статичних вольт-амперних характеристик планарних NPN-структур Л2-56 [31],

підключеного до стандартної багатозондової установки ЗОНД А-5 (рис. 1.5).

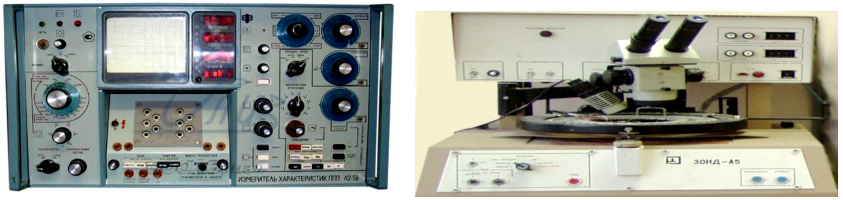


Рисунок 1.5 – Устаткування, що використовувалося для проведення тестового контролю ІС на пластинах

При виробництві цифрових ІС вимірювач Л2-56 використовується для спостереження ВАХ із метою візуального виявлення дефектів технології (наприклад, дифузії, коли ширина бази істотно менше заданої). У цьому спостерігається яскраво виражена нелінійність (різке зростання) колекторного струму. Також на Л2-56 проводиться контроль (вимірювання) відповідності коефіцієнтів посилення тестових структур значенням, заданим технологічною картою. Зменшення статичного коефіцієнта передачі базового струму (h_{21E}) призводить до зростання напруги «логічного нуля» UOL при опроміненні, що сприймається як параметрична відмова ІС. Похибка вимірювань вимірювача Л2-56А – від 3 до 5 %. Режим вимірювання застосовували такий: VCE=5,5 V; IE≅IC=5 mA. Тестовий осередок немає висновків, тому проведення опромінення не передбачало наявність електричного режиму чи дій із висновками. h_{21E} – загальноприйняте позначення коефіцієнта передачі базового струму біполярного транзистора за постійним струмом, часто зване статичним коефіцієнтом посилення, $h_{21E}=I_C/I_B$; Φ_α – доза α-опромінення. h_{21E} (Φ_α) – рівняння, що описує зміну коефіцієнта посилення транзисторної NPN-структури при α-опроміненні.

Обробка та візуалізація експериментальних результатів. Залежність, що апроксимує експериментальні дані, отримана з використанням програми OriginPro 2019b (64-bit) 9.6.5.169 [32]. Назви апроксимуючих функцій взяті безпосередньо з бібліотеки

програми. Назви осей програма позначає як і введені імена змінних. Послідовність дій (кроків) при обробці експериментальних даних із застосуванням програми OriginPro:

Крок 1. Нанесення на графік експериментальних даних (h_{21E} – експериментальні значення статичного коефіцієнта передачі базового струму тестового NPN-транзистора ІС, виготовленого на пластині Si, що змінюються при опроміненні α-частинками [см$^{-2}$]) (рис. 1.6).

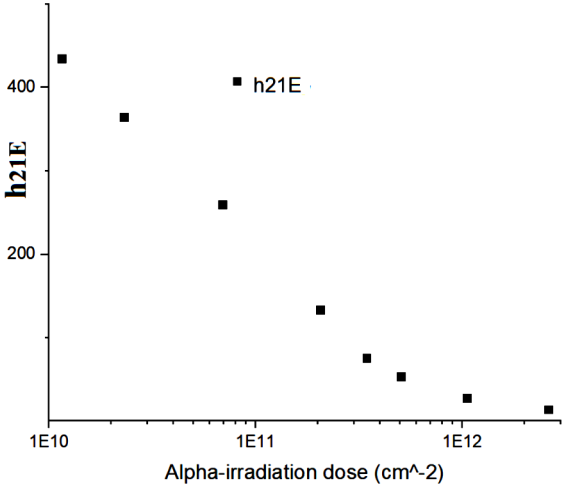


Рисунок 1.6 – Результати вимірювання h_{21E} при опроміненні α-частинками

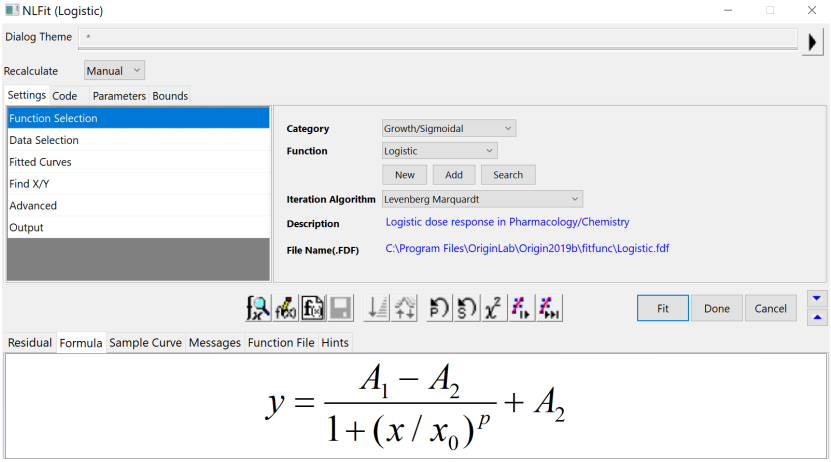
Крок 2. Вибір виду апроксимуючої залежності та її «підгонка» (Fit), отримання рівняння у явному вигляді (рис. 1.7, див. с. 21).

Для **NPN-структури з товщиною бази 0,25 мкм** зниження коефіцієнта посилення струму в схемі з ОЕ при α-опроміненні має вигляд:

$$h_{21E}(\Phi_\alpha) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{\left(1 + \frac{\Phi_\alpha}{x_0}\right)^p}.$$

Чисельні значення коефіцієнтів рівняння наведені в таблиці на графіку.

Для **товщини бази 0,35 мкм** результати моделювання експериментальних даних із радіаційної деградації h_{21E} при дії



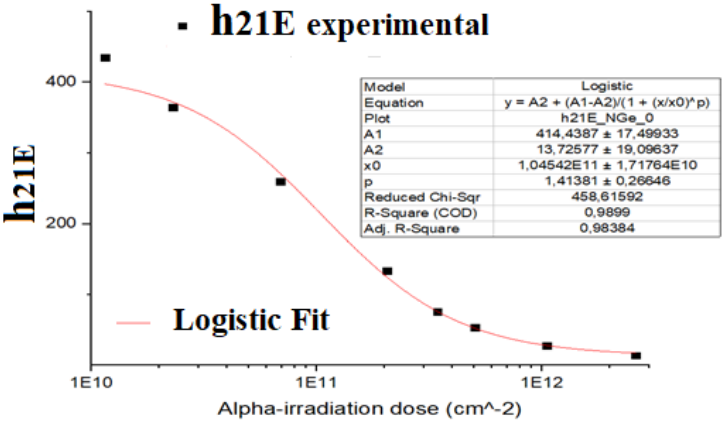


Рисунок 1.7 – Моделювання в середовищі OriginPRO радіаційної деградації h_{21E} NPN-структури (товщина бази 0,25 мкм), виготовленої за технологією «кремній із діелектричною ізоляцією» (КСДІ) при α-опроміненні з енергією ≅4,5 МеВ

α-опромінення з використанням програми OriginPRO мають такий вигляд:

$$h_{21E} = \frac{A_{min} + (A_{max} - A_{min})}{1 + \left(\left(\frac{x_0}{x}\right)^h\right)^s},$$

де A_{min}=2,18988; A_{max}=207,32619; x_0=1,08682×10^{11}; h=–0,94929; s=1,11324.

Отримані результати зручно порівнювати, використовуючи пакет MathCAD:

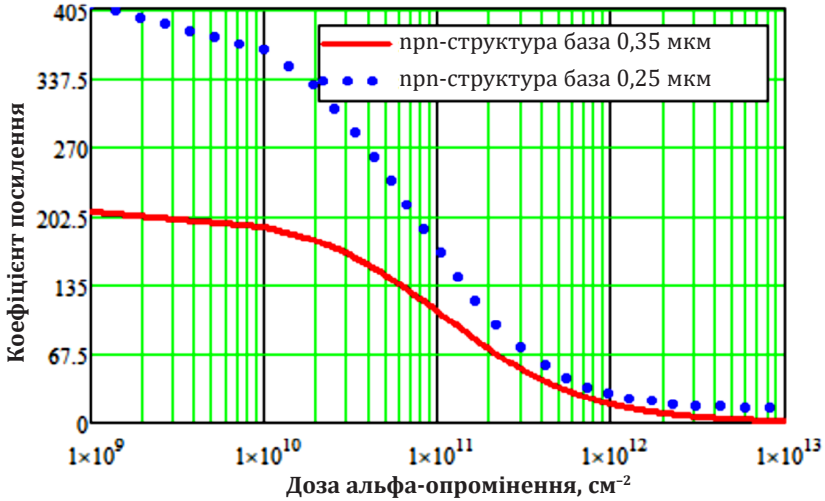


Рисунок 1.8 – Деградація коефіцієнта посилення NPN-структур із різною шириною бази

Активне дослідження технологічних можливостей виготовлення кремнієвих приладів із високою радіаційною стійкістю визначається також масовим впровадженням у промислову експлуатацію радіаційно-технологічних установок [33]. Значна частина РЕА прискорювачів може бути в радіаційному полі вторинних частинок, внаслідок, наприклад, втрати пучка протонів [34]. Для протонного прискорювача вибірково досліджено

ЕКБ РЕА модулів різних технологічних систем прискорювача, зокрема, системи діагностики пучка (планарно-епітаксіальний транзистор КТ3107), вакуумної системи (КТ3102). Показано, що для КТ3102 при дозі опромінення D=0,89 Рад (внесок у дозу опромінення: протони ~75 %, нейтрони 7–8 %, елементарні частинки 16 %) коефіцієнт посилення β знижувався від 510–790 (середнє значення 610) до 15, тобто, приблизно, у 40 разів, а КТ3107 від 120–124 (середнє значення 122) до 8–12 (майже на порядок). Відповідно до роботи [35], у якій використовувалися транзистори, виготовлені за планарно-епітаксіальною технологією з глибиною залягання колекторного p-n переходу ~0,1 мм; товщина бази – від 1,0 до 3,0 мкм, а вплив опромінення оцінювався зі зміни контрольованого параметра β після опромінення, високі значення коефіцієнта посилення (≅600) пов'язані з вузькою базою транзистора (1 мкм), а відносно невеликі (≅120) із широкою базою (2,1 мкм). Отримані експериментальні результати якісно добре узгоджуються з раніше отриманими іншими авторами. Апроксимуючі рівняння істотно нелінійні, тому потрібне отримання аналогічних залежностей при опроміненні NPN-структур нейтронами або протонами при розгляді можливості застосування імітуючої установки замість моделюючої [36]. Випробування ІС на вплив спеціальних факторів переважно проводити на моделюючих установках (МУ) для відтворення реальних умов радіаційного впливу. Забезпечити необхідну оперативність випробувань виробів мікроелектроніки із застосуванням МУ досить складно, а в багатьох випадках і неможливо (висока вартість проведення випробувань), що знижує ефективність проведення випробувань розробки нових технологій підвищення радіаційної стійкості планарних структур. Крім того, при проведенні випробувань за допомогою МУ на випробуваних виробах виникає залишкова радіоактивність наведена після впливу нейтронів і високоенергетичних протонів.

Висновки з проведеного дослідження та перспективи подальшого пошуку:

1. Показана можливість застосування методики дослідження радіаційної деградації h_{21E} тестових NPN-структур ІС,

що включає опромінення транзисторних структур α-частинками з енергією ≅4,5 МеВ та апроксимацію експериментальних результатів нелінійними залежностями в обчислювальному середовищі OriginPRO.

2. Передбачається ефективне застосування запропонованої методики для порівняльного аналізу радіаційної стійкості NPN-структур, виготовлених із застосуванням різноманітних технологій.

2

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Необхідною умовою збереження життя і розвитку цивілізації стало забезпечення людства достатньою кількістю енергії та палива. Проблема обмежених запасів природних паливно-енергетичних ресурсів, до яких відносяться невідновлювані джерела енергії (торф, вугілля, нафта, природний газ), змусила світове співтовариство серйозно звернутися до розробки програм з енергозбереження. На сьогодні енергозбереження стало основним і найефективнішим способом розвитку сучасної світової енергетики. Одним із напрямків, покликаним у майбутньому замінити традиційні види палива, є перехід на енергозберігаючі технології в рамках використання поновлюваних джерел енергії, серед яких сонячна енергетика найпоширеніша на планеті, оскільки в процесі вироблення електрики, а за необхідності ще й тепла для обігріву житлових приміщень і подачі гарячої води, використовують невичерпне джерело енергії (сонячне світло). На сьогодні є зростаючий попит на використання альтернативних джерел енергії в народному господарстві, промисловості та побуті.

Джерелом енергії сонячного випромінювання, як відомо [37–39], служить термоядерна реакція – кожну секунду на Сонці $\sim 6\times10^{11}$ кг водню перетворюється в гелій, що призводить до виділення 4×10^{20} Дж енергії. Основна частина цієї енергії витрачається у вигляді електромагнітного випромінювання в діапазоні 0,2–3,0 мкм. Оскільки повна маса Сонця $\sim 2\times10^{30}$ кг, воно може перебувати в досить стабільному стані понад 10 млрд років із постійним виділенням енергії. Отже, при використанні високоефективних методів перетворення енергії Сонце може забезпечувати бурхливо зростаючі потреби в ній практично вічно. Енергія Сонця не тільки невичерпна та безкоштовна, але й беззастережно найбільш екологічна з будь-якого з доступних людині видів енергії. Кожні 8 хв від Сонця надходить стільки енергії,

скільки людство витрачає за рік. Уся потреба людства в енергії на 180 років вперед може бути забезпечена сонячною енергією, яка досягає Землі тільки за один день. У чисельному вираженні Сонце посилає нашій планеті щодня 960 000 000 000 кВт енергії. Це означає, що в майбутньому ні один зі способів отримання енергії не пройде повз використання енергії Сонця. Кількість сонячної енергії, що припадає на одиницю площі земної поверхні впродовж року, становить 1000–1350 кВт · год/м^2.

Зважаючі на природні фактори, найбільш сприятливими регіонами розвитку сонячної енергетики є країни в тропічних і субтропічних кліматичних поясах, де забезпечуються високі показники по довготі світлового дня цілий рік і інсоляції (надходження сонячних променів). У помірних широтах найбільш сприятливі умови спостерігаються в літній сезон, а негативним фактором в екваторіальній зоні стає хмарність у середині світлового дня [40].

За рівнем інтенсивності сонячного випромінювання нашу країну можна поділити на чотири регіони – Західний, Центральний, Південно-Східний і Південний. Середня інтенсивність сонячного випромінювання тут становить приблизно 1200 кВт · год/м^2 [41].

У зв'язку із цим актуальними завданнями у всьому світі є розвиток сонячної енергетики.

Для цього необхідні умови:

– наявність довгого світлового дня;
– переважання ясної (сонячної) погоди у світлий час доби;
– високий кут падіння сонячних променів, який визначається географічною широтою території – чим ближче до екватора, тим більше кут падіння сонячних променів.

На сьогодні виділяються 3 основних напрямки використання сонячної енергії:

– сонячні водонагрівальні установки (колектори);
– сонячні електростанції (СЕС);
– фотоелектричні перетворювачі (ФЕП).

Сонячні електростанції – це перспективний напрямок розвитку енергетики в XXI ст. Прагнення позбутися енергетичної залежності в Європейському Союзі вилилося в розроблений

найбільший інвестиційний проєкт (DESERTEC) вартістю 555 млрд дол. Проєкт передбачає будівництво 100 великих сонячних електростанцій у пустелі Сахара. Якщо він здійсниться, то генерованої енергії буде достатньо для задоволення 15–25 % потреб, як Європи, так і всіх країн Північної Африки.

Минулого року встановлена потужність сонячних електростанцій у ЄС перевищила 100 ГВт. Прогнозується, що до 2025 р. вона збільшиться до мінімум 129,6 ГВт (песимістичний сценарій) або максимум 170,9 ГВт (оптимістичний сценарій). Європа за підсумками 2020 р. залишилася самим «сонячним континентом» за обсягом встановленої потужності, але в поточному році її ймовірно випередить Азія.

До кінця 2021 р. встановлена потужність сонячних електростанцій у світі впевнено досягне 600 ГВт (за підсумками 2019 р. – 229 ГВт), а в рамках оптимістичного сценарію можливо й 700 ГВт. У ЄС лідирують за встановленою потужністю (у порядку убування): Німеччина, Італія, Велика Британія, Франція, Іспанія. На сьогодні сонячна енергетика виробляє 4 % електрики в ЄС. В Італії, Греції та Німеччини її частка перевищує 7 %.

У песимістичному сценарії розвитку сонячна енергетика забезпечуватиме 10 % європейської електрики до 2030 р. [42].

Відомо, що створено консорціум із найбільших компаній і банків Європи з фінансування цього грандіозного будівництва на основі параболічних концентраторів сонячного випромінювання для нагрівання теплоносія (масла) до параметрів, придатних до використання в турбогенераторах (термоефект).

Згідно з представленими відомостями Global Market Outlook 2016–2020 у світовому масштабі триває зниження цін на сонячну електрику [43]. За підсумками тендера в Дубаї на початку 2015 р. було зафіксовано ціну $58,4 за МВт·год. У результаті чого організатор тендера, Dubai Energy and Water Authority (DEWA), навіть збільшив удвічі – до 200 МВт – початковий розмір проєкту. За минулий відтоді час, фіксувалися випадки ще більш низьких цін за результатами тендерів, у тому числі без державної фінансової підтримки. Уже в 2016 р. в Перу була зафіксована ціна в $48, у Мексиці – $36 за МВт·год. Рекордною ж

на сьогодні є ціна чергового тендеру на 800 МВт в ОАЕ, де вона склала $29,9 за МВт·год, при цьому конкуруючі пропозиції подавалися також із надзвичайно низькими котируваннями – $36,5–45 за МВт·год. Гарною тенденцією швидкого зниження вартості сонячної електрики є випадок із консорціумом інвесторів, котрі виграли вказаний вище тендер з ціною $58,4 за МВт·год. Менш ніж через півтора року вони прийшли на новий тендер у тому ж Дубаї із ціною вже $39,5 за МВт·год, тобто нижче на 30 %.

Мінімальна ціна перетворювачів сонячної енергії, що з'являються сьогодні, становить $0,37 за Ватт (Китай), компанія Canadian Solar – $0,29 за Ватт. Водночас на Європейському ринку встановлено так званий мінімальний імпортний тариф, згідно з яким ціна іноземних фотоелектричних перетворювачів, що поставляються в Європу, не може бути нижчою 0,56 євро за Ватт, що дає європейським виробникам відповідні преференції.

Енергетична політика України сьогодні, яка затверджена Урядом, має назву Енергетична стратегія України на період до 2030 р. У стратегії йдеться, що використання відновлюваних джерел енергії є важливою і необхідною умовою покращення енергетичної безпеки та скорочення негативного впливу енергетики на стан довкілля.

Оскільки середньорічна кількість енергії сонячного випромінювання в Україні складає від 1070 кВт·год/м^2 у північних регіонах та до 1400 кВт·год/м^2 – у південних, сонячне фотоелектричне обладнання можна ефективно експлуатувати впродовж року з піковою ефективністю з квітня до жовтня в південних областях та з травня до вересня – у північних областях. Однак основною проблемою розвитку фотоенергетики в України залишається висока собівартість електроенергії.

Потенційні можливості джерел відновлюваної енергії можна наближено оцінити припускаючи, що при раціональному її використанні для створення комфортних умов життя потрібно в середньому 2 кВт на людину. З кожного квадратного метра земної поверхні можна одержувати, використовуючи різні фотоелектричні перетворювачі (ФЕП), у середньому 500 Вт

потужності. Якщо вважати, що ефективність перетворення цієї енергії в зручну для споживання форму всього 4 %, то для потужності 2 кВт потрібна площа 100 м^2. Середня щільність населення в містах з урахуванням приміської зони приблизно 500 осіб на 1 км^2. Для забезпечення їх енергією з розрахунку 2 кВт на людину необхідно з 1 км^2 знімати 1000 кВт, тобто достатньо зайняти всього 5 % площі. Отже, фотоелементи можуть цілком забезпечити задовільний рівень життя, якщо будуть знайдені прийнятні за вартістю методи її перетворення, з урахуванням ресурсного потенціалу.

Автори вважають, що серед недоліків використання енергії сонця найчастіше можна виділити такі:

– висока собівартість перетворювачів сонячної енергії;
– вироблення електроенергії тільки протягом світлового дня;
– залежність від кліматичних умов;
– потреба у великих площах для установки фотоелектричних станцій;
– проблеми з акумулюванням енергії;
– недосконаліть технології і невеликий ККД тощо.

Більш як пів століття знадобилося для того, щоб з'явилися перші сонячні фотоелементи з ефективністю, ледь не перевищуючи 1 %. Однак для старту фотоелектричної енергетики була потрібна суттєво більша ефективність. Вирішальним для цього напрямку з'явилося створення кремнієвих фотоелементів із p-n-переходом, що мали коефіцієнт корисної дії (ККД) приблизно 6 %. І, як відомо, перше практичне використання кремнієвих сонячних батарей для енергетичних цілей мало місце не на Землі, а в навколоземному космічному просторі [44].

Треба зазначити, що науковою базою для створення перших сонячних батарей стала розробка теорії і технології напівпровідникових матеріалів і структур. Основні області застосування приладів на напівпровідникових матеріалах у той час бачилися в техніці перетворення електричної енергії (перетворення змінного струму в постійний, високочастотна генерація, перемикання тощо) і в електронних обладнаннях передачі й обробки інформації (радіо, зв'язок і т. ін.). Додатково до «класичних»

напівпровідникових матеріалів – германію та кремнію, з 1950 р. почався синтез матеріалів типу $A^{III}B^{V}$ [45].

Встановлено, що в сучасних сонячних енергосистемах більше 85 % ФЕП виготовляють на основі кристалічних кремнієвих пластин, на вартість яких припадає понад 50 % всієї їх вартості. Тому надзвичайно актуальним є розробка та освоєння нових технологічних аспектів формування енергоефективних фотоелектричних перетворювачів на основі кристалічного кремнію з високими експлуатаційними властивостями.

За кристалічним складом поглинаючого матеріалу фотоелементи (ФЕ) поділяються на монокристалічні, мультикристалічні, полікристалічні, мікрокристалічні, нанокристалічні. Монокристалічні фотоелементи являють собою елементи з поглиначем у вигляді суцільного кристала напівпровідникової речовини. Мульти-, полі-, мікро- і нанокристалічні ФЕ мають у якості поглинаючої речовини суміш напівпровідникових кристалітів із різною орієнтацією, структурою та формою, розмір яких і визначає тип сонячного елемента. При розмірах кристалітів від 1 до 100 мм речовину називають мультикристалічною, від 1 до 1000 мкм – полікристалічною, менше 1 мкм – мікрокристалічною, менше 1 нм – нанокристалічною [46]. Відповідно від товщини світлопоглинаючого матеріалу ФЕ підрозділяються на тонкоплівкові та товстоплівкові. Тонкоплівкові фотоелементи мають товщину в декілька мікрометрів, товстоплівкові – у десятки або сотні мікрометрів.

Залежно від складу поглинаючого матеріалу ФЕ підрозділяються на кремнієві, на основі $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$ напівпровідників (в основному GaAs, CdTe) і змішані. Як правило, для зручності конструкції та підвищення КПД ФЕ прагнуть добитися поглинання світла в одному з його шарів. Цей шар називають поглинаючим. Другий напівпровідник служить лише для створення потенційного бар'єру і збирання генерованих світлом носіїв заряду. Монокристалічні кремнієві ФЕ (c-Si ФЕ) виготовляють із кремнієвих пластин 0,2 мм (≤200 мкм) товщини шляхом легування їх відповідно донорними й акцепторними домішками, створення омічних контактів.

При потраплянні світла на ФЕ фотони, енергія яких менше ширини забороненої зони напівпровідника, не вносять вклад у вихідну потужність ФЕП. При енергії більш ніж Eg, кожен фотон вносить вклад у вихідну потужність, що дорівнює Eg, а інша його енергія переходить у тепло. Максимальна потужність спектру сонячного світлового потоку знаходиться в діапазоні довжин хвиль 0,4–0,8 мкм. Для створення ФЕП придатні напівпровідникові матеріали з Eg=1–2 еВ.

Основний недолік монокристалічних кремнієвих ФЕ – велика витрата порівняно дорогого високочистого кремнію, більша частина якого відіграє роль пасивної підкладки. Треба зазначити, що технологія виробництва фотоелементів на кристалічному кремнії перебуває в майже ідеальному стані й досить складно знайти шляхи покращення вже існуючих технологічних процесів, відпрацьованих упродовж багатьох років у рамках виробництва мікроелектронних обладнань. Крім того, досить добре розроблена теорія фотогальванічних перетворень у монокристалі й на її основі створені комп'ютерні програми оптимізації параметрів монокристалічних ФЕ на основі кремнію. Єдиний шлях оптимізації c-Si ФЕ – це здешевлення вихідної сировини. Для зменшення собівартості ФЕП досліджується можливість використання як поглинача полі- і мультикристалічного кремнію.

До теперішнього часу виробництво більшості комерційних модулів сонячних елементів засноване на кристалічному Si з ефективністю $\eta \sim 20\,\%$ (I покоління ФЕП) і аморфних тонкоплівкових СЕ з великою площею ФЕП із величиною $\eta \sim 5–8\,\%$ (II покоління ФЕП). Концепція III покоління – це використання нано- та мікроструктур (мікродротів) ФЕП із мікродротами (Vapor-Liquid-Solid-VLS-метод) належать до класу пристроїв із особливим конструктивним виконанням для отримання спрямованого транспорту носіїв заряду (НЗ) за рахунок геометрії таких структур [47].

Для ефективної роботи фотоелектричних перетворювачів необхідне дотримання низки умов:

– оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника має бути достатньо великим, щоб забезпечити

поглинання значної частини енергії сонячного світла в межах товщини шару;

– генеровані при освітленні електрони й дірки мають ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін активного шару;

– ФЕП має володіти значною висотою бар'єру в напівпровідниковому переході;

– повний опір, включений послідовно із сонячним елементом (виключаючи опір навантаження), має бути малим для того, щоб зменшити втрати потужності (тепло Джоуля) у процесі роботи;

– структура тонкої плівки має бути однорідною по всій активній області сонячного елемента, щоб виключити закорочування і вплив на його параметри та характеристики.

Найбільш поширене використання ФЕП у космонавтиці, де вони займають домінуюче положення серед інших джерел автономного енергоживлення. ФЕП постачають електроенергію апаратурі супутників і системи життєзабезпечення космічних кораблів і станцій, а також заряджають електрохімічні акумулятори, використовувані на тіньових ділянках орбіти [47].

Зростання вимог до бортових систем космічних апаратів призводить до необхідності створення сонячних батарей, що володіють більш високими енергетичними й експлуатаційними характеристиками. Основні з них – підвищення ККД, збільшення ресурсу їх експлуатації до 15 років на геостаціонарних орбітах в умовах підвищеної радіації та можливості їх функціонування при високій концентрації сонячного випромінювання.

Сьогодні серед ФЕП наземного застосування, найбільш помітні кристалічні кремнієві (приблизно 80–85 % світового ринку) і тонкоплівкові сонячні елементи (приблизно 10 % ринку).

Для визначення і порівняння номінальної потужності сонячних елементів, вихідна потужність вимірюється при стандартних тестових умовах (СТУ). Ці умови передбачають:

– освітленість (1000 Вт/м^2 для ФЕП призначених до наземного використання, 1360 Вт/м^2 для ФЕП призначених до використання в космосі);

– сонячний спектр (AM1.5 у разі наземного використання, AM0 у разі використання в космосі);

– температура довкілля 25 °C (це важливо, тому що ефективність ФЕП падає при підвищенні його температури).

На сьогодні поширеними на ринку продаж є ФЕП на основі моно- та полікристалічного кремнію, багатокомпонентних сполуках CdTe, $CuInSe_2$ (CIS), $Cu(In, Ga)Se_2$ (CIGS). Ефективність таких панелей знаходиться в межах 10–26 %. Однак на ринку найбільш часто пропонуються фотоелектричні перетворювачі з монокристалічного (c-Si) та полікристалічного (poly-Si) кремнію. Батареї на основі монокристалічного кремнію, зазвичай, мають коефіцієнт корисної дії (ККД) у діапазоні 18–22 %, а полікристалічного – 12–18 %, проте вони дещо дешевші. Оскільки в готових панелей ціна 1 Вт енергії (у перерахунку на вироблену потужність) виходить майже однаковою, тому батареї з монокристалічного кремнію виявляються навіть вигіднішими. За такими параметрами, як ступінь і швидкість деградації, різниця між ними достатньо суттєва. У зв'язку із цим вибір на користь монокристалічного кремнію поки що очевидний. Крім того, часто при зниженні освітленості монокристалічний кремній забезпечує номінальну напругу довше, ніж полікристалічний, а це дає змогу отримувати деяку енергію, навіть, у дуже похмуру погоду і навіть у сутінках.

Особливу увагу при виборі сонячних батарей треба приділяти електричним характеристикам панелей (номінальній та максимальній силі струму). У галузі фотоелектричного перетворення сонячної енергії в електричну основна увага звернена на принципи роботи фотоелектричних перетворювачів на наноструктурах із монокристалічного кремнію,

Доведено, що приблизно 91 % енергії падаючого світлового потоку можна перетворювати в електричний струм у кремнієвих ФЕП при розв'язанні проблеми вивільнення носіїв заряду (НЗ) з об'єму напівпровідника. Низька вартість кремнію є визначальною при виборі матеріалу для них. Згідно з даними Міжнародного Енергетичного Агентства, сукупна потужність сонячних фотоелектричних установок у світі досягне

до 2030 р. – 900 ГВт, до 2040 р. – 2000 ГВт, і складе 3000 ГВт до 2050 р., що відповідатиме 25 % глобальної потужності електричної енергії на планеті.

Як відомо, найбільш розвинений ринок фотоелектроенергетики в житлово-комунальному секторі, планований обсяг якого становить приблизно 10 млн сонячних дахів (середня енергетична потужність даху – 3 кВт і середня світова ціна такого даху – $17 000), тобто обсяг світового ринку в цьому сегменті становить до теперішнього часу 170 млрд дол. Це цілком сформований, сегмент світового ринку фотоенергетики який швидко розвивається, причому зростаючими темпами. Зараз сонячні дахи в основному створюються на основі кремнієвих сонячних фотоелектричних перетворювачів. Основними замовниками є жителі міської та сільської місцевості в розвинених країнах, а також у державах із високим рівнем інсоляції [49].

В Україні ринок ФЕП у житлово-комунальному секторі не існує у зв'язку з відсутністю національної програми розвитку фотоенергетики й законодавчої бази, що стимулює розвиток цього сектора. Однак перспектива його розвитку для України очевидна, у зв'язку з безперервним підвищенням цін на електроенергію і географічним розташуванням країни, де 3/4 населення (30 млн осіб) проживає в регіонах із високим рівнем сонячної інсоляції. Очікується, що упродовж найближчих 20 років сонячна фотоенергетика створить більше 2 млн робочих місць, скоротить викиди парникових газів в атмосферу на 350 млн т CO_2, що еквівалентно зупинці 150 вугільних електростанцій.

Автори вважають, що визначальним фактором при виборі напрямку, за яким повинно здійснюватися розробка та удосконалення технологій отримання кремнієвих ФЕП, є використання вже існуючих технологій. Для практичного застосування сонячної енергетики насамперед необхідно знизити собівартість фотоелектричних перетворювачів при збереженні високого показника ККД. Ця проблема пов'язана з об'ємом виробництва, який мусить зрости на кілька порядків у порівнянні з теперішнім, тому зниження вартості таких виробів можна досягти за рахунок мініатюризації їх конструкцій, розміщення великої кількості

елементів схеми на одній пластині, а також використання наноструктур високої якості та запропонованих авторами нових технологічних аспектів формування ФЕП, що значно підвищить їх ефективність.

У порівнянні з іншими джерелами енергії ФЕП мають значні переваги:

- під час роботи немає викидів забруднюючої сполуки в довкілля;
- економія корисного палива;
- відсутність рухливих елементів, висока експлуатаційна надійність установки забезпечують строк служби 20 і більше років;
- пониженні експлуатаційні витрати;
- модульний принцип системи (для підвищення потужності установки достатньо збільшити кількість панелей) відповідно до реальних потреб користувачів.

Однак необхідно відмітити їх недоліки:

- висока питома вартість конструкції;
- виробництво енергії не постійне через обертання Землі та погодних умов;
- необхідність очистки поверхні фотоелектричних перетворювачів від пилу.

Для зниження оптичних втрат ФЕП, пов'язаних із неповним використанням падаючого на його поверхню випромінювання, на теперішній час найбільш широко використовуються такі методи:

- структурування поверхні призводить до зниження інтегрального коефіцієнта відображення ФЕП;
- нанесення на поверхню ФЕП одно- або двошарового антивідображаючого покриття;
- зменшення площі контактів на лицевій поверхні для зниження втрат на затемнення;
- нанесення на тильну поверхню ФЕП металевого шару збільшує ефективність поглинання випромінювання довгої хвилі за рахунок його багатократного проходження через об'єм напівпровідника;

• зменшення глибини емітерного переходу та зниження концентрації легуючої домішки близько лицевої поверхні для підвищення чутливості ФЕП у короткохвильовій частині спектру.

Автори вважають, що електричні втрати енергії можна зменшити за допомогою таких методів:

• вибору оптимального кроку та товщини контактних шин на лицевій поверхні для зниження послідовного опору ФЕП;

• пасивації лицевої поверхні для зниження швидкості поверхневої рекомбінації;

• пасивації тильної поверхні та створення ізотипних переходів;

• мінімізації площі контактів та додаткове легування приконтактних областей для зменшення рекомбінаційних втрат на межі розділу метал – напівпровідник;

• використання гетеруючих обробок, що збільшить час життя неосновних носіїв заряду;

• використання технологій, пов'язаних з отриманням просвітлюючих покриттів на кремнієвих структурах.

Один із таких технологічних аспектів створення ФЕП базувався на підготовці вихідного матеріалу, отриманні та розрізанні спеціально вирощених зливків монокристалічного кремнію. Оскільки при вирощуванні кристалів допускався порівняно великий розкид (до 30 %) питомого опору це дало змогу використовувати практично всю бездислокаційну частину зливка. Оксид кремнію з поверхні кремнієвих зразків під час експерименту видалявся травленням, що складався із рівних частин фтористоводневої кислоти та деіонізованої води.

Наступним технологічним аспектом формування фотоелектричних перетворювачів було створення структури типу ITO/nSi/n+Si, яка виготовлялися на основі пластин монокристалічного кремнію, вирощеного за напрямом (111), що мали питомий опір 0,01 Ом·см, діаметр 76 мм, товщину $3{,}8\times10^2$ нм з епітаксійним шаром на робочій поверхні. Для цього монокристалічні зливки кремнію циліндричної форми калібрувалися до діаметру 76±0,2 мм, виготовлявся базовий зріз для можливості орієнтації пластин на послідуючих операціях і зріз – мітки для їх маркування. Пластини отримували орієнтованою різкою

зливків кремнію алмазними кругами АВРК. Точність орієнтації направлення різки складала ±0,2°. Пластини відмивалися та травилися в концентрованому розчині луги за температури 75…90 °С протягом 60–90 с. Потім пластини сортувалися за геометричними розмірами й полірувалися спочатку алмазною пастою АСМ 2/1, а потім – суспензією з карбіду кремнію, що мала розмір абразивних частинок менше 0,3 мкм. Така операція гарантувала відсутність порушеного шару на пластині. Після відмивки пластин методом водневого відновлення хлорсиланів нарощувався епітаксійний шар. Він отримав задані параметри: n^+-тип електропровідність, питомий опір від 0,5 до 40 Ом·см, товщину від 1×10^2 до 1×10^3 нм.

Виготовлення епітаксійних шарів на кремнієвих пластинах проводилося на установці УПКА. До її складу входили два вертикальних реактора, що охолоджувалися водою, об'ємом 20 л із нержавіючої сталі, газорозподільний пульт, тиристорний перетворювач, пульт регулювання потужністю, програмний пристрій, який забезпечував автоматичне проведення процесу осадження епітаксійних шарів. Кремнієві пластини вкладалися на графітову піраміду, грані якої підлягали шліфовці. Нагрівання піраміди відбувалося струмами високої частоти за допомогою мідного індуктора, що охолоджувався водою. Це дало змогу отримати наноструктуру високої якості.

Встановлено, що одним зі шляхів підвищення ефективності сонячних елементів у короткохвильовій області спектра є покриття світлочутливої поверхні ФЕП прозорим просвітлюючим шаром. Використання просвітлюючого покриття дає змогу зменшити коефіцієнт відбиття світла від чистої поверхні кремнію в області спектра 4–11 нм. У результаті цього поліпшуються експлуатаційні характеристики і зростає термін служби приладової структури. Серед матеріалів, перспективних для використання в якості просвітлюючих покриттів кремнієвих ФЕП, вигідно виділяються SnO_2 і In_2O_3, які володіють високою прозорістю в заданій області спектра. Крім того, такі покриття захищають елементи від пошкоджень, викликаних радіацією в Космосі й несприятливими атмосферними впливами на Землі.

Під час експерименту запропоновано в якості просвітлюючого покриття використання саме сполук In_2O_3+SnO_2. Для виготовлення шарів оксиду олова, оксиду індію та їх сполуки авторами була розроблена технологія, спеціально сконструйована та виготовлена дослідно-промислова установка, яка складається із нагрівача кремнієвих пластин та вертикально-струменевого кварцового пульверизатора. Система подачі газу включала редуктор, фільтр очищення газу від частинок пилу, вологи та масла, регулятор витрат. Розчин розпилювався пульверизатором і подавався періодично. Час періоду подачі та паузи подачі розчину регулювалися електронним блоком, який керував роботою регулятора витрат газів і відсічного клапана. Температура нагрівача контролювалася за допомогою термопари. Для створення задовільних умов осадження шарів, пластини були огороджені кварцовим екраном. Підбір конфігурації та діаметра сопла пульверизатора забезпечували мілко дисперсність струменя розчину. Для отримання оксидів олова та індію використовувалися розчини їх хлоридів $SnCl_4$, $InCl_3$ від 5 до 15 %, а як розчинювач для хлоридів використовувався етиловий спирт. Спільний розчин певних солей розпилявся за допомогою одного пульверизатора.

Використання технології, яка основана на методі пульверизації, забезпечила стабільність результатів. Цей метод полягає в розпиленні на нагріту підкладку розчину, спиртового або водневого, який мав розчинені солі компонентів осадженої сполуки. Дрібнодисперсні краплі розпиленого розчину на поверхні розігрітої підкладки піролітично розкладалися, а продукт реакції створював на її поверхні окремі кристали, оскільки процес піролізу є ендотермічним. Для компенсації втрат тепла до підкладки підводилася теплова енергія, яка необхідна також для процесів агломерації окремих кристалів та їх рекристалізації, внаслідок чого створювалася однорідна плівка осадженого матеріалу.

Встановлено, що характер електропровідності шару ІТО змінювався залежно від складу в ньому SnO_2, скоріш за все, за наступних причин.

При невеликих концентраціях SnO_2 у складі In_2O_3+SnO_2 атоми індію заміщаються атомами олова. У результаті в кристалічній

решітці діоксиду індію олово виступає як донор. При більш високих концентраціях SnO_2 створювалися умови для створення комплексів нейтральних молекул SnO_2. Атоми Sn, які при малих концентраціях створювали донорні рівні, при великих концентраціях утворюють нейтральні комплекси. Це і є причиною зниження електропровідності. Найбільшу електропровідність мали шари ІТО, до яких входило приблизно $7{,}7 \times 10^{-4}$ г/моль SnO_2.

Використання запропонованого покриття дасть змогу підвищити ефективність приладової структури до 27 %. Дослідження спектру випромінювання, що відбивається поверхнею ФЕП, показало мінімальне значення (орієнтовно 2,3 %) при довжині хвилі 630 нм і середнє відбиття 7 % при довжині хвилі 400–1000 нм. Отже, як демонструють результати дослідження, подвійний шар In_2O_3+SnO_2 характеризується високою абсорбційною здатністю і може бути використаний для зростання ефективності ФЕП.

На сьогодні напівпровідникові гетероструктури є основою конструкцій сучасних сонячних батарей та ФЕП, транзисторів, приладів квантової електроніки, телекомунікацій, НВЧ-техніки, електронної техніки для систем зв'язку та світлотехніки. При розробці елементної бази на основі цих сполук основну увагу приділено формуванню гетероепітаксійних шарів цих сполук, підвищенню їх якості (насамперед при використанні пластин більшого діаметру), обробці процесів легування гетероструктур. Оскільки при виготовленні ФЕП на основі сполук ITO/nSi/n+Si широко використовуються технологічні прийоми та операції технології кремнієвих ІС, це дає змогу забезпечити їх швидкий прогрес. За допомогою підбору технологічних параметрів гетероструктур (матеріалу, товщини, послідовності розташування шарів та ін.) можна отримувати структури із заданими властивостями та значно покращити електричні параметри та якість ФЕП.

Оскільки використання кремнієвих структур із гетеропереходами має велику вагу при створенні сучасних ФЕП, з'являються все більше нових та модифікованих методів синтезу гетероструктур: гідротермальний метод, золь-гель метод, MOVPE (або MOCVD, осадження металоорганічних сполук із газової фази), лазерне осадження. У кожному із цих методів варіюється

точність та швидкість росту структури. Залежно від того, який кінцевий продукт потрібний, вибирається той чи інший метод синтезу його модифікації. Передбачено високі перспективи в розвитку високошвидкісної оптоелектроніки, де всі методи синтезу спрямовані на отримання матеріалів із заданими характеристиками. На сьогодні можна виділити три основні властивості напівпровідникових гетероструктур: транспортні, оптичні та фотокаталітичні.

Відомо, що відмінність реальних гетеропереходів від ідеальних пов'язано з наявністю дефектів на поверхні розділу та в області просторового заряду, що призводить до таких ефектів:

– заряджені стани деформують зонну структуру, піднімаючи або опускаючи зони провідності на поверхні розділу по відношенню до рівноважного положення рівня Фермі;

– з'являються досить високої густини рекомбінаційні центри, які є причиною виникнення великих значень зворотних струмів насичення.

Встановлено, що в більшості випадків неідеальність переходу погіршує електрофізичні характеристики ФЕП, зменшуючи напругу холостого ходу та коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики (ВАХ). Для створення приладів зі стабільними характеристиками необхідно керувати як об'ємними властивостями обох матеріалів, так і властивостями поверхні розділу. Однак явища, пов'язані з поверхнею, неможливо розглядати тільки як погіршення характеристик ФЕП. Змінюючи властивості поверхні розділу, можна розраховувати й на позитивні результати. Вважається, що за рахунок поверхневих ефектів виникають додаткові перспективи покращення показників якості реальних ФЕП.

Авторами проведено дослідження та встановлено низку технологічних аспектів, які значно впливають на якість та ефективність ФЕП. Істотний вплив на величину вихідної потужності ФЕП здійснюють температура та освітлення. Однак вплив цих параметрів неоднозначний і змінюється залежно від типу базового шару ФЕП. Ефективність ФЕП на основі кремнію зменшується зі зростанням температури приладової структури водночас

тонкоплівкові ФЕП демонструють менш закономірні тенденції, з додатковою залежністю від технології формування приладової структури. Підвищення температури ФЕП призводить до зміни напівпровідникових властивостей, в результаті чого відбувається зменшення ширини забороненої зони з ростом температури. При зменшенні ширини забороненої зони напівпровідника відбувається незначне збільшення струму короткого замикання: він збільшується на $(1{,}5–3)\times10^{-5}$ А при збільшенні температури на 1 °С, оскільки фотони з низькою енергією можуть збуджувати електрони до переходу крізь заборонену зону. Підвищена температура ФЕП істотно впливає на значення напруги холостого ходу, яка лінійно залежить від температури і відповідає зміні Е. Р. С. приблизно на 0,5 % на кожен градус. Оскільки зі зменшенням ширини забороненої зони розщеплення квазірівнів Фермі також зменшується, здійснюється зниження напруги холостого ходу пристрою.

Однак питання залежності ефективності ФЕП від температури досі залишається відкритим.

Підвищення вихідних характеристик кремнієвих ФЕП під час експериментальних досліджень було досягнуто насамперед за рахунок збільшення напруги холостого ходу, оскільки її величина також залежить від складу SnO_2 в ІТО-шарі, нанесеного на кремнієву епітаксійну структуру n-n^+-типу. Найбільші значення напруги холостого ходу 530 мВ були досягнуті при складі ІТО, який мав більш 95 % In_2O_3 і ~3 % SnO_2. Товщина нанесеного шару під час процесу визначається за інтерференційною окраскою.

Встановлено, що значення напруги холостого ходу залежить також від товщини ІТО-шару, і досягало значення 0,5–0,55 В при товщині шару на пластинах 1100 Å (напилювання при температурі 420…440 °С). За умови освітлення АМ1 струм короткого замикання становив 25–30 мА, а ККД приладової структури ~20 %. При цьому нанесення подвійного шару призвело до різкого збільшення фотоструму приладової структури від 40 до 60 %, який також являється важливим параметром ФЕП.

Наступним технологічним аспектом було проведення авторами дослідження величини коефіцієнту відбиття шару ІТО товщиною 1000 Å залежно від величини вмісту SnO_2 в ІТО. Із цією

метою взято зразки без вмісту SnO_2, зі вмістом SnO_2 в ІТО рівним $0{,}38\times10^{-4}$, $7{,}7\times10^{-4}$, 12×10^{-4} г/моль та з полірованою поверхнею кремнію. Максимальний коефіцієнт відбиття отримано для фотоперетворювачів зі складом SnO_2 $7{,}7\times10^{-4}$ г/моль. У цих же умовах визначена навантажувальна характеристика сонячного елемента, коефіцієнт заповнення при цьому склав FF=0,62, а ККД – η=21,3 %.

Визначення ККД ФЕП проводилося на спеціально виготовленій авторами лабораторній установці сортування фотоперетворювачів, а методика визначення полягала у наступному. З ФЕП, розложених на предметному освітлювальному столику, знімалася генерована ним напруга й подавалася на блок компараторів, де вона порівнювалася з опорною напругою, при цьому створювався сигнал, який поступав на блок реле. Було прийнято, що максимальна потужність генерується ФЕП у тому випадку, коли напруга на ньому досягає 0,4 В. Якщо напруга на ФЕП перевищує 0,4 В, то відбувається закорочення одного або кількох резисторів контактами Р1–Р4. Якщо напруга на ФЕП виділяється меншою, ніж 0,4 В, то відбувається розмикання контактів і, відповідно, підключається один або декілька резисторів. Напруга, що знімалася з резистора R_0, який служить датчиком струму, також подавалася на блок компараторів і порівнювалася з величиною відповідної опорної напруги і величиною протікаючого струму ($I\sim U/R_0$). На блоці індикації відображалася величина знятого сигналу, градуйованого в ККД.

Важливим технологічним аспектом також являлося нанесення покриттів із металу на поверхню кремнієвих пластин, яке проводилося методом випаровування металу у вакуумі на установці УВН 71 Р2. Вона являє собою систему з двох вакуумних насосів, паромасляного та дифузійного, з'єднаних із камерою відкачки. У ній знаходилася карусель із закріпленими на ній кремнієвими пластинами, яка крутилася в горизонтальній площині. Термічне випаровування металу відбувалося в ємності з тугоплавкого металу – вольфраму та танталу.

Як струмоз'ємний контакт до кремнію використовувалася мідь, що має менший, після срібла, питомий опір. Оскільки хром

має високу стійкість до окислення, а також хорошу адгезію до кремнію, він використовувався для захисту мідного контакту від атмосферної дії навколишнього середовища та як підшар міді. Робочі та неробочі контакти виготовлялися методом вакуумного напилення послідовно шарів хрому, міді. Ширина металевих полос складала від 100 до 500 мкм. Серед великої кількості методів зменшення рекомбінаційних втрат на границі розділу метал / напівпровідник найбільш ефективним виявилася мінімізація площі контактів.

Таким способом авторами запропоновано низку конструктивно-технологічних аспектів формування фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії, які значною мірою вплинуть на підвищення їх енергоефективності.

1. Аналіз усієї сукупності встановлених параметрів підвищення фотоструму до 60 %, збільшення значення напруги холостого ходу до 530 мВ при складі ІТО, який мав більш 95 % In_2O_3 і ~3 % SnO_2, та ККД досліджених ФЕП від особливостей конструктивно-технологічного рішення в базових кристалах кремнію дав змогу встановити, що текстурування і потоншення базових кристалів з орієнтацією (111) шляхом глибокого хімічного травлення у водному розчині луги, поряд із подальшим формуванням епітаксійного n^+-шару та формування подвійного прозорого просвітлюючого шару In_2O_3+SnO_2 мають бути невід'ємними складовими нового конструктивно-технологічного рішення монокристалічних Si – ФЕП з істотно підвищеними значеннями ККД.

2. Автори вважають також, що ефективність сонячних елементів можна значно підвищити за допомогою зниження питомого опору шарів In_2O_3/SnO_2 та оптимізації контактного рисунку.

Можна зазначити, що розвитку фотовольтаїки, переходу до широкомасштабного промислового виробництва фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії сприятиме пошук нових конструктивно-технологічних рішень (введення додаткових шарів, формування просвітлюючих покриттів) сучасних приладових структур та створення новітніх матеріалів.

Суттєве підвищення енергоефективності національної економіки України є одним з основних шляхів забезпечення національної безпеки, наповнення бюджету, підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції, як на внутрішньому, так і на зовнішніх ринках, вирішення соціальних питань [50].

Отже, впровадження енергозберігаючих технологій може скоротити імпорт енергоресурсів і нівелювати політичний тиск на нашу країну з боку експортерів нафти й газу. Крім того, зменшення енергетичної складової собівартості продукції дає змогу Україні стати конкурентоспроможною на зовнішніх ринках.

3

ПРИСТРОЇ ОПТИЧНОЇ ЛОГІКИ НА ЕФЕКТАХ МУЛЬТИСТАБІЛЬНОСТІ У ВИПАДКОВОМУ ПОЛІ

3.1. Моделювання розповсюдження сигналу в нелінійному середовищі

У проведеній науково-дослідній роботі розглянуто дослідження біфуркацій у середовищі дворівневих атомів, що знаходяться в резонаторі, який збуджується випадковим імпульсним полем. Ця модель є більш реалістичною, порівняно із гаусівським випадковим процесом. Показано [51], що залежно від тривалих випадкових імпульсів на виході резонатора, у ньому встановлюється або статичний розподіл амплітуд і фаз, трансформований проявом поглинання, або в умовах, коли на вході резонатора поле вироджується в дельта-корельований шум, поле резонатора представляє собою марківський стрибкоподібний процес із розподілом амплітуд, який визначається рівнянням Колмолгорова – Феллера. Дослідження біфуркаційних залежностей у випадковому імпульсному полі дозволяє передбачити низку нових ефектів і збільшення числа стабільних режимів – три- та чотиристабільність, обмеження інтенсивності прохідного випромінювання, підсилення флуктуацій у областях біфуркаційних переходів.

При дослідженні процесу взаємодії з атомами середовища, що знаходиться в резонаторі, основна відмінність, порівняно з ізольованими атомами, проявляється в самоузгодженності поля і поляризації середовища: поляризація середовища являється, у відповідності з рівнянням Максвела, джерелом поля резонатора, котре у свою чергу поляризує середовище, яке представляється рівнянням для матриці густини.

Дійсно, вважаючи, що поле резонатора (рис. 3.1, див. с. 46) у плоскохвильовому представленні може бути записане у вигляді:

$$E(z,t) = \left\{ E^{+}(z,t)\exp(-ik_0 z) + E^{-}(z,t)\exp(ik_0 z) \right\} \exp(-i\omega_0 t),$$

де ω_0 – несуча частота поля, $k_0 = \dfrac{\omega_0}{c}$, для компонент поля $E^{\pm}(z,t)$ резонансно взаємодіючих із нелінійним середовищем резонатора, справедливі скорочені рівняння, які випливають із рівнянь Максвела в наближенні повільно змінюючихся амплітуд [51]:

$$\frac{\partial E^{\pm}}{\partial t} \pm c\frac{\partial E^{\pm}}{\partial z} = 2i\gamma G_1 \beta_{12}^{(1)}. \qquad (3.1)$$

Тут $\gamma = 2\pi N_0 \omega_0^2 \hbar^2 / k_0 c^2$, N_0 – число поглинаючих атомів, G_1 – дипольний матричний елемент взаємодії, $\beta_{12}^{(1)}$ – фур'є-компонента матриці густини атома, представленого у дворівневому наближенні.

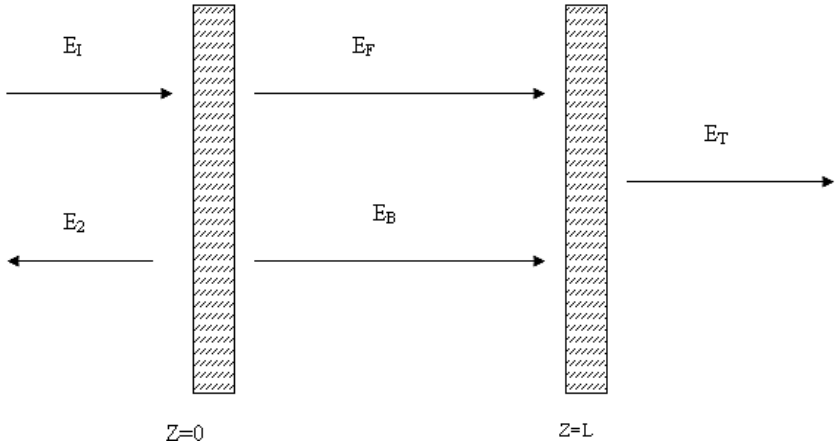


Рисунок 3.1 – Схема резонатора Фабрі – Перо

Використовуючи наближення середнього поля, для амплітуди стоячої хвилі:

$$E(z,t) = E^{+}(z) + E^{-}(z) = 2A\sin k_0 z,$$

усередненої за довжиною резонатора:

$$E = \frac{1}{L}\int_0^L E(z)dz = \sqrt{2}A = \sqrt{2}\frac{E_T}{\sqrt{T}},$$

де E_T – амплітуда поля на виході резонатора, T – коефіцієнт прозорості дзеркал, отримано [51] рівняння:

$$\frac{dE}{dt} = -k_{\text{в}}(1+\Phi)E + \frac{\sqrt{2}K_{\text{в}}E_j}{\sqrt{T}} + 2\sqrt{2}i\gamma G_1\beta_{12}, \qquad (3.2)$$

де E_j – амплітуда поля на вході резонатора,

$$K_{\text{в}} = \frac{cT}{L(1+\sqrt{R})},$$

де $K_{\text{В}}$ – константа резонатора, R – коефіцієнт відбивання дзеркал, $\Phi=\omega_0-\omega_c$, ω_c – частота моди резонатора. Рівняння (3.2) отримано за умови $J_m\chi << I, R \approx I (T = I - R \to 0)$, що є наслідком наближення середнього поля [52; 53] (χ – сприйнятливість середовища).

Рівняння для матриці густини атома:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar}[\hat{\text{H}}\rho] - \hat{T}(\rho-\rho_0) \qquad (3.3)$$

встановлює зв'язок між поляризацією середовища та полем $(\hat{\text{H}} = \hat{\text{H}}_0 + \hat{V}, \hat{V} = -\vec{d}\vec{E})$, і повинно розглядатися сумісно із рівнянням (3.3). Іншими словами, при резонансній взаємодії поля резонатора з атомами середовища наближення заданого поля не має сенсу.

Для середовища, що розглядається у дворівневому наближенні, рівняння (3.2) і (3.3) можуть бути виражені через безрозмірні змінні $\tau=k_{\text{в}}t$,

$$Q = 2\,\text{Re}\,\beta_{12}\frac{1}{n_p}\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}, \quad M = 2J_m\beta_{12}\frac{1}{n_p}\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}, \quad N = \frac{n}{n_p},$$

$$y = \frac{E_j^0}{|E_{\text{н}}|\sqrt{T}}, \qquad x = \frac{E_T^0}{|E_{\text{н}}|\sqrt{T}}:$$

$$\frac{dx}{d\tau} = -x + 2C_0M + y(\tau)\cos\theta, \qquad (3.4)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \Phi - y(\tau)\frac{\sin\theta}{x} - \frac{2C_0}{x}Q + \frac{d\alpha}{d\tau}, \tag{3.5}$$

$$a_1\frac{dN}{d\tau} = Mx - N + 1, \tag{3.6}$$

$$a_2\frac{dM}{d\tau} = -M + \delta Q - xN, \tag{3.7}$$

$$a_2\frac{dQ}{d\tau} = -Q - \delta M, \tag{3.8}$$

де здійснено перехід до дійсних амплітуд:

$$E = \mathrm{E}_T^0 \exp i\psi, \quad \mathrm{E}_J = \mathrm{E}_J^0 \exp i\alpha,$$

$\left|\mathrm{E}_и\right|^2 = \left[4\left|G_1\right|^2 T_1T_2\right]^{-1}$ – інтенсивність насичення,

$$a_1 = k_в T_1, \quad a_2 = k_в T_2, \quad \delta = (\omega_{12} - \omega_0)T_2,$$

де ω_{12} – власна частота атомів, n – заселеність дворівневої системи, $\theta=\alpha-\psi$ – різниця фаз, а

$$C_0 = \frac{n_p\left|G_1\right|^2 \gamma T_2}{2k_в}$$

параметр кооперативної взаємодії, введений у роботі [52; 53].

Проведено дослідження умови виникнення оптичної бістабільності в нелінійному резонаторі, який знаходиться в полі із випадково флуктуюючою амплітудою та фазою. Стійкість рівноважних станів поля резонатора залежить від розподілу випадкових значень амплітуди і фази, які визначаються стохастичним рівнянням (3.4), (3.5), і, отже, від типу випадкового процесу, що збуджує резонатор.

При статичному випадковому полі на вході резонатора стохастичні рівняння (3.4), (3.5) трансформуються до виду:

$$\frac{dx}{d\tau} = -f(x) + y\cos\theta, \tag{3.9}$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = F(x) - \frac{y}{x}\sin\theta, \tag{3.10}$$

де

$$f(x) = x\left(1 + \frac{2C_0}{1 + \sigma^2 + x^2}\right), \quad F(x) = \Phi - \frac{2C_0\delta}{1 + \sigma^2 + x^2},$$

а статично розподілені амплітуда Y і фаза α відображаються двовимірним розподілом ймовірності:

$$d\omega(y,\alpha) = d\omega(y)d\omega(\alpha) = \omega(y)\omega(\alpha)dyd\alpha. \qquad (3.11)$$

У цьому випадку вважається, що

$$\omega(y) = \frac{2}{\sigma^2} y \exp\left(-\frac{y^2}{\sigma^2}\right), \qquad (3.12)$$

розподіл Релея, розподіл фаз рівноймовірний:

$$\omega(\alpha) = \frac{1}{2\pi}.$$

Розподіл апмлітуд і фаз поля резонатора можна отримати за допомогою (3.11), якщо використати зв'язок між значеннями y, α на вході і x, θ всередині резонатора. Цей зв'язок витікає із рівноважного рішення (3.9), (3.10):

$$y = f(x)\left[1 + \xi^2(x)\right]^{1/2}, \qquad (3.13)$$

$$\alpha = \theta + \psi = \operatorname{arctg}\xi(x) + \psi, \qquad (3.14)$$

де

$$\xi(x) = \frac{xF(x)}{f(x)}.$$

Здійснюючи перехід до нових змінних (x, θ) у (3.11), маємо:

$$d\omega(x,\theta) = \omega(x)\omega(\theta)h_1(x,\theta)h_2(x,\theta)dxd\theta, \qquad (3.15)$$

де

$$h_1(x,\theta) = \left\{f_x^{12}(x) + \left[(\operatorname{arctg}\xi(x))'_x\right]^2\right\}^{1/2},$$

$$h_2(x,\theta) = 1.$$

Тоді стаціонарна густина розподілу амплітуд приймає вигляд:

$$\left(\varpi(\vartheta) = \frac{1}{2\pi}\right):$$

$$P_{\infty}(x) = \frac{2}{\sigma^2}\exp\left[-\frac{f^2(x)}{\sigma^2}\right]\left|f_x^{'}(x)\right| f(x), \qquad (3.16)$$

відображаючи розподіл амплітуд поля резонатора при стабілізованій фазі збуджуючого поля.

Залежність розподілу $P_{\infty}(x)$ має складну форму, і для визначення її особливостей представимо (3.16) у вигляді:

$$P_{\infty}(x) = \left|f_x^{'}(x)\right|\omega(f(x)), \qquad (3.17)$$

де

$$\omega(f(x)) = \frac{2}{\sigma^2} f(x)\exp\left[-\frac{f^2(x)}{\sigma^2}\right], \qquad (3.18)$$

як функція $f(x)$, дублює статичний розподіл амплітуд на вході до резонатора.

Структура густини розподілу $\omega(f(x))$ визначається екстремумами функції $f(x)$, які приходяться на значення амплітуд:

$$x_{2,3} = \left[C_0 - 1 \pm \sqrt{C_0(C_0-4)}\right]^{1/2}. \qquad (3.19)$$

При цьому максимум функції $f(x)$ відповідає мінімуму розподілу $\omega(f(x))$, і, навпаки, мінімум $f(x)$ відповідає максимуму $\omega(f(x))$ (рис. 3.2, див. с. 51). Маючи на увазі, що густина розподілу $P_{\infty}(x)$ містить співмножник $|f_x^{'}(x)|$, нулі котрого визначаються значеннями (3.19), отримуємо, що залежність $P_{\infty}(x)$, має вигляд, представлений на рис. 3.2, *в*.

Утворення складної структури розподілу $P_{\infty}(x)$, порівняно із релеївським розподілом амплітуд поля на вході, зв'язано з особливостями абсорбції випромінювання середовища резонатора: значення амплітуд x_2, x_3 попадають у область нестійких рішень і ділять області стійких станів резонатора.

Значення амплітуди x_2 розділяє два, фізично різних, стійких режимів поглинання – слабого поля в інтервалі $0 \le x \le x_2$, відповідаючого лінійному поглинанню із коефіцієнтом послаблення поля, який залежить від коефіцієнта поглинання:

$$\alpha(C_0 \approx \frac{\alpha c}{k_{\text{в}}}) :$$

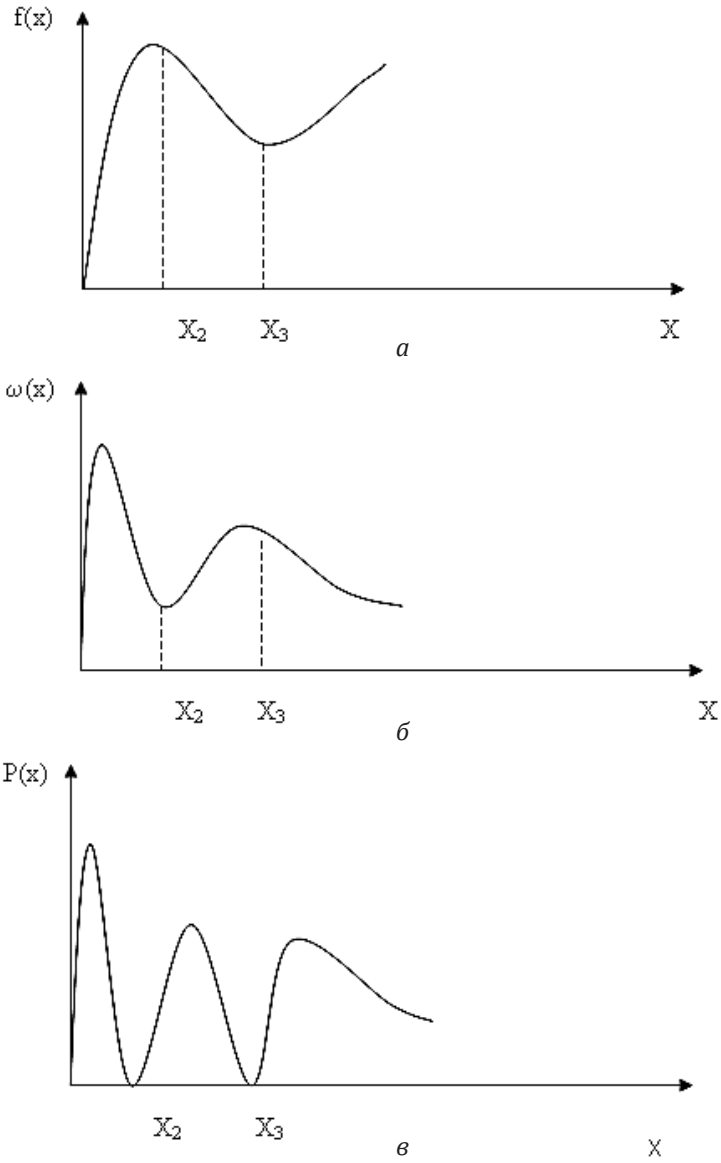


Рисунок 3.2 – Формування розподілу амплітуд поля резонатора

$$\eta = \frac{x}{y} \approx \frac{1}{1 + \dfrac{2C_0}{1+\sigma^2}},$$

коли ефект насичення не проявляється. Поглинання в інтервалі $x_2 \le x \le x_3$ проходить, у відмінності від попереднього випадку, в умовах, близьких до насичення. При цьому внаслідок вирівнювання заселеності збуджених атомів, проявляється просвітлення середовища, коли значення коефіцієнта ослаблення поля наближається до одиниці:

$$\eta = \frac{1}{1 + \dfrac{2C_0}{1+\sigma^2+x^2}} \approx 1.$$

Дослідження стійкості стаціонарного поглинання в резонаторі, який збуджується статичним полем, проведемо, усереднюючи рівняння (3.9) з імовірністю (3.16), і вважаючи, що різниця фаз θ фіксована:

$$\left\langle \frac{dx}{d\tau} \right\rangle = -\left\langle f(x) \right\rangle + \overline{y}_{\perp}, \qquad (3.20)$$

де кутові дужки означають усереднення за випадковим розподілом амплітуд, а $\overline{y}_{\perp} = \overline{y\cos\theta}$ – біфуркаційний параметр.

Рівноважне рішення рівняння (3.20) прямує з умови $\left\langle \dfrac{dx}{d\tau} \right\rangle = 0$, звідки отримуємо біфуркаційне рівняння:

$$\overline{y}_{\perp} = \left\langle f(x) \right\rangle, \qquad (3.21)$$

у якому можна виділити функціональну залежність від середньої амплітуди:

$$\overline{x} = \int_0^{\infty} x P_{\infty}(x) dx,$$

використавши перетворення:

$$\left\langle f(x) \right\rangle = \overline{x}^{\eta},$$

де

$$\eta = \frac{\ln\left\langle f(x) \right\rangle}{\ln \overline{x}}.$$

Тоді біфуркаційне рівняння (3.21) приймає вигляд

$$\overline{y}_{\perp} = \overline{x}^{\eta(x)}, \qquad (3.22)$$

який дає змогу чисельним розрахунком знайти біфуркаційну залежність $\overline{x}(\overline{y})$. Біфуркаційна діаграма $\overline{x}(\overline{y})$ має три вітки, що відповідають стійким станам – *OA*, *CN*, *OS*, у повній відповідності із розподілом ймовірності (3.18): вітка *OA* відповідає лінійному поглинанню, *CN* – нелінійному поглинанню, й *OS* – просвітленню середовища. У відмінності від монохроматичного збудження збільшилося число біфуркаційних переходів і змінився їх характер – поряд із регулярною біфуркаційною точкою *A* з'являються особливі точки із розвітленими біфуркаційними переходами: точка *C*, що відповідає переходам $K \leftarrow C \rightarrow D$, і біфуркаційна точка *N*, котра обмежує інтенсивність прохідного випромінювання. Можливість переходів $N \rightarrow N'$ та $S \rightarrow S'$ зумовлена тими обставинами, що вітки *OS* і *CN* відповідають збудженим станам системи, зв'язаним осциляційними переходами, що зумовлюють «віртуальний» перехід одного стану в інший, вітка діаграми *SN* відповідає нестійкому стану, що відповідає провалу в розподілі імовірностей, вихід із якого може призвести або до зриву випромінювання резонатора (ефект обмеження інтенсивності прохідної хвилі) – перехід $N \rightarrow N''$ або до переходу $N \rightarrow N'$ у новий стійкий стан.

3.2. Мультистабільний логічний пристрій оптоелектронної інформаційної системи для солітонних систем зв'язку

У попередньому розділі було показано, що формування стійких режимів поглинання та випромінювання в резонаторі залежить від статичних характеристик випадкового поля, поданого на вхід резонатора. На основі цих результатів були запропоновані [52; 53] оптичні логічні пристрої, які володіють трьома та чотирма стійкими станами, залежно від типу модуляції зовнішнього сигналу.

Загальною для розроблених логічних пристроїв є схема, яка містить джерело монохроматичного випромінювання, скануючий інтерферометр Фабрі – Перо, амплітудний модулятор зі статичним випадковим шумом, резонатор, заповнений резонансно поглинаючим середовищем у якості котрого можуть виступати такі відомі нелінійно-оптичні кристали, як β-BaB_2O_4 (BBO), LiB_3O_5 (LBO), $KTiOPO_4$ (KTP), $RbTiOPO_4$ (RTP), реєструючий пристрій [54–57].

Скануючий інтерферометр Фабрі – Перо дає змогу безперервно перебудовувати сталу складову амплітуди збуджуючого поля, а амплітудний модулятор, який представляє собою нелінійний кристал KDP, ADP або KTP, підключений до стандартного генератора шума $\Gamma_{ш}$, модулює сигнал прямокутними імпульсами із заданим розподілом випадкових амплітуд. В умовах, коли тривалість прямокутних імпульсів відповідає нерівності:

$$\tau_{и} >> \frac{1}{K_{в}} = \frac{L}{cT},$$

де c – швидкість світла в середовищі, а L – довжина резонатора, поле, що пройшло модулятор, є статичним випадковим процесом.

У статичному полі характеристики сигнала на виході мають вигляд, представлений на рис. 3.3 (див. с. 55), і демонструють, що в статичному полі, на відміну від монохроматичного, з'являються три стабільні стани. Бістабільна область із двома стійкими станами вихідного випромінювання дає змогу реалізовувати логічні операції І, АБО, НІ, комірку пам'яті. Збільшення амплітуди вхідного випромінювання вище деякого критичного значення призводить до переходу в третій стійкий стан без бістабільної області.

Логічний пристрій може бути використаний для кодування оптичної двійкової інформації. Режим роботи приймально-підсилюючої апаратури підбирається в одній з областей бістабільності, а передача інформаційних сигналів «0» та «1» забезпечується включенням-виключенням у передаючій лазерній системі амплітудного модулятора статичним випадковим процесом.

Наявність, певним чином налагодженого, оптичного резонатора в приймальній, а амплітудного модулятора в передаючій системі, забезпечує секретність передачі двійкової інформації. Описаний оптичний логічний пристрій має значно більші функціональні можливості, ніж уже відомі прилади.

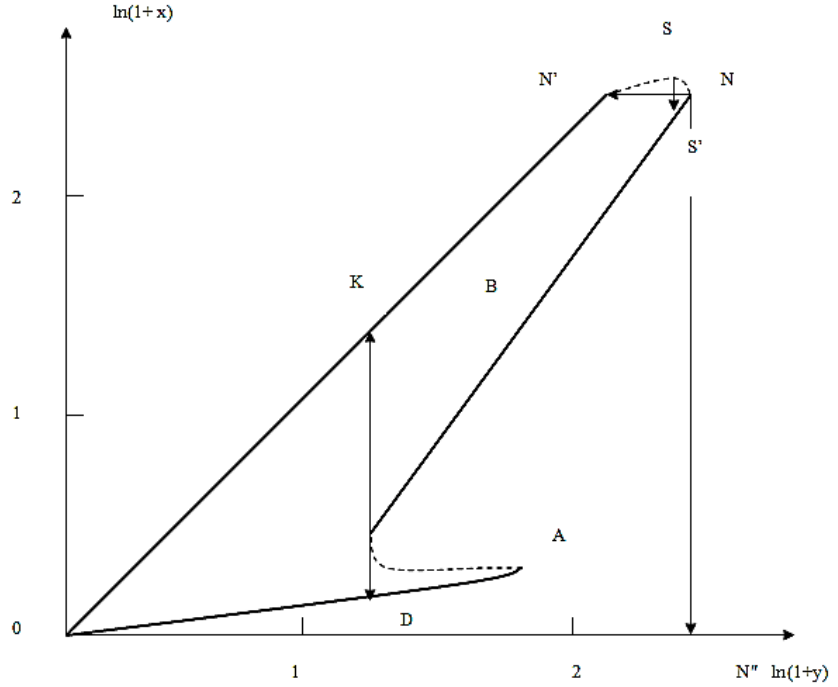


Рисунок 3.3 – Біфуркаційна діаграма при однофотонному збудженні статичним полем: $C_0=20$, $\sigma=0$, $k=1$

Необхідно відмітити достатньо високу швидкодію пристроїв – оцінювання часу біфуркаційних переходів дає величину порядка $0{,}5\times10^{-9}$ с, та їх високу радіаційну стійкість, порівняно із напівпровідниковими приладами.

Зауважимо також, що оптичні нелінійні пристрої, основані на фізичних процесах, пов'язаних із властивостями оптичних електронів, набагато менше чутливі до електромагнітного

імпульсу, який виникає при ядерному вибуху, який призводить до виводу із ладу на довгий час сучасної напівпровідникової апаратури.

Отже, у результаті моделювання встановлено зв'язок розподілу амплітуд поля резонатора зі стійкими режимами поглинання слабкого та сильного полів. Виявлено ефекти мультистабільності, пов'язані зі стохастичним збудженням резонатора.

Запропоновано пристрої оптичної логіки, основані на ефектах мільтистабільності у випадковому полі.

4

ВЕУ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНИЙ НАПРЯМ ПОБУДОВИ ВІТРОЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ СИСТЕМ

Вітроенергетична установка являє собою послідовний тракт перетворення енергії, що включає в себе такі елементи: вітротурбіну, механічну передачу, електричний генератор та електрообладнання, що забезпечує заданий режим роботи генератора і відповідні параметри електричної енергії на виході вітроелектрогенеруючої системи.

Перша ланка тракту – вітротурбіна перетворює кінетичну енергію повітряного потоку, що набігає в механічну енергію на її валу. Цей процес пов'язаний із необхідністю управління режимом роботи вітротурбіни [69]. Для його пояснення розглянемо типову механічну характеристику вітротурбіни, що зображена на рис. 4.1.

Кожній робочій точці характеристики відповідає певне значення потужності на валу вітротурбіни, яке дорівнює перемноженню кутової швидкості та обертового моменту на валу

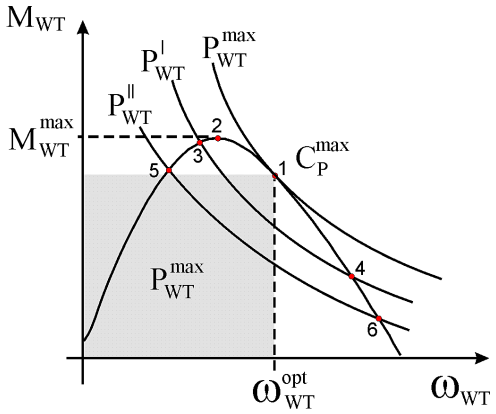


Рисунок 4.1 – Типова механічна характеристика вітротурбіни

вітротурбіни і якому на графіку характеристики відповідає площа прямокутника, що побудований до певної робочої точки (наприклад, затемнений прямокутник для точки 1 на рис. 4.1).

Є тільки одна робоча точка з максимальною потужністю – точка 1 («$C_P^{\max}$»). Вона має прямокутник найбільшої площі та є точкою перетину характеристики вітротурбіни з гіперболою максимальної потужності «$P_{WT}^{\max}$». Будь-яку іншу точку характеристики буде перетинати гіпербола потужності з меншим значенням (наприклад, точки 3, 4, 5, 6 на рис. 4.1, при $P_{WT}^{'} < P_{WT}^{''} < P_{WT}^{\max}$). Треба зазначити, що точка, яка відповідає максимальному обертовому моменту на валу вітротурбіни (точка 2 на рис. 4.1) не є точкою максимального відбору потужності.

Точці «$C_P^{\max}$» відповідає певне значення кутової швидкості ω_{opt}. Тобто для максимального відбору потужності вітрового потоку, при фіксованій механічній характеристиці, кутова швидкість обертання вітротурбіни має дорівнювати ω_{WT}^{opt}.

Вид механічної характеристики вітротурбіни змінюється під впливом значення швидкості вітрового потоку V_b. На рис. 4.2 зображено сімейство механічних характеристик при різних швидкостях вітрового потоку. Зі збільшенням V_b характеристика проходить вище.

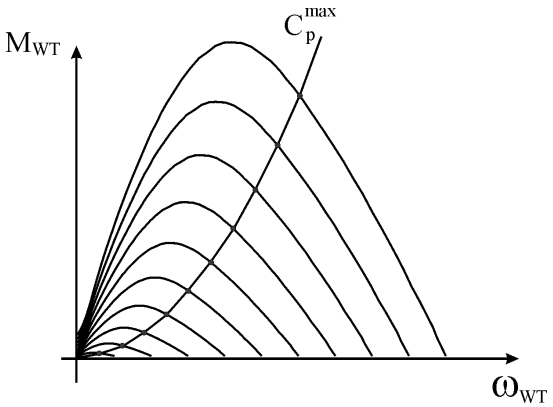


Рисунок 4.2 – Типове сімейство механічних характеристик вітротурбіни з фіксованим кутом встановлення лопаті при різних значеннях швидкості вітрового потоку

Як видно з рис. 4.2 при зміні V_b змінюється і кутова швидкість ω_{WT}^{opt}. Оптимальні робочі точки характеристик утворюють лінію «$C_P^{\max}$». Для отримання максимальної потужності на валу вітротурбіни, при швидкості V_b, що змінюється, потрібно здійснювати управління кутовою швидкістю вітротурбіни відповідно до значення швидкості вітрового потоку: $\omega_{WT}^{opt} = \omega_{WT}^{opt}(V_b)$.

Управління кутовою швидкістю вітротурбіни здійснюється через задавання моменту механічного навантаження на валу вітротурбіни. Момент навантаження для ВЕУ класичного типу може бути заданий різними способами:

– шляхом управління вихідним струмом генератора, значення якого визначає електромагнітний момент генератора, за допомогою напівпровідникового перетворювача;

– шляхом управління струмом у обмотці збудження синхронного генератора (цей спосіб не є доступним при застосуванні синхронних генераторів на постійних магнітах);

– шляхом зміни передавального числа механічної передачі (мультиплікатора);

– шляхом комутації обмоток генератора (цей спосіб потребує застосування електричної машини спеціальної конструкції та збільшує кількість провідних ліній від генератора).

Ця стратегія управління ВЕУ застосовується на перший робочій ділянці діаграми видобутку (ділянці оптимального відбору потужності від вітрового потоку та максимальній ефективності вітротурбіни), що показана на рис. 4.3 (див. с. 60).

Перша робоча ділянка припадає на інтервал між мінімальною $V_b^{\min}$ та номінальною V_b^{nom} швидкістю вітрового потоку. При швидкостях вітрового потоку $V_b < V_b^{\min}$ використання ВЕУ недоцільно з причини малої потужності потоку.

Треба зазначити, що є й інші стратегії задавання режиму роботи вітротурбіни на першій ділянці (наприклад, з фіксацією кутової швидкості шляхом зміни кута встановлення лопатей вітротурбіни). Але вони мають меншу ефективність, з погляду видобутку електроенергії, і в цьому огляді не розглядаються.

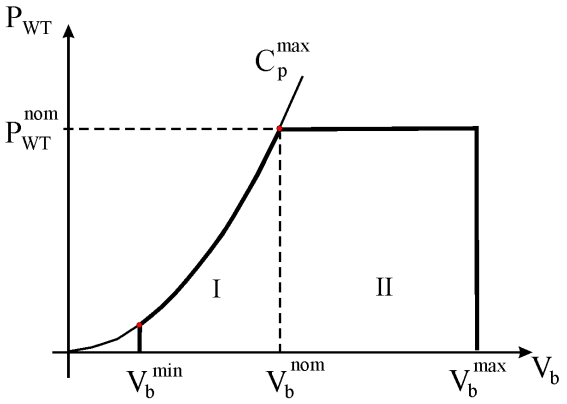


Рисунок 4.3 – Типова діаграма видобутку ВЕУ

При швидкостях вітрового потоку вищих за номінальне значення стратегія управління відповідає другій робочій ділянці (ділянці обмеження потужності, що відбирається від вітрового потоку). Вона знаходиться між номінальним V_b^{nom} та максимальним $V_b^{\max}$ значенням швидкості вітрового потоку. При швидкостях $V_b^{\max} < V_b$ використання ВЕУ неможливо з причини великих механічних навантажень на елементи конструкції ВЕУ при великих швидкостях вітру. ВЕУ, у цьому випадку, зупиняється і переводиться у флюгерний режим.

Є декілька способів здійснення обмеження потужності вітротурбіни. Фактично всі вони спрямовані на зниження ефективності вітротурбіни на ділянці обмеження потужності.

Найбільш розповсюдженим способом забезпечення другого робочого режиму є аеродинамічний. Він здійснюється шляхом зміни механічних характеристик вітротурбіни за допомогою повороту лопатей вітротурбіни.

Однак продовж останніх років у вітроенергетиці поширився напрям, відповідно до якого обмеження потужності відбувається при жорсткій конструкції вітротурбіни тільки за рахунок задавання обертового моменту механічного навантаження (моментне управління).

Для здійснення цього режиму застосовуються робочі точки (рис. 4.1), що знаходяться на ділянці механічної характеристики зліва від ω_{WT}^{opt}. Відповідно до діаграми видобутку на другій робочій ділянці, усі вони мають координати, що відповідають гіперболі номінальної потужності.

Застосування моментного управління для забезпечення режиму обмеження потужності має деякі особливості стосовно діаграми видобутку (рис. 4.4). Зокрема, у силу геометричних особливостей механічної характеристики вітротурбіни, перехід від першого до другого робочого режиму має здійснюватися через невелику перехідну ділянку (ділянка I–II на рис. 4.4).

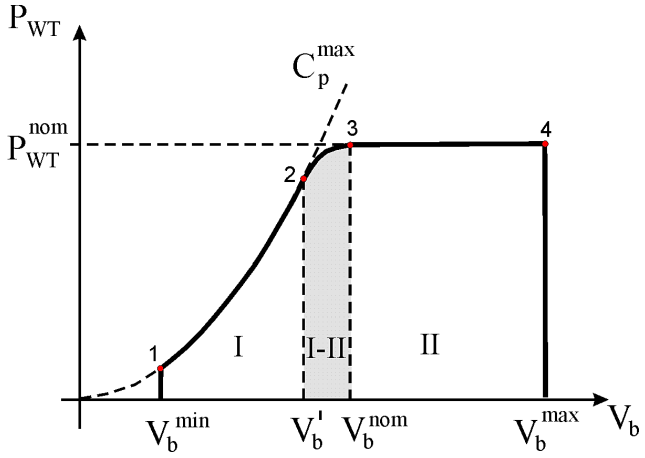


**Рисунок 4.4 – Діаграма видобутку ВЕУ
без аеродинамічного обмеження потужності вітротурбіни**

Робочі точки, що відповідають першій, другій та перехідній ділянці утворюють так звану статичну траєкторію управління в координатах механічної характеристики вітротурбіни, яка зображена на рис. 4.5 (див. с. 62). Точки переходу між ділянками позначені відповідними номерами на діаграмі видобутку (рис. 4.4) та на статичній траєкторії управління (рис. 4.5). Перехідна ділянка знаходиться в інтервалі «2–3».

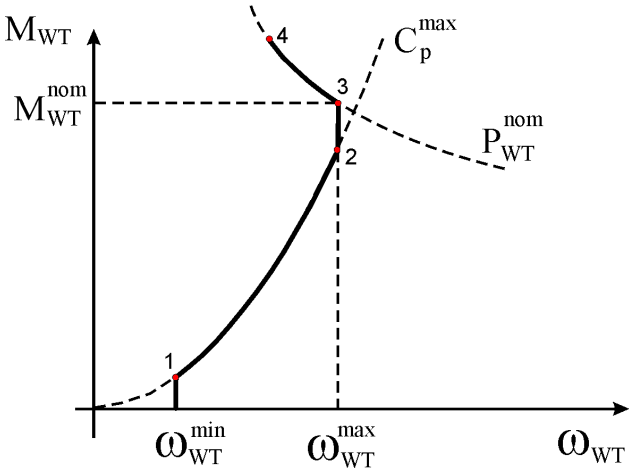


Рисунок 4.5. – Статична траєкторія управління ВЕУ без аеродинамічного обмеження потужності вітротурбіни

Розглянута вище статична траєкторія управління найбільш точно відтворює типову діаграму видобутку. Бувають інші типи статичних траєкторій управління [58; 61; 65; 66; 74]. У роботі [58] наведено порівняльний аналіз найбільш розповсюджених із них. Для здійснення режиму управління відповідно до статичної траєкторії управління на теперішній час використовуються різноманітні схеми побудови електрообладнання ВЕУ.

На рис. 4.6 зображена схема електромеханічної системи ВЕУ з перетворювачем частоти на базі некерованого мостового

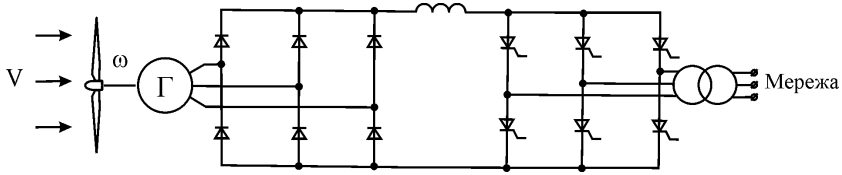


Рисунок 4.6 – Схема електромеханічної системи ВЕУ з перетворювачем частоти на базі некерованого мостового трифазного випрямляча та трифазного тиристорного мостового інвертора

трифазного випрямляча та трифазного тиристорного мостового інвертора.

Задавання струму і, відповідно, обертового моменту генератора здійснюється за допомогою управління вхідною напругою інвертора шляхом зміни його кута випередження. Перевагою цієї схеми є її простота та відносно низька вартість. Однак її суттєвим недоліком є достатньо низький коефіцієнт потужності, пов'язаний із необхідністю використовувати великі значення кута випередження інвертора при регулюванні вхідної напруги інвертора. Великі значення кута випередження припадають на малі значення кутової швидкості генератора, які, в свою чергу, відповідають малим швидкостям вітру.

Наступна схема електромеханічної системи ВЕУ (рис. 4.7) дозволяє позбавитися цього недоліку шляхом включення в ланку постійної напруги імпульсного перетворювача постійної напруги підвищуючого типу. У цьому випадку управління струмом генератору відбувається за рахунок зміни коефіцієнта заповнення відкритого стану транзистора імпульсного перетворювача постійної напруги. У цій схемі тиристорний інвертор має мінімальний кут випередження, і, відповідно, максимальний коефіцієнт потужності на виході.

Загальним недоліком розглянутих вище схем є наявність верхніх гармонік у формі вихідного струму внаслідок застосування тиристорного інвертора.

Наступна схема (рис. 4.8, див. с. 64) дозволяє отримати синусоїдальну форму вихідного струму за рахунок використання трифазного мостового інвертора напруги.

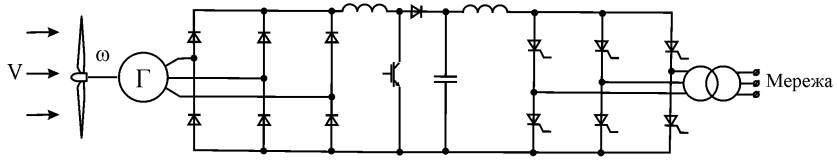


Рисунок 4.7 – Схема електромеханічної системи ВЕУ з перетворювачем частоти на базі некерованого мостового трифазного випрямляча, імпульсного перетворювача постійної напруги та трифазного тиристорного мостового інвертора

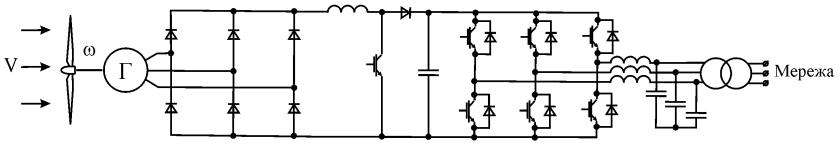


Рисунок 4.8 – Схема електромеханічної системи ВЕУ з перетворювачем частоти на базі некерованого мостового трифазного випрямляча, імпульсного перетворювача постійної напруги та трифазного мостового інвертора напруги

Застосування ШІМ-модуляції, потребує застосування фільтрів на виході інвертора.

Достатньо високі енергетичні показники має схема, що зображена на рис. 4.9. Її перевагою є можливість отримувати синусоїдальну форму вхідного струму, що зменшує втрати в генераторі. Крім того в цій схемі вже не потрібно використовувати імпульсний перетворювач постійної напруги з метою задавання струму генератора. Управління режимом його роботи відбувається за допомогою керованого трифазного випрямляча.

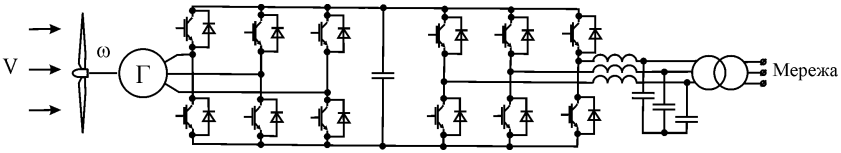


Рисунок 4.9 – Схема електромеханічної системи ВЕУ з перетворювачем частоти на базі керованого мостового трифазного випрямляча та трифазного мостового інвертора напруги

Використання в якості генератора асинхронної машини з фазним ротором дозволяє скоротити, майже вдвічі, встановлену потужність перетворювача частоти за рахунок того, що перетворенню, з метою управління, підлягає тільки частина потужності, а саме потужність ковзання. Найпростішою схемою, з використанням асинхронного генератору з фазним ротором, є схема на базі асинхронного вентильного каскаду, що зображена на рис. 4.10 (див. с. 65).

Особливістю використання некерованого випрямляча в колі ротору генератора є обмеження діапазону управління кутовою швидкістю. Режим генерування в цій схемі можливий лише при швидкості обертання вище за синхронну швидкість.

Основним недоліком цієї схеми, як і в схемі на рис. 4.6, є низький коефіцієнт потужності, що з'являється внаслідок збільшення кута випередження тиристорного інвертору.

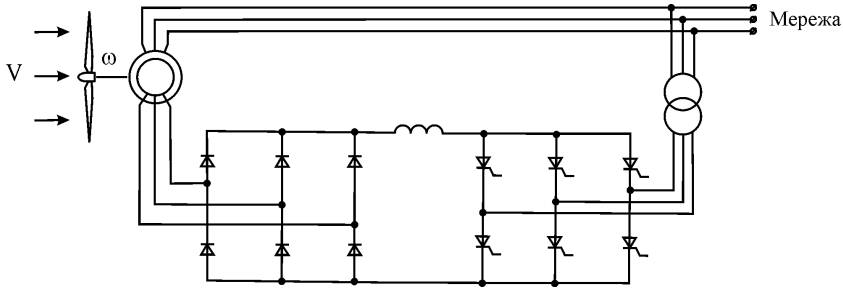


Рисунок 4.10 – Схема електромеханічної системи ВЕУ на базі асинхронного вентильного каскаду

Як і в схемі, зображеній на рис. 4.7, позбутися цього недоліку дозволяє застосування імпульсного перетворювача постійної напруги в ланці постійного струму роторного перетворювача частоти (рис. 4.11).

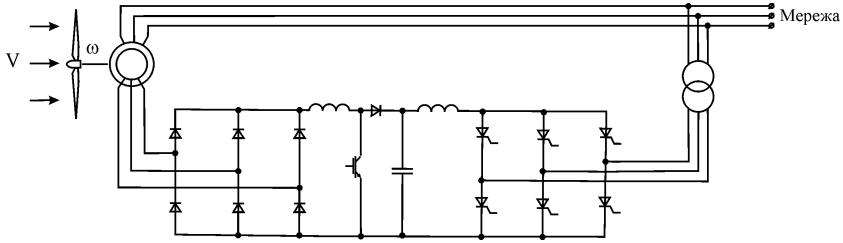


Рисунок 4.11 – Схема електромеханічної системи ВЕУ на базі асинхронного вентильного каскаду з імпульсним перетворювачем постійної напруги в ланці постійного струму

Застосування трифазного інвертора напруги в схемі, що зображена на рис. 4.12, дає змогу поліпшити гармонійний склад вихідного струму схеми.

Застосування схеми, що зображена на рис. 4.13 [68; 72; 73] дозволяє не тільки забезпечити синусоїдальну форму вихідного струму, а й розширити, за необхідністю, робочий діапазон кутових швидкостей генератора. Застосування повністю керованого мосту, у колі ротору генератора, дозволяє використовувати як надсинхронний, так і підсинхронний режим асинхронної електричної машини з фазним ротором.

На думку автора роботи [59], на теперішній час схеми на базі машин подвійного живлення уходять у минуле. Усе більше

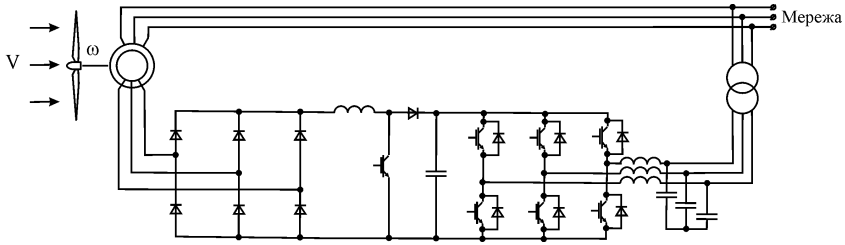


Рисунок 4.12 – Схема електромеханічної системи ВЕУ на базі асинхронного вентильного каскаду з імпульсним перетворювачем постійної напруги в ланці постійного струму та трифазним мостовим інвертором напруги

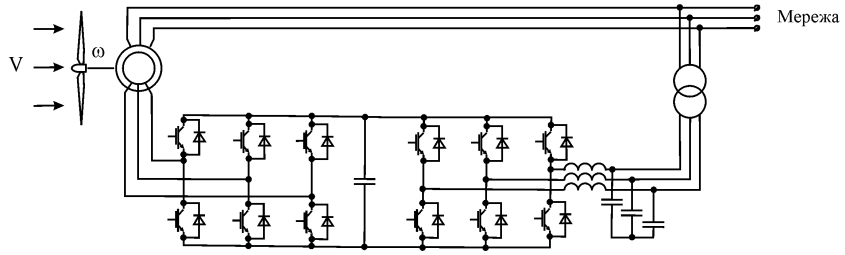


Рисунок 4.13 – Схема електромеханічної системи ВЕУ з перетворювачем частоти в роторному колі асинхронного генератора з фазним ротором на базі керованого трифазного випрямляча та трифазного мостового інвертора напруги

сучасних виробників ВЕУ дають перевагу схемам на повну встановлену потужність перетворювача частоти.

Але в багатьох сучасних публікаціях схеми електромеханічних систем ВЕУ на базі машин подвійного живлення розглядаються як перспективні [60; 62; 63; 64; 67; 68; 71; 72; 73; 75; 75].

Перспективним напрямом побудови перетворювача частоти є застосування багаторівневих схем перетворення. У роботі [70] розглядається схема перетворювача частоти на базі трифазного трирівневого випрямляча та трифазного трирівневого інвертора (рис. 4.14). До переваг цієї схеми треба віднести більший коефіцієнт корисної дії та зменшений клас напруги транзисторів. Крім того ця схема має покращений гармонійний склад, що дозволяє зменшити фільтри.

У роботі [59] вказується, що найбільш популярними силовими ключами для побудови електрообладнання вітроенергетичних установок великої потужності є IGBT транзистори 12–17 класу.

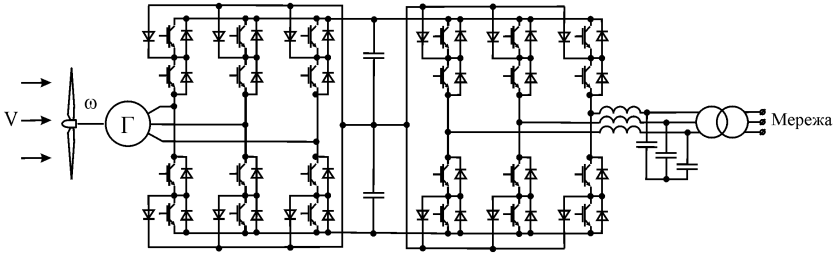


Рисунок 4.14 – Схема електромеханічної системи ВЕУ з перетворювачем частоти на базі трифазного трирівневого випрямляча та трифазного трирівневого інвертора

Для ВЕУ мегаватного класу потрібне застосування з'єднання окремих силових модулів. Прикладом реалізації такого підходу є схема зображена на рис. 4.15. Залежно від швидкості обертання генератора та, відповідно, величини напруги в ланці постійного струму, окремі ланки схеми закорочуються відповідним транзистором.

Однією з ланок енергетичного тракту є мультиплікатор. Його основною функцією є узгодження параметрів потоку механічної

енергії, що передається від вітротурбіни до генератора. З погляду забезпечення вимог механічної міцності та граничних значень швидкості повітряного потоку, що обдуває лопаті, вітротурбіна повинна мати відносно невелику кутову швидкість обертання. Особливо це стосується ВЕУ великої потужності, які мають великі розміри. Наприклад, кінці лопатей вітротурбіни мегаватного класу діаметром 60 м досягають лінійної швидкості звуку вже при кутовій швидкості ω=11 рад/с.

І напроти, з погляду зниження маси та габаритів, генератор повинен мати велику кутову швидкість. Узгодження малої та великої кутової швидкості виконує мультиплікатор.

Але застосування мультиплікатора має свої недоліки:

– втрати енергії в механічній передачі;
– необхідність у додатковому технічному обслуговуванні;
– низький, у порівнянні з іншими елементами ВЕУ, строк експлуатації;
– наявність шуму при роботі.

Для подолання цих недоліків деякі фірми-виробники ВЕУ почали використовувати тихохідні генератори з безпосереднім механічним зв'язком із вітротурбіною. Наприклад, концерн ENERCON (Німеччина) випускає лінійку ВЕУ мегаватного класу з кільцевим тихохідним генератором, що має безпосереднє

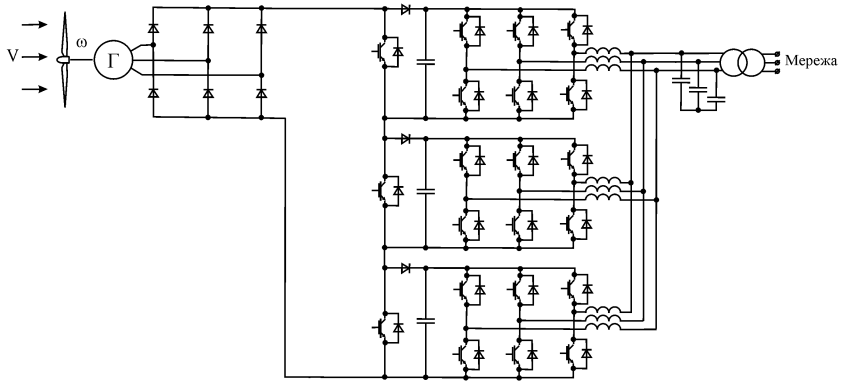


Рисунок 4.15 – Схема електромеханічної системи ВЕУ з послідовним з'єднанням низьконапругових ланок

з'єднання з валом вітротурбіни. Природно, недоліком цього класу ВЕУ є велика матеріалоємність та маса генератора. Причому, треба зазначити, що збільшення маси генератора призводить до додаткового збільшення матеріалоємності всієї ВЕУ за рахунок збільшення навантаження на несучі конструкції.

Одним з альтернативних шляхів подолання технічного протиріччя між прагненням позбутися мультиплікатора та прагненням підвищити масогабаритні показники генератора є застосування концепції аеродинамічного мультиплікування.

5

СИНТЕЗ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРАКТУ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОЗОНУ

5.1. Аналіз методів вимірювання концентрації озону

Методи вимірювання озону у воді можна класифікувати як специфічні або неспецифічні для озону. Специфічними методами розчиненого озону є: метод поглинання ультрафіолетових променів, метод індиго, амперметрично-мембранний метод, метод десорбції та виявлення газової фази. Неспецифічними методами розчиненого озону є метод йодистого калію та простий амперметричний метод. Абсолютні методи вимірювання концентрації озону засновані на зміні об'єму, що супроводжує реакцію розкладання озону:

$$2O_3 \rightarrow 3O_2.$$

Манометричний метод засновано на зміні тиску при фіксованому обсязі. Але, усі ці методи мають велику трудомісткість та невисоку точність при вимірюванні низьких концентрацій.

5.1.1. Вимірювання концентрації озону на основі поглинання ультрафіолетового випромінювання

Метод поглинання ультрафіолетового (УФ) випромінювання було розроблено головно для вимірювання концентрації озону в повітрі, але він застосовується і до розчиненого озону у воді, позаяк УФ-випромінювання на довжині хвилі 254 нм поглинається лише озоном; повітря, вода або кисень є «прозорими» для цього випромінювання. Основним рівнянням, що полягає в основі методу є [77]:

$$n_0 = \frac{10^6 T}{27з Pkl} \log \frac{I_0}{I},$$

де T – абсолютна температура, *К*, P – тиск, Па, k – коефіцієнт зменшення концентрації озону, I_0 – інтенсивність випромінювання

від джерела освітлення, I – інтенсивність випромінювання, що пройшло крізь вимірювальне середовище, l – довжина шляху випромінювання у вимірювальному середовищі, см.

Структуру пристрою для вимірювання концентрації озону у воді показано на рис. 5.1.

У наведеному пристрої у якості джерела УФ-випромінювання використовується ртутна лампа низького тиску, у якій приблизно 80 % інтенсивності відповідають довжині хвилі 253,7 нм, що співпадає з максимумом смуги поглинання Хартлі [78]. Такі пристрої мають досить високі показники із чутливості і швидкодії. Також можливо застосування і інших джерел УФ-випромінювання. Відомі [79] вимірювачі засновані на оптоакустичному методі при поглинанні четвертої Nd: YAG лазера на довжині хвилі 266 нм. В останній час активно використовують широкосмугові джерела світлі, такі як ксенонові лампи і світлодіоди. Так, наприклад, за допомогою

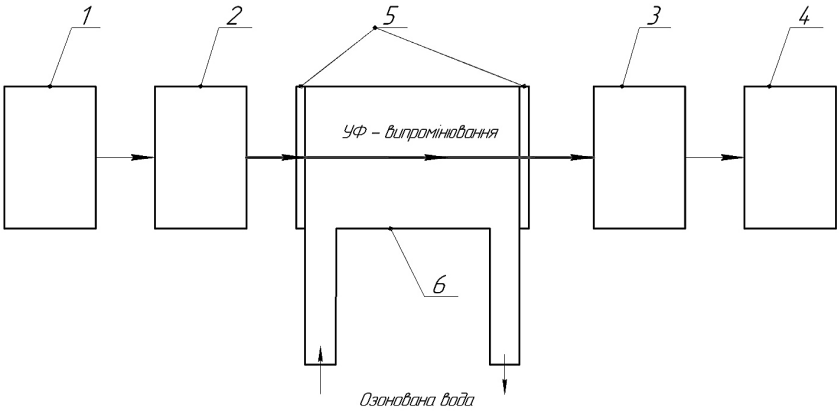


Рисунок 5.1 – Схема вимірювання концентрації озону на основі однопроменевого поглинання ультрафіолетового випромінювання:

1 – джерело УФ-випромінювання; 2 – монохроматор (фільтр) на довжину хвилі 254 нм; 3 – детектор (приймач) випромінювання; 4 – блок обробки результатів вимірювань; 5 – кварцові вікна; 6 – вимірювальний обсяг (завдовжки приблизно 1 м)

ксенонових ламп із потужністю 75 Вт і зовнішнього резонатору з коефіцієнтами відбивання дзеркал 99,8 %, виконувалися вимірювання перетинів поглинання газів, у тому числі й озону, у смузі довжин хвиль 333–375 нм.

Водночас є й інші різновиди пристроїв із подвійним або роздільними променями. Поправки на температуру та тиск всередині камери для зразків необхідні для вимірювання в повітрі; щодо води цими виправленнями можна знехтувати. Метод поглинання УФ-випромінювання чутливий до бульбашок у воді або інших домішок. Тому зразок треба відфільтрувати та захистити від дегазації перед проведенням процедури вимірювання.

5.1.2. Колориметричний метод

У 1953 р. було запропоновано перший колориметричний реєстратор окислювачів. Фотометричне визначення речовин (іонів) у розчинах складається з двох етапів:

1) проведення колориметричної хімічної реакції, мета якої – переведення досліджуваного компоненту в забарвлену речовину, що поглинає електромагнітне випромінювання певної довжини хвилі. Для цього до розчину компоненту, який визначають, додають певний реагент, що утворює з компонентом забарвлену речовину (за хімічною природою, як правило, це або комплексна сполука, або продукт окислювально-відновної реакції);

2) вимірювання інтенсивності поглинання електромагнітного випромінювання (світлопоглинання) забарвленим розчином.

Вимірювання світлопоглинання можна виконати різними методами:

а) колориметричний метод базується на візуальному порівнянні кольору (інтенсивності забарвлення) розчину, що досліджують, із кольором (інтенсивністю забарвлення) серії стандартних розчинів із відомою концентрацією. При цьому забарвлений розчин поглинає суцільне випромінювання немонохроматичної видимої ділянки спектру;

б) спектрофотометричний метод базується на вимірюванні інтенсивності монохроматичного світла в УФ-, видимому чи ІЧ-діапазонах спектру;

в) фотоелектроколориметричний метод базується на вимірюванні інтенсивності світлопоглинання забарвленим розчином видимої частини спектру за допомогою приладів зі спрощеним способом монохроматизації – фотоелектроколориметри (ФЕК, ЛМФ).

У 1978 р. розроблено метод «індиго». Барвник «індиго» використовувався при цьому, оскільки швидкість реакції озону з подвійним зв'язком індиго відрізняється простотою та відсутністю перешкод. Знебарвлення тригонсульфонату індиго (TCI) під впливом озону спричиняє лінійне падіння абсорбції зі збільшенням концентрації озону. Метод «індиго» рекомендується застосовувати в тому разі, коли метод поглинання УФ-випромінювання неможливо реалізувати або у випадку вимірювання концентрацій озону менш ніж 10^{-7} %. Основним недоліком методу «індиго» є неможливість здійснення вимірювань у динамічному середовищі. Рівняння, що застосовується для розрахунку концентрації озону, має такий вигляд [80]:

$$n_0 = \frac{100A}{fbV},$$

де A – різниця в поглинанні випромінювання пробою робочої рідини й чистою пробою, b – довжина проходження випромінювання в кюветі з рідиною, см, V – обсяг реагенту, що додано до кювети (зазвичай – 90 мл), f – емпіричний коефіцієнт.

При проведенні колориметричних вимірів потрібно дотримуватися певних умов і застережень:

– кювети мають бути чистими, зовнішні стінки сухими;

– до робочої поверхні кювети (нижче рівня розчину) не можна доторкатися пальцями; перед заповненням кювети обов'язково прополіскують розчином, що досліджують;

– кювети заповнюють до такого рівня, щоб увесь потік випромінювання проходив крізь шар розчину;

– кювети встановлюють у кюветну камеру завжди однаковим способом – щоб уникнути помилок, пов'язаних із розсіюванням і віддзеркаленням світла;

– вимірювання виконують тільки при щільно закритій кришці кюветної камери;

– товщину кювети вибирають так, щоб значення оптичної густини, яку вимірюють, вкладалося в оптимальний інтервал 0,1–1,0. Збільшення товщини кювети відповідно призводить до зростання чутливості визначення. Однак, кювети повинні мати товщину не більшу за 5 см, бо зі зростанням товщини збільшуються втрати світла на розсіювання.

5.1.3. Амперметричні методи

У прямій амперметрії вимірюється або питома електропровідність, або електричний опір досліджуваного води. Це здійснюється в спеціальних амперметричних комірках, головним елементом якої є два платинові електроди. Вимірювання опору виконують компенсаційним методом – методом компенсації невідомої величини опору досліджуваного розчину опором, що виставляють на магазині опорів. Вимірювання проводять із використанням змінного струму низької частоти (50–105 Гц), що дає змогу уникнути поляризації електродів при вимірах. Пряма амперметрія має обмежене застосування в аналізі через те, що навіть мізерний вміст домішок змінює аналітичний сигнал, який реєструється, тому що електрична провідність розчину є адитивною величиною і визначається наявністю всіх іонів у розчині.

Прості амперметричні датчики засновані на використанні озонованої води у якості електроліту [81]. Окислювачі, присутні у воді, відновлюються на катоді, і згенерований струм лінійно залежить від концентрації всіх окисників, що знаходяться у воді. Такі датчики вимагають видалення всіх окисників, окрім озону, або ж коригування за вмістом інших оксидантів, крім озону.

Ці недоліки можна уникнути за допомогою озоноселективної мембрани, що знаходиться під дією струму озонованої води. У результаті озон разом із водою дифундує через мембрану, а інші окисники затримуються. При цьому швидкість дифузії лінійно пропорційна концентрації озону у воді (рис. 5.2, див. с. 75).

Отже, датчики озону мембранного типу – це амперметричні або полярографічні електрохімічні комірки, які перетворюють вимірювання в концентрації озону у воді на вимірювання

в повітрі. Простір датчиків необхідно періодично заповнювати повітрям, а озоновмісне повітря після вимірювання видаляти. Метод випаровування води та метод газової фази схожі на датчики мембранного типу, але процес видалення озону з води може бути реалізований або барботуванням інертним газом, таким як азот (або повітрям), через пробу води, або інтенсивним струшуванням кювети з пробою води для отримання розчиненого газу турбулентним потоком.

Тонкоплівкові напівпровідникові датчики, з поверхневим шаром оксиду металу, що нагрівається (НМОС), використовують зміну питомого опору на кордонах зерен, озоном, що виділяється з води та адсорбується на поверхні напівпровідника, для визначення концентрації озону [82].

В основі роботи НМОС лежить явище адсорбції газів поверхнею напівпровідника, що зумовлюється наявністю нескомпенсованого силового поля, яке знаходиться на межі поділу «газ – тверде тіло». Адсорбція завжди супроводжується

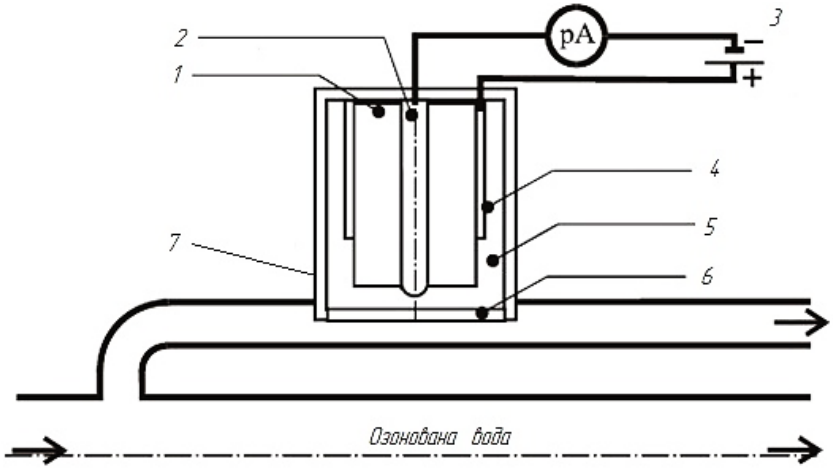


Рисунок 5.2 – Схема вимірювання концентрації озону амперметричним методом:

1 – ізолятор; 2 – катод (електрод із золота); 3 – поляризаційне джерело; 4 – анод (електрод зі срібла); 5 – електроліт; 6 – озоночутлива мембрана; 7 – полімерний корпус

зменшенням вільної енергії, тобто є екзотермічним процесом. У міру встановлення рівноваги між поверхнею і газовою фазою адсорбція зменшується.

У загальному вигляді процес взаємодії газу з поверхнею напівпровідника складається з таких стадій:

– фізична адсорбція, яка залежить від сил електростатичного походження. При цьому енергія зв'язку адсорбованої молекули газу з поверхнею напівпровідникового матеріалу становить 0,01–0,1 еВ;

– хімічна адсорбція, що зумовлюється ковалентними силами, які приводять до хімічного з'єднання молекули газу з твердим тілом. Енергія зв'язку при цьому досягає декількох електронвольт.

Теоретичним засадами процесу випарювання є закон Генрі, за яким концентрація газу, розчиненого у воді, лінійно пропорційна парціальному тиску цього газу в повітрі над поверхнею води:

$$p = H \times c,$$

де p – концентрація озону в повітрі, c – концентрація озону в рідині, p і c мають однакову розмірність, H – константа Генрі, що відповідає температурі 20 °С.

Закон Генрі відповідає рівноважному стану, але на практиці ця умова не виконується. Тому процес осадження озону на поверхні плівки датчика не строго узгоджується із законом Генрі, що, у свою чергу, впливає на точність цього методу. Крім того, більш високі значення тиску збільшують розчинність озону, що також впливає на похибку вимірювань за таким методом.

Як чутливий елемент у напівпровідникових газових сенсорах найширше застосування знайшли напівпровідникові оксиди металів – цинку, олова, титану, цирконію, кобальту. В області робочих температур до 900 К електропровідність оксидів визначається домішковими атомами (як власними, так і чужорідними). Як правило, оксиди металів нестехіометричні, тому дефекти їхньої структури є центрами адсорбції газу. Цим і пояснюється активність оксидів і їхня вибірковість до певних газів. Якщо оксиди мають

у своєму складі катіони металів із недобудованими d-оболонками, то вони характеризуються підвищеною вибірковою здатністю. До таких матеріалів належать оксиди перехідних металів.

У результаті вивчення фізичних процесів, що відбуваються на поверхні та в об'ємі напівпровідника під час адсорбції на ньому газів, було виділено декілька вихідних інформативних параметрів, що змінюються в процесі адсорбції несуть як якісну, так і кількісну інформацію про предмет вимірювання у вхідному параметрі. Наразі найбільш поширеними є чутливі елементи резистивного типу, для яких вихідний інформативний параметр – зміна поверхневої та об'ємної провідності.

Найпростіший чутливий НМОС елемент виконаний у вигляді плівки напівпровідника (найчастіше металооксидного) з двома контактними площадками і двома металевими електродами, розміщеними на діелектричній підкладці (рис. 5.3). За необхідності на підкладці розташовують тонкоплівковий нагрівач.

На НМОС датчика впливає робоча температура: з підвищенням температури зростає інтенсивність поверхневих реакцій

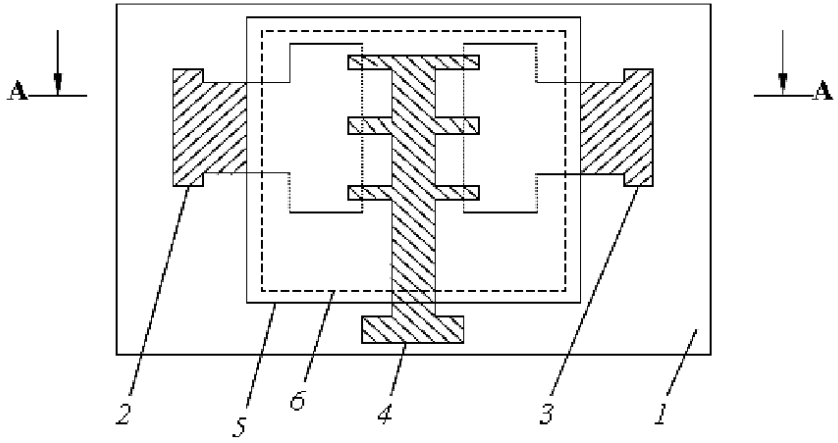


Рисунок 5.3 – Тонкоплівковий датчик для детектування складової газового або рідкого середовища:

1 – підкладка; 2, 3 – вимірювальні електроди; 4 – допоміжний електрод; 5 – діелектрична плівка; 6 – напівпровідникова плівка

і, відповідно, чутливість. Збільшення чутливості з підвищенням температури досягає насичення в області 300 °С. Робочі температури цих сенсорів залежать від складу домішок доданого в плівку двоокису олова й конструкції та варіюються від 100 до 400 °С [82].

5.1.4. Порівняльна характеристика методів вимірювання концентрації озону

Електрохімічні або НМОС-датчики можуть бути відкалібровані, як за допомогою «індиго»-методу, так і за допомогою методу поглинання УФ-випромінювання [6]. Але весь діапазон вимірювальних концентрацій озону охоплюється лише методом поглинання УФ-випромінювання. Також датчики можливо калібрувати за допомогою спектрофотометрів або УФ-аналізаторів поглинання випромінювання, При цьому ці прилади мають бути відкалібровані за допомогою еталонних розчинів або хімічних методів, таких як титрування газової фази або йодометрія, які є громіздкими й потребують дуже досвідченого персоналу.

Для тестування наявності чутливості до озону датчиків («тест на придатність»), використовуються портативні озонатори. Для визначення низьких концентрацій озону, розчиненого у воді, використовуються одиниці ppmw (10^{-6} % за вагою) – частки на мільйон ваги або ppbw (10^{-9} % за вагою) – частки на мільярд ваги. З іншого боку, низькі концентрації озону в повітрі подаються в одиницях ppmv (частка на мільйон об'ємних об'ємів) або одиницях ppbv (частка на мільярд об'ємних об'ємів). У багатьох випадках використовується абревіатури ppm або ppb, що може викликати неоднозначність, особливо, коли використовуються датчики мембранного або газового типів. Оскільки концентрація в повітрі залежить від температури та тиску, необхідно перевіряти перерахування відображувані результатів вимірювань, отриманих приладом, відповідно до стандартних умов.

Наразі існує тенденція до розширення діапазону вимірювань впродовж до нижчих меж визначення концентрацій озону. Це зумовлено сучасними санітарними стандартами, що вимагають зменшення припустимих концентрацій на робочих місцях,

а також необхідністю регулювання значень залишкового озону на виході з установки озонування.

Результати порівняльного аналізу методів визначення концентрації озону у воді наведено на рис. 5.4–5.6 (див. с. 79–80).

З рис. 5.4–5.6 слідує, що метод поглинання УФ-випромінювання та метод «індиго» забезпечують час реакції приблизно на порядок швидше, ніж амперометричні датчики для розчиненого або виділеного озону. Водночас сучасні тенденції розвитку інформаційно-вимірювальних систем потребують зменшення часу відгуку датчиків.

Отже, загальна тенденція до низьких рівнів припустимих концентрацій озону в повітрі або його залишків у воді вимагає проєктування нових вимірювачів або датчиків із діапазоном у кілька десятків ppbw. Для кращого контролю установок озонування необхідні датчики з високою швидкодією, що дозволяють швидко реагувати на зміни режимів експлуатації обладнання.

Крім того, для отримання кращих метрологічних характеристик датчиків озону треба використовувати динамічні методи вимірювань.

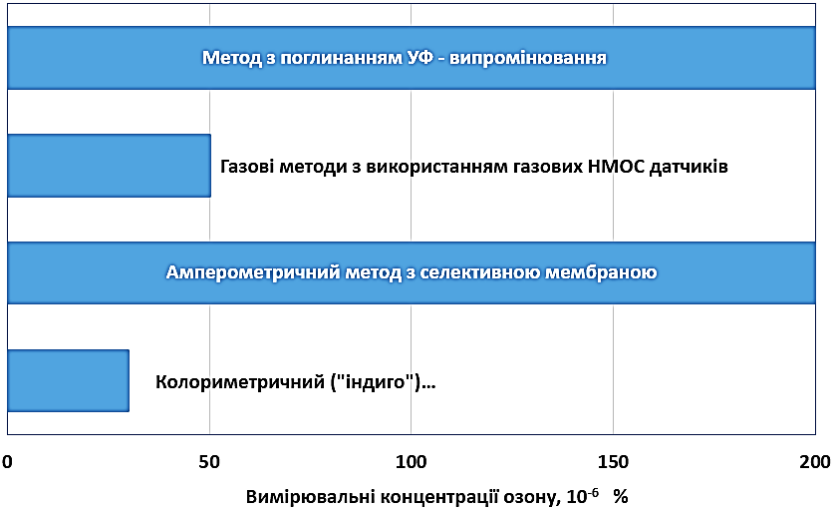


Рисунок 5.4 – Порівняльна характеристика методів за діапазоном визначення концентрації озону

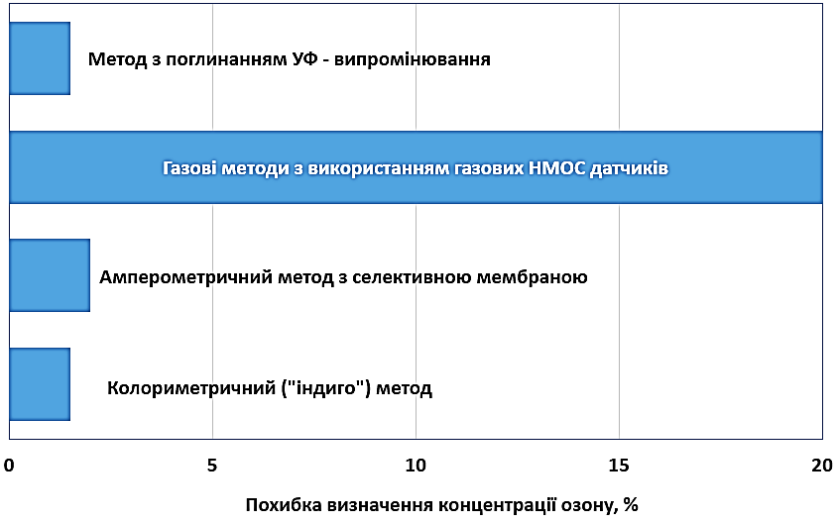


Рисунок 5.5 – Порівняльна характеристика методів за похибкою визначення концентрації озону

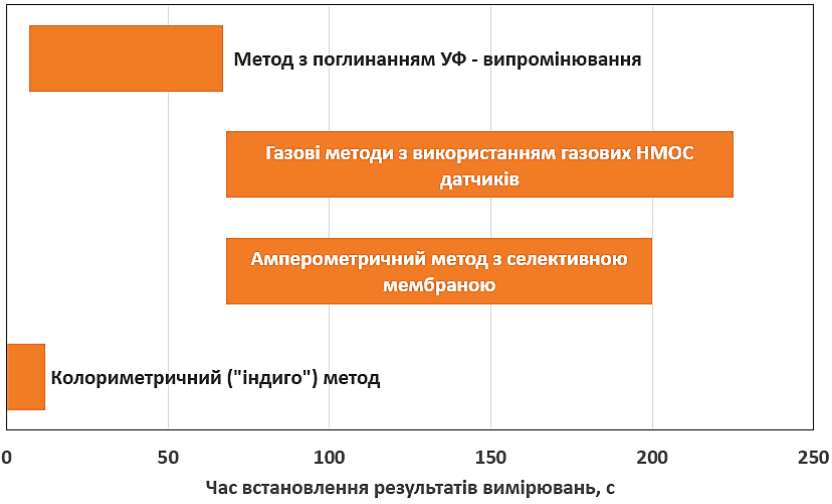


Рисунок 5.6 – Порівняльна характеристика методів визначення концентрації озону параметром швидкодії

Однією з основних задач, що вирішуються при побудові таких систем, є калібрування приладів для вимірювання концентрації розчиненого озону. За цією ознакою метод поглинання УФ-випромінювання є найбільш надійним у якості еталонного методу. Заразом проблемою є складання точних еталонних розчинів для перевірки УФ-аналізаторів. Такі ж скрутності характеризують і метод «індиго». Це відбувається тому, що не існує еталонних стандартів калібрувальних приладів для вимірювання розчиненого озону. Наразі здійснюються деякі спроби калібрування амперметричних датчиків озону мембранного типу за допомогою еталонних газових сумішей, що містять кисень. Це зумовлюється тим, що кисень не є таким нестійким, як озон, і його концентрація в повітрі добре відома. Однак вимірювання газоподібного озону за газовим еталоном не настільки надійні, як розчиненого озону, отриманого безпосередньо у воді.

Тому є потреба у точних, надійних і специфічних щодо озону методах прямого вимірювання та датчиках для вимірювання концентрації озону в озонованій воді.

5.2. Синтез візуально-блочної моделі оптичного каналу системи визначення концентрації озону

5.2.1. Структура датчика системи визначення концентрації озону

Аналіз структури й параметрів озонаторної станції показав раціональність реалізації вимірювача озону на основі адсорбційних методів поглинання УФ-випромінювання.

Метод визначення вмісту озону за поглинанням ультрафіолетового (УФ) випромінювання було розроблено для газоподібних середовищ. Нами пропонується конструкція датчика озону у воді, дія якого базується на таких же принципах [83]. Але на відміну від відомих варіантів реалізації, така схема містить джерело УФ-випромінювання у вигляді світлодіоду, перевагою якого в порівнянні з ртутними лампами є стабільність і монохроматичність випромінювання, а в порівнянні

з УФ-лазерами – собівартість і знижена потужність споживання. Структура розробленого датчика наведена на рис. 5.7.

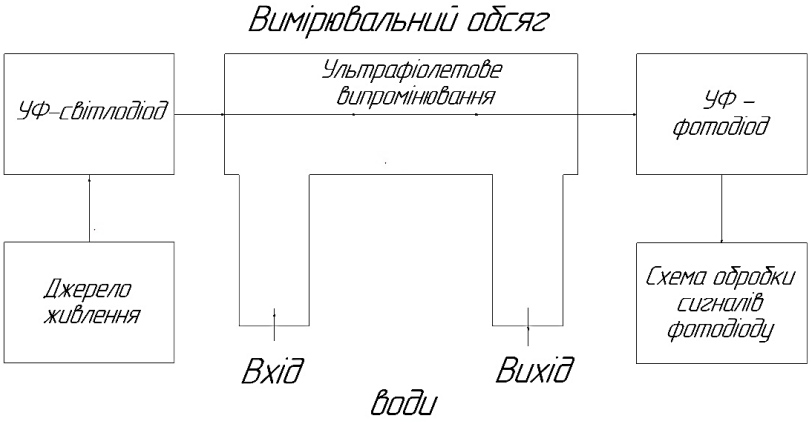


Рисунок 5.7 – Структура датчика озону

Загально відомими джерелами УФ-випромінювання є флуоресцентні лампи, лампи розжарювання, лазери та світлодіоди [8]. До основних параметрів таких випромінювачів належать діапазон довжин хвиль випромінювачів, стабільність параметрів випромінювання, вихідна оптична потужність та термін служби.

До джерел УФ-випромінювання, що використовуються в системах вимірювання концентрації озону висувають вимоги щодо високої стабільності і значної потужності довжини хвилі випромінювання. Світлова стабільність випромінювання зумовлюється короткочасними коливаннями і дрейфом його параметрів із розрахунку тривалого часу. Кількісною характеристикою стабільності світлового потоку є відношення зміни інтенсивності до середньої інтенсивності випромінювання. Оскільки вимірювання концентрації озону зазвичай здійснюється шляхом послідовного визначення поглинання випромінювання на робочих і еталонних зразках, що надходять до оптичного тракту датчика, тому бажано забезпечити оптичну стабільність протягом усього циклу роботи [84].

Термін експлуатації джерел випромінювання впливає на довгострокову стабільність і визначається моментом часу, коли світловий потік виходить за припустимі межі довжини хвиль. Із цієї точки зору, стислий термін роботи призводить до необхідності заміни джерела, що збільшує витрати на експлуатацію.

Дейтерієві лампи характеризуються більшою стабільністю, ніж інші УФ-лампи при високих значеннях світловіддачі [85]. Але вони мають великі розміри, необхідність у стабільному джерелі живлення і до 0,5 год підготовки до роботи шляхом поступового прогріву.

Ртутні лампи низького тиску мають максимум спектра випромінювання на довжині хвилі 254 нм [86]. Також є їх різновид у вигляді ксенонових ртутних ламп. Водночас таким джерелам притаманні великі значення споживаємої потужності, невисока стабільність параметрів випромінювання і вміст шкідливих речовин.

У порівнянні із зазначеними джерелами, світлодіоди є більш мініатюрними, споживають значно меншу потужність і собівартість. Результати порівняльного аналізу джерел УФ-випромінювання наведені в табл. 5.1 (див. с. 84).

Світлодіоди, у порівнянні з іншими джерелами УФ-випромінювання, мають невеликі розміри, низький рівень оптичного шуму, незначний дрейф інтенсивності випромінювання, низькі показники з генерації теплового потоку, незначну вартість і тривалий термін роботи [87]. До їх особливостей також можливо віднести здатність функціонувати в імпульсному режимі із частотою перемикання до 1 ГГц. Смуга випромінювання цих приладів є квазімонохроматичною зі смугою пропускання до 30 нм, що дає змогу будувати вимірювачі без наявності монохроматорів.

Конструктивне виконання світлодіодів передбачає варіанти для звичайного монтажу, так і для поверхневого монтажу. До того ж є можливість зміни верхньої кришки, що виконує функцію лінзи, на інший оптичний варіант, поєднуючи колімоване УФ-випромінювання з оптоволоконними лініями передачі.

Вартість реалізації вимірювача озону на основі УФ-світлодіоду становить приблизно 350 у. о., що в порівнянні з вартістю

пристрою з ртутною лампою (580 у. о.) є більш вигідним. Така економія обумовлюється тим, що у вимірювачі відсутні монохроматори (оптичні фільтри), засоби термостабілізації та зниженими витратами щодо експлуатації і обслуговування.

Таблиця 5.1 – Порівняльна характеристика джерел УФ-випромінювання для систем визначення концентрації озону

Параметри	Світлодіоди	Дейтерієві лампи	Ксенонові лампи	Ртутні лампи
Довжина хвилі випромінювання	Монохроматичне випромінювання	120–400 нм	160–2000 нм	185–2000 нм
Стабільність випромінювання	Дуже висока	Добра (>99,995 %)	Задовільна (>97 %)	Задовільна (>98 %)
Час підготовки до роботи	Не потребує	20–30 хв	Не потребує	1–15 хв
Термін праці, год	3000–10 000	2000–4000	400–5000	500–3000
Споживаєма потужність, Вт	Постійний струм 6–10 В	5–150	2–60	50–500
Теплове випромінювання	Відсутнє	Присутнє	Відсутнє	Присутнє
Вартість	Низька	Висока	Висока	Низька
Складність систем керування	Незначна	Висока	Висока	Висока
Безпечність у використанні	Низькі напруги живлення і відсутність теплового випромінювання	Велика потужність споживання і значний радіаційний нагрів	Висока напруга живлення, висока ймовірність іскроутворення	Висока напруга живлення, високий вміст ртуті в крихкому корпусі

Водночас є проблеми в реалізації УФ-світлодіодів із довжиною хвилі випромінювання менш 300 нм. Це обумовлено низькою ефективністю перетворення фотонів, що знижує оптичну потужність, призводить до наявності паразитних теплових ефектів і підвищує вартість. Сьогодні існують промислові зразки УФ-світлодіодів на довжину хвилі до 260 нм, що виготовляються

на основі напівпровідників AlGaN. Нещодавно були розроблені світлодіоди на основі нітриду алюмінію (AlN), що мають високу оптичну потужність (1,5 мВт, 100 мА) з низьким значенням паразитного випромінювання в порівнянні зі світлодіодами на основі сапфіра (30 мА). Показано, що світлодіоди на основі AlN мають мінімальне паразитне випромінювання в порівнянні зі світлодіодами на основі сапфіру. Співвідношення паразитного випромінювання до УФ-випромінювання становило 0,0002 % та 8 % для світлодіодів на основі AlN та сапфіру відповідно.

Отже, УФ-світлодіоди відрізняються просторовою стабільністю, стійкістю інтенсивності випромінювання та вузькою смугою випромінювання з низькими оптичними втратами. Це можливо використовувати для досягнення кращої селективності визначення озону, ніж при використання звичайних джерел. Мінімізуючи шум джерел живлення, коливання температури та механічну стабільність оптики, продуктивність реалізації вимірювачів озону може перевершити традиційні конструкції на основі УФ-ламп [88].

Тому для створення приладу визначення концентрації озону у воді запропоновано у якості джерела випромінювання використовувати УФ-світлодіод CUD5GF1A [89], з максимумом випромінювальної характеристики на довжині хвилі 255 нм, що відповідає піку поглинання озону в смузі Хартлі (рис. 5.8).

Світлодіод CUD5GF1A виконується в прямокутному керамічному корпусі з прозорим для УФ-випромінювання верхнім вікном. Конструкція корпусу передбачає шляхом поверхневого монтажу на друковані плати з невеликим значенням теплового опору.

З рис. 5.8 можливо встановити, що довжина хвиль випромінювання світлодіоду знаходиться в межах від 250 до 260 нм. При цьому максимальна потужність випромінювання становить 500 мкВт для номінальної прямої напруги 6,5 В. Максимальний прямий струм для такого приладу мусить не перевищувати 30 мА, з максимальною потужністю розсіювання 220 мВт. Діапазон робочих температур діоду відповідає значенням від −30 до +60 °С.

Як показано у [90], відносна потужність УФ-випромінювання світлодіоду зростає від 25 до 150 % при збільшенні прямого струму від 5 до 30 мА. Також світлодіод має незначну зміну максимуму випромінювальної характеристики (±1 нм) у діапазоні робочих струмів.

Більш істотний вплив на зміну потужності й довжину хвилі випромінювання світлодіоду спричиняє збільшення температури активної структури. Зазначається, що при зростанні температури приладу від 25 до 80 °С, випромінювальна спроможність зменшується на 23 %, а довжина хвилі випромінювання зростає до 256,5 нм. Це потребує ретельного забезпечення теплового режиму експлуатації світлодіоду.

При цьому приймачами випромінювання є фотодіоди, що спектрально суміщені з відповідними випромінювачами.

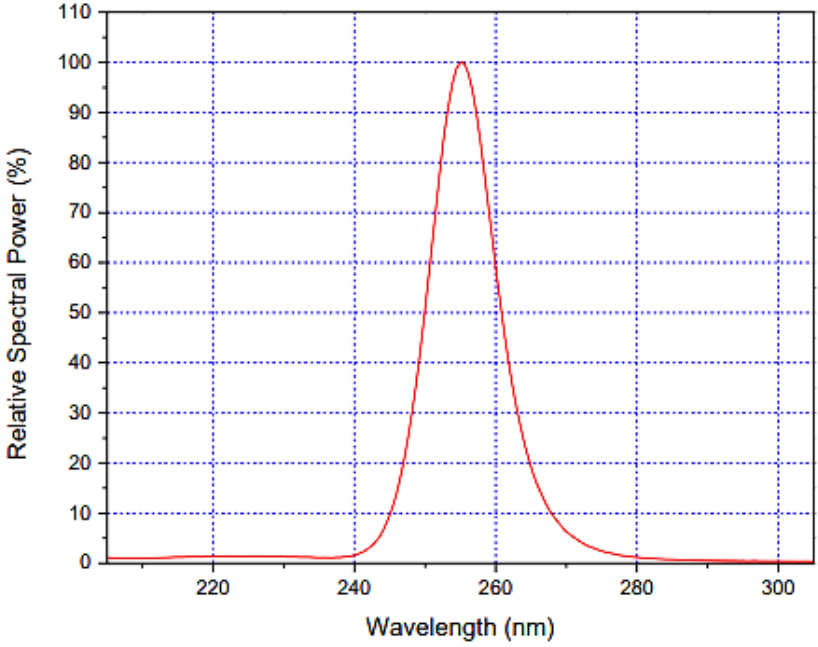


Рисунок 5.8 – Випромінювальна характеристика світлодіоду CUD5GF1A

У результаті аналізу сучасної номенклатури фотодіодів для побудови датчику озону було обрано прилад GUVC-T21GH [91], виготовляється на основі AlGaN. Спектральна характеристика діоду наведена на рис. 5.9 і характеризується максимум поглинання на довжині хвилі 260 нм., що є приблизно сумісним зі спектром випромінювання світлодіоду CUD5GF1A (рис. 5.10, див с. 88).

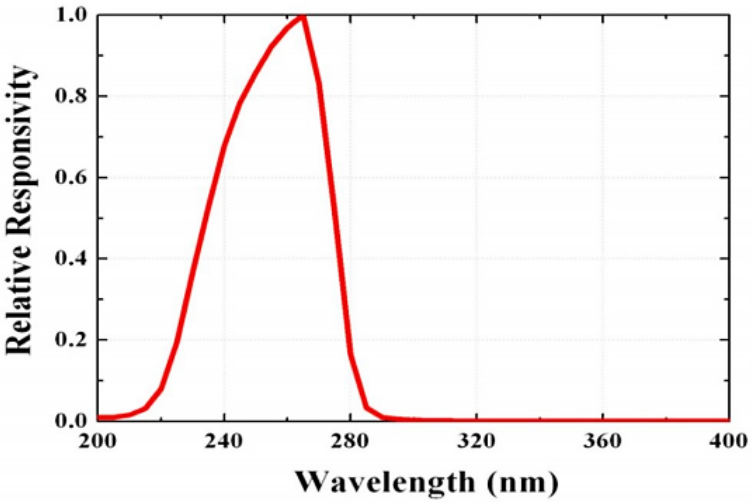


Рисунок 5.9 – Спектральна характеристика фотодіоду GUVC-T21GH

Для фотодіоду робоча смуга поглинання знаходиться в діапазоні від 240 до 280 нм, що дає змогу виключити оптичні фільтри з конструкції датчика. Чутливість детектору складає 0,6 мВ/нВт при вихідній напрузі у 0,335 В для щільності потужності 1 мВт/см^2.

Конструктивно фотодіод GUVC-T21GH виконано в корпусі TO-5 і для його функціонування потрібно однополярне джерело живлення.

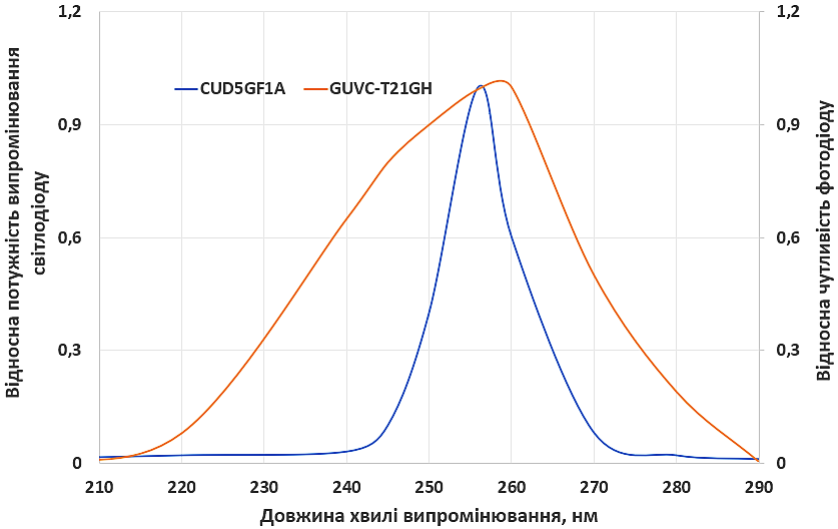


Рисунок 5.10 – Порівняльна характеристика спектру випромінювання світлодіоду і спектральної чутливості фотодіоду

5.2.2. Опис блоку розрахунку поглинання ультрафіолетового випромінювання

Абсорбційні оптичні датчики озону використовують у своїй роботі закон Бера – Ламберта [92]. Процес абсорбції є процесом послаблення УФ-випромінювання при проходженні крізь досліджувальне середовище. Електромагнітне випромінювання з високим рівнем енергії призводить до переведення електронів речовини на рівні з більшим значенням енергії. Абсорбція має місце тоді, коли енергія фотонів випромінювання є більшою ніж відстань між двома рівнями в речовині. При цьому змінюється конфігурація структури валентних оболонок. Отже, власне абсорбція є поєднанням процесів проходження і поглинання випромінювання в середовищах.

Кількісно проходження випромінювання через середовище можливо описати за допомогою співвідношення потужності сигналу на виході джерела випромінювання I_0 до потужності

сигналу, що пройшов через вимірювальне середовище *I*. Ці два показника пов'язані одне з одним таким співвідношенням:

$$I(C, \lambda)=I0(\lambda)\exp[-\alpha(\lambda)LC], \qquad (5.1)$$

де C – концентрація досліджуваної речовини, L – довжина шляху поглинання, λ – довжина хвилі випромінювання; α – спектральний коефіцієнт поглинання випромінювання досліджуваною речовиною.

Поглинальна здатність молекул озону має лінійчату структуру. При цьому смуги поглинання містять велику кількість практично рівномірно рознесених одна від одної спектральних ліній, ширина яких обумовлюється ймовірностями зштовхувань між молекулами O_3. Напівширина (FWHW) цих ліній менш ніж 1 нм при стандартних умовах вимірювань, а форма спектральної лінії задається функцією Лоренца, яка і визначає коефіцієнт поглинання випромінювання для кожної спектральної складової:

$$k(v) = \frac{S}{\pi} \times \frac{\sigma_L}{\sigma_L^2 + (v - v_0)^2}, \qquad (5.2)$$

де інтенсивність лінії:

$$S = \int_0^\infty k(v)dv .$$

Кожна спектральна лінія визначається трьома параметрами:

– резонансною частотою v_0, що має розмірність $см^{-1}$ й не залежить від тиску або температури;

– інтенсивністю S з розмірністю $см^{-1}/(кількість\ молекул\ см^{-2})$ і не залежить від тиску, але не неї впливає температура;

– шириною лінії поглинання σ_L, що має незначну температурну залежність.

Для заданих для озону параметрів v_0 і S використовувалися таблиці міжнародної бази даних NITRAN (High Resolution Transmission Molecular Absorption Database [78]). Отриманий у такий спосіб спектр поглинання озону наведено на рис. 5.11 (див. с. 90).

Тому з метою для розробки візуально-блокової моделі вимірювального тракту пропонується створити модель поглинання

випромінювання озоном за допомогою додаткового загороджувального цифрового фільтру, що характеризується амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) інверсною спектру поглинання озону (рис. 5.11). Таким способом специфікацію фільтру можливо отримати з даних [78] у такому вигляді: відносний коефіцієнт передачі в смузі пропускання – 0,19, відносний коефіцієнт передачі в смузі загородження – 0,075, відносна ширина смуги загородження від 1304 до 1079 ТГц. Задачею дослідження було отримання фільтру найкращою селективністю при мінімальному рівні спотворень у смузі пропускання.

Синтез і дослідження фільтрів виконувались у пакеті FilterDesign&Analysss системи Matlab. За визначеною специфікацією було розроблено фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ або IIR) еліптичного типу, Баттерворту, Чебишева першого і другого типу, а також фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ або FIR) Чебишева звичайного типу, Чебишева узагальненого типу, фільтру на основі метода найменших квадратів і фільтру віконного типу.

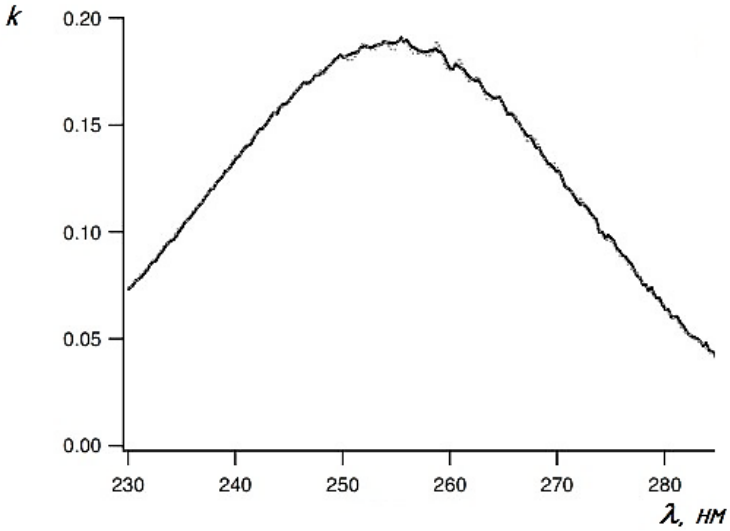


Рисунок 5.11 – Спектр поглинання молекул озону

Результати досліджень наведено на рис. 5.12–5.19 у вигляді АЧХ-фільтрів.

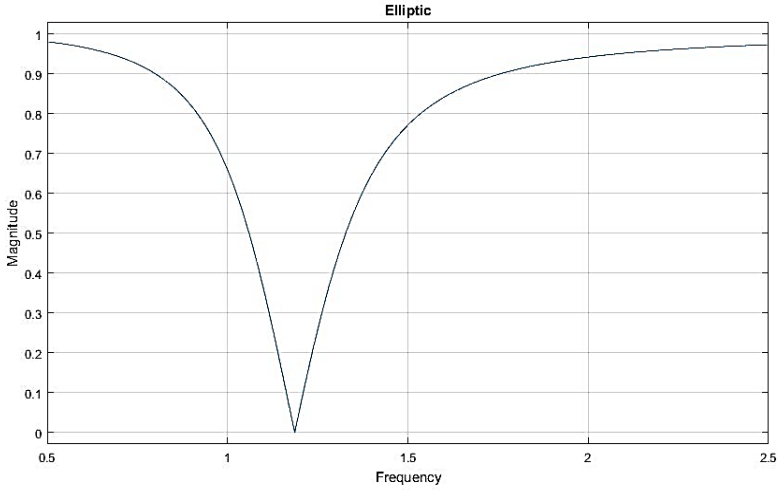


Рисунок 5.12 – Амплітудно-частотна характеристика НІХ-еліптичного фільтру

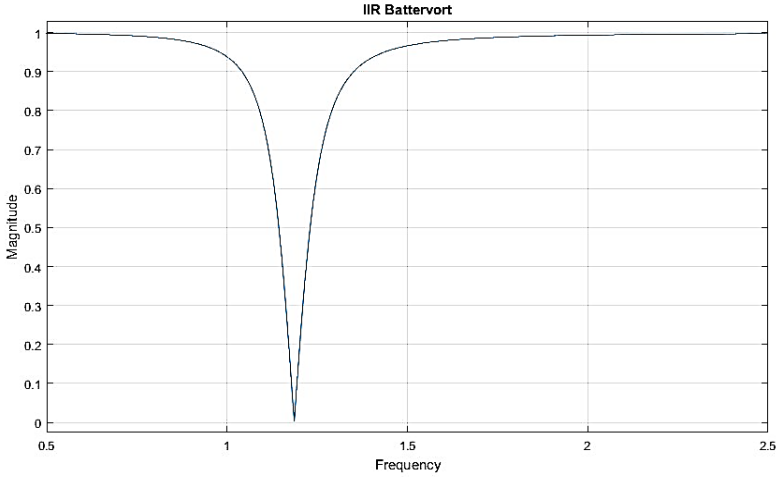


Рисунок 5.13 – Амплітудно-частотна характеристика НІХ-фільтру Баттерворту

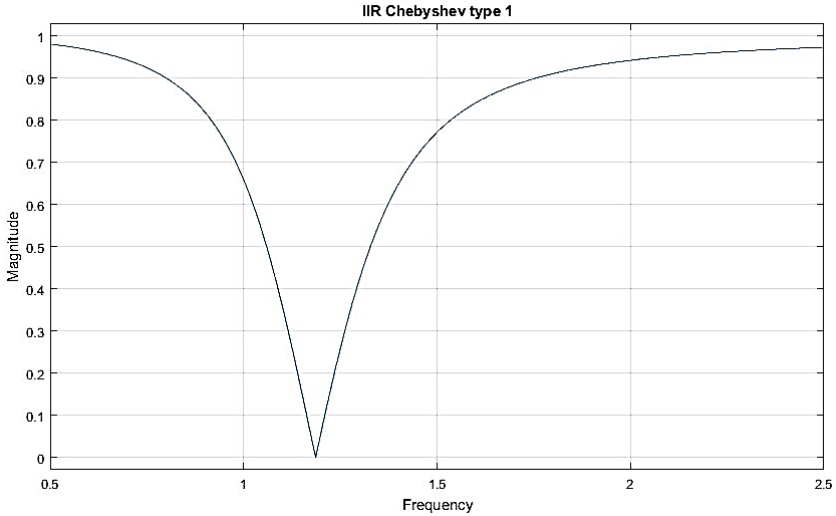


Рисунок 5.14 – Амплітудно-частотна характеристика НІХ-фільтру Чебишева 1-го типу

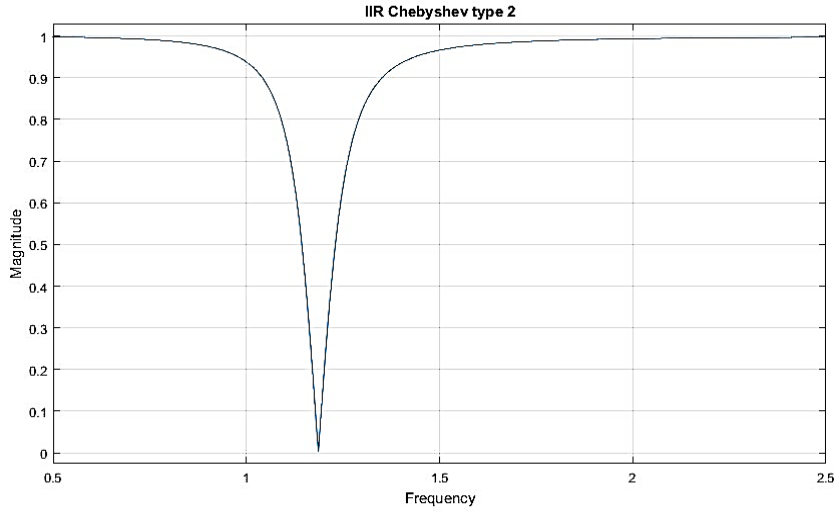


Рисунок 5.15 – Амплітудно-частотна характеристика НІХ-фільтру Чебишева 2-го типу

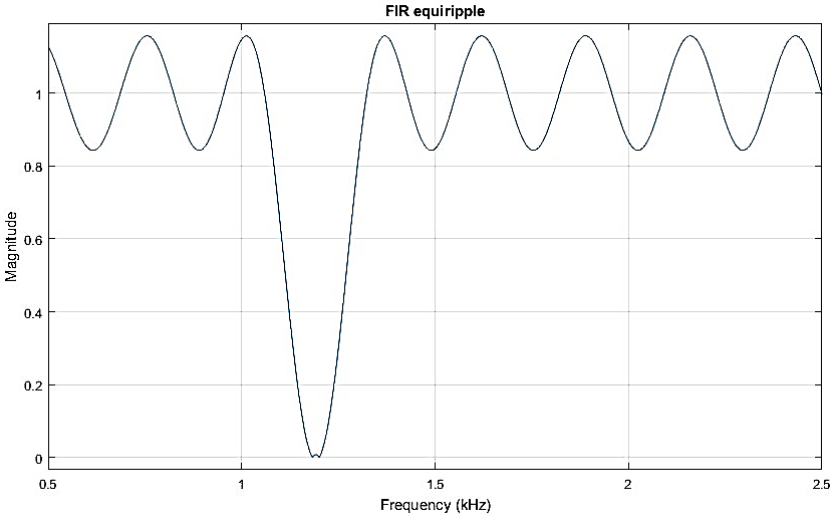


Рисунок 5.16 – Амплітудно-частотна характеристика КІХ-фільтру Чебишева

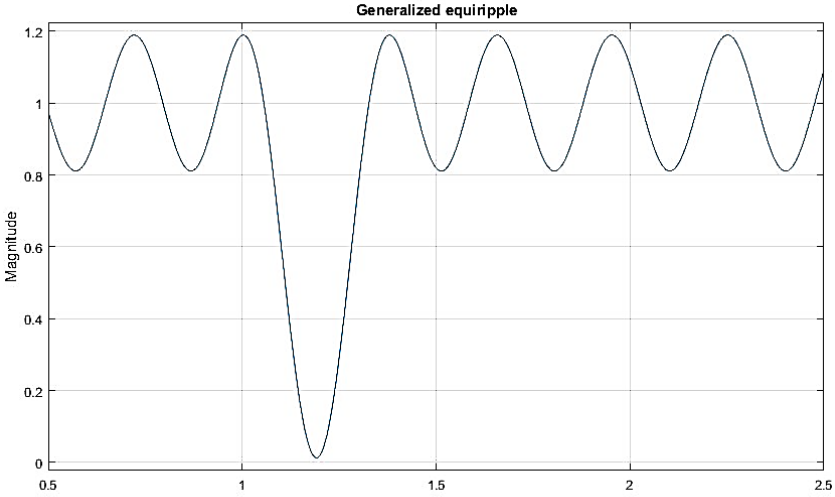


Рисунок 5.17 – Амплітудно-частотна характеристика узагальненого КІХ-фільтру Чебишева

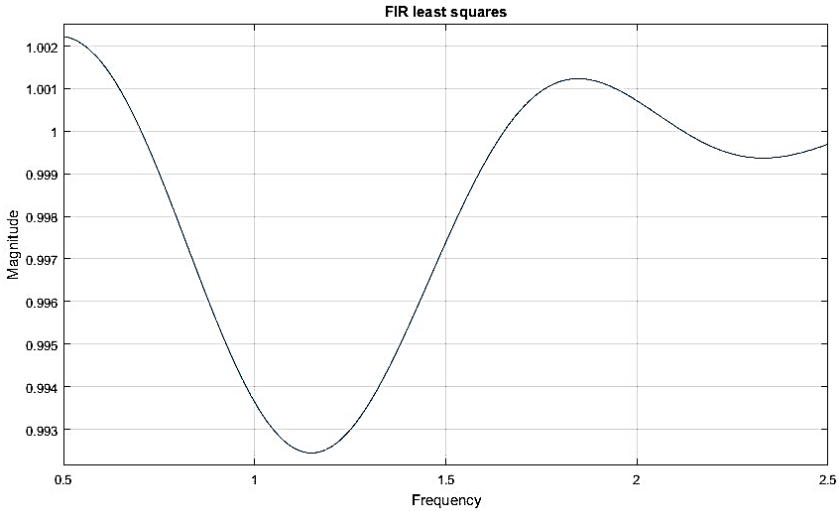


Рисунок 5.18 – Амплітудно-частотна характеристика КІХ МНК-фільтру

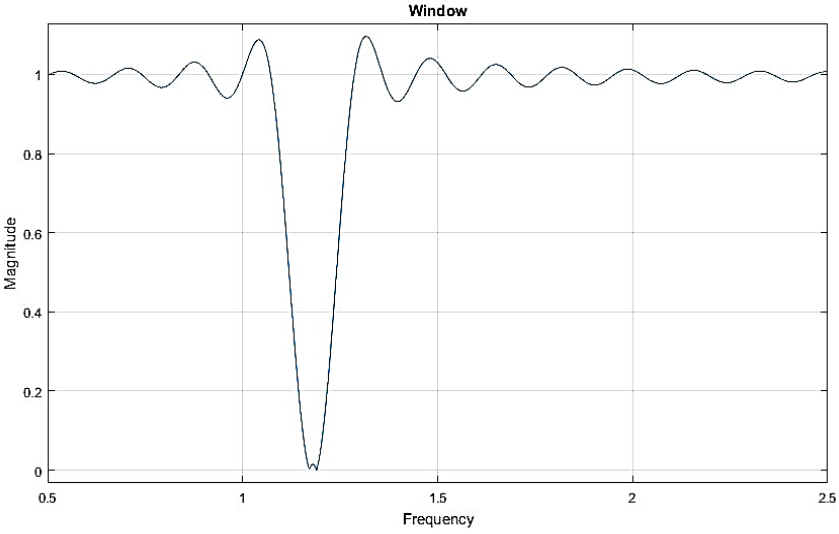


Рисунок 5.19 – Амплітудно-частотна характеристика КІХ-фільтру віконного типу

Аналіз отриманих результатів показує, що НІХ-фільтри відрізняються від КІХ-фільтрів відсутністю нерівномірності АЧХ у смугах загородження і пропускання.

Отже, до подальшого аналізу щодо моделювання оптичного каналу датчик озону було відібрано НІХ-фільтри, незважаючи на їх недоліки в порівнянні з КІХ-фільтрами при практичній реалізації. Усі варіанти залишившихся фільтрів мають рівномірну АЧХ. Тому їх подальший аналіз здійснювався шляхом кореляційного аналізу з інвертованим спектром поглинання озону [78]. При цьому найкращий показник множинної кореляції було отримано для фільтру Чебишева першого типу (R^2=0,93).

Отримані результати показують, що розроблений фільтр характеризується пригнічення з боку більш низьких частот на рівні 0,15 дБ/ТГц і 0,11 дБ/ТГц із боку більш високих частот із центральною частотою на рівні 1200 ТГц.

Для визначення коефіцієнтів передавальної функції фільтру було використано програмний пакет VisSimComm [93]. Результати синтезу блоку передавальної функції і випробувань фільтру наведені на рис. 5.20 (див. с. 96).

У наведеному завданні було використано вхідне джерело зі стрибкоподібним сигналом. За допомогою частотного аналізу було отримано АЧХ і фазо-частотну характеристику (ФЧХ) синтезованого фільтру.

Аналіз рис. 5.11 і 5.20 показує, що АЧХ-фільтру, що було обрано для реалізації спектру поглинання озону, співпадає з АЧХ-фільтру, що синтезовано шляхом визначення коефіцієнтів передавальної функції.

5.2.3. Опис блоків джерел і приймачів випромінювання

Для реалізації джерела випромінювання моделі оптичного каналу системи визначення концентрації озону було використано блок Light-EmittingDiode з бібліотеки Simulink – Simscape / Electric / Sensors&Transducers, зовнішній вигляд вікна задання параметрів якого, наведено на рис. 5.21 (див. с. 97).

Такий блок поєднує у своєму складі модель діоду з ВАХ експоненційного типу послідовно поєднаний із сенсором струму.

Оптичне випромінювання надається на окремий фізичний порт, потужність якого є твором струму, що тече через діод, і параметром приладу «Оптична потужність випромінювання на одиницю електричного струму».

Математична модель ВАХ діоду має такий вигляд:

$$I = I_S\left(e^{\frac{qU}{nkT_m}} - 1\right), \tag{5.3}$$

де I – струм діоду, U – падіння напруги на діоді, I_S – струм насичення, q – заряд електрону, k – постійна Больцмана, T_m – температура, за якою визначено параметри діоду.

При $\frac{qU}{nkT_m} > 80$, виконується заміна $e^{\frac{qU}{nkT}}$ на $\left(\frac{qU}{nkT_m} - 79\right)e^{80}$.

Це означає, що градієнт струму діоду $\frac{qU}{nkT_m} < -79$, тобто струм

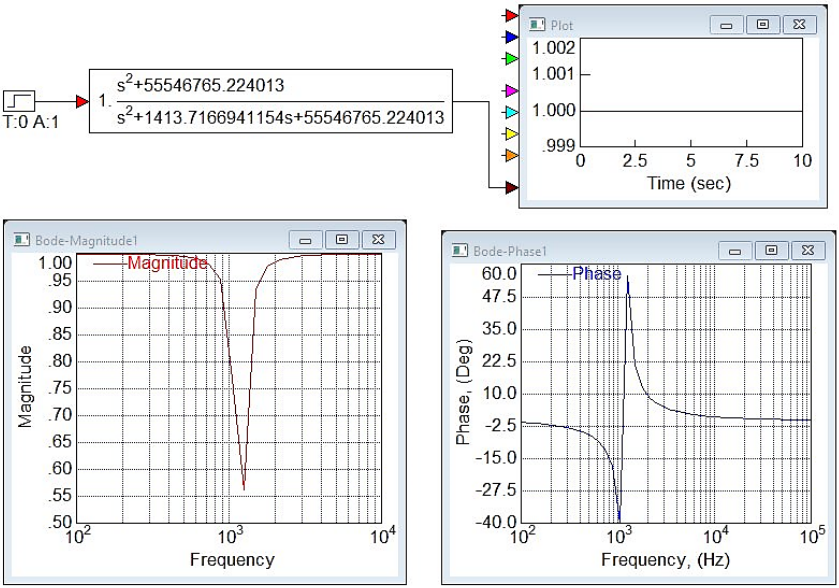


Рисунок 5.20 – Результати визначення коефіцієнтів і випробування фільтру

починає лінійно залежить від значення напруги на діоді. У випадках, коли $\frac{qU}{nkT_m} < -79$, виконується заміна $e^{\frac{qU}{nkT_m}}$ на $\left(\frac{qU}{nkT_m} + 80\right)e^{-79}$, що також відповідає лінійній ділянці ВАХ. Але в більшості режимів аналізу електричних схем такі екстремальні режими функціонування не використовуються. Лінійна екстраполяція ВАХ застосовується з метою забезпечення збіжності в процесі моделювання.

За допомогою параметрів блоку I_S і n визначаються значення струму насичення і коефіцієнту емісії. Для відомої ВАХ діоду можливо задання I_S і n шляхом введення крапок графіку через «I–V curve data points». При цьому розрахунок струму насичення і коефіцієнту емісії здійснюється так:

$$I_s=(I_1/(\exp(U_1/(nUt))-1)+(I_2/(\exp(U_2/(nUt))-1))/2, \quad (5.4)$$

$$n=((U_1-U_2)/Ut)/(\log(I_1)-\log(I_2)), \quad (5.5)$$

де $Ut=kT_m/q$, U_1, U_2 – значення напруги, що отримуються з ВАХ для струмів I_1, I_2.

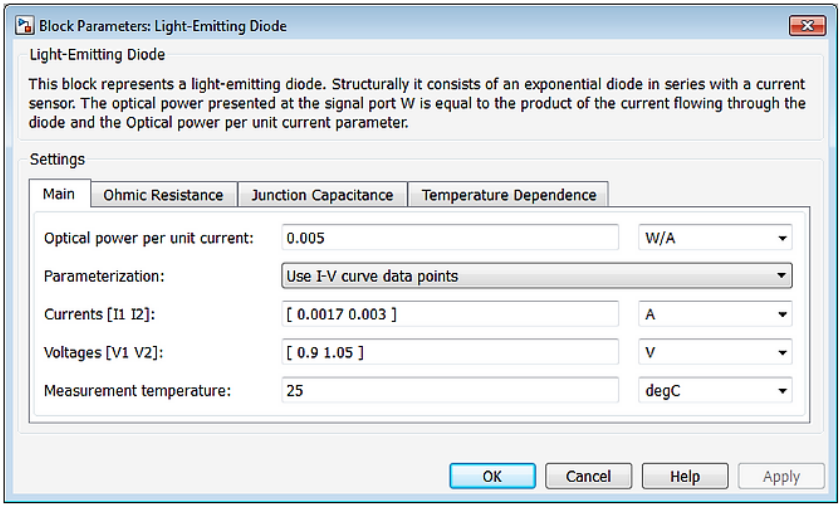


Рисунок 5.21 – Вікно задання параметрів блоку світлодіоду

Експоненційна складова ВАХ блоку світлодіоду містить параметри, що визначають ємності p-n-переходу діоду. Для цього є такі способи задання цих параметрів:

– при використанні опції «Fixed or zero junction capacitance» у розділі «Junction capacitance» встановлюються фіксовані значення параметрів;

– при використанні опції «Use parameters CJO, VJ, M & FC» у розділі «Junction capacitance» відповідні коефіцієнти застосовуються до обчислення залежності ємності переходу від напруги на діоді;

– при використанні опції «Use C–V curve data points» у розділі «Junction capacitance» задіється трьохкрапкова апроксимація вольтфарадної характеристики діоду до обчислення параметрів CJO, VJ, M, що визначають значення FC, яке застосовується до обчислення залежності ємності переходу від напруги на діоді; при цьому CJO, VJ, M отримуються так:

$$CJ_0 = C_1((V_{R2} - V_{R1})/(V_{R2} - V_{R1}(C_2/C_1)^{-1/M}))^M, \quad (5.6)$$

$$VJ = -(-V_{R2}(C_1/C_2)^{-1/M} + V_{R1})/(1-(C_1/C_2)^{-1/M}), \quad (5.7)$$

$$M = \log(C_3/C_2)/\log(V_{R2}/V_{R3}), \quad (5.8)$$

де V_{R1}, V_{R2}, V_{R3} – значення напруги вольтфарадної характеристики, що відповідають значенням ємностей C_1, C_2, C_3.

У випадках коли неможливо визначити параметр FC за крапками вольтфарадної характеристики виконується задання типового значення, що приблизно дорівнює 0,5.

Напруга зворотньозміщеного діода має забезпечувати виконання співвідношення $V_{R3} > V_{R2} > V_{R1}$. Це означає, що до ємностей виконується співвідношення $C_1 > C_2 > C_3$ у випадках коли зворотна напруга збільшує область збіднення переходу і зменшує його ємність. Невиконання цих співвідношень призводить помилки при моделюванні. В свою чергу, значення напруг V_{R3}, V_{R2} мають значно відрізнятися від значення вбудованого потенціалу переходу *VJ*, а значення напруги V_{R1} не повинно перевищувати *VJ* (типове значення для V_{R1} становить 0,1 В).

Залежність просторового заряду переходу Q_j від напруги на діоді визначається так:

$$Qj = CJ_0 \times (VJ/(M-1)) \times ((1 - V/VJ)1 - M - 1), \text{ при } V < FC \times VJ; \quad (5.9)$$

$$Qj = CJ_0 \times F_1 + (CJ_0/F_2) \times (F_3 \times (V - FC \times VJ) + \\ + 0{,}5\ (M/VJ) \times (V_2 - (FC \times VJ)2)), \text{ при } V \geq FC \times VJ;$$

де

$$F_1 = (VJ/(1-M)) \times (1 - (1 - FC)1 - M)), \quad (5.10)$$

$$F_2 = (1 - FC)^{1+M})), \quad (5.11)$$

$$F_3 = 1 - FC \times (1 + M). \quad (5.12)$$

Температурна залежність електричних параметрів блоку світлодіоду аналогічна відповідним залежностям, що використовуються в блоці звичайного діоду бібліотеки Simulink – Simscape / Electric / Sensors&Transducers.

У блоці світлодіоду можливо задіяти додатковий порт H для моделювання впливу температури довкілля, або з метою оцінки нагріву приладу в результаті проходження електричного струму.

У якості приймача випромінювання моделі оптичного каналу було використано блок фотодіоду бібліотеки Simulink – Simscape / Electric / Sensors&Transducers, зовнішній вигляд вікна задання параметрів якого, наведено на рис. 5.22 (див. с. 100).

Такий блок є послідовним поєднанням джерела струму, що керується оптичним випромінюванням, з моделлю діоду, яка має ВАХ експоненційного типу. Значення струму джерела визначається як:

$$I_p = S \times R,$$

де S – чутливість фотодіоду, R – інтенсивність оптичного випромінювання, що задаються у якості параметрів блоку.

Математична модель ВАХ діоду має вигляд (5.3), але параметр I_S є темновим струмом, коефіцієнт емісії розраховується як:

$$n = V_F/(V_t \log (I_F/IS + 1)),$$

де V_F – пряма напруга на діоді; $V_t = k\ T_m/q$, I_F – прямий струм через діод при напрузі V_F.

Усі інші параметри й залежності блоку ідентичні блоку світлодіоду і визначаються (5.4)–(5.12).

З урахуванням блоків світлодіоду, фотодіоду і блоку передавальної функції фільтру, що моделює поглинання випромінювання озоном, розроблено візуально-блочну модель оптичного каналу, яка наведена на рис. 5.23.

До складу моделі також входять блок PS-SimulinkConverter, блок Simulink-PS Converter і блок PS Gain.

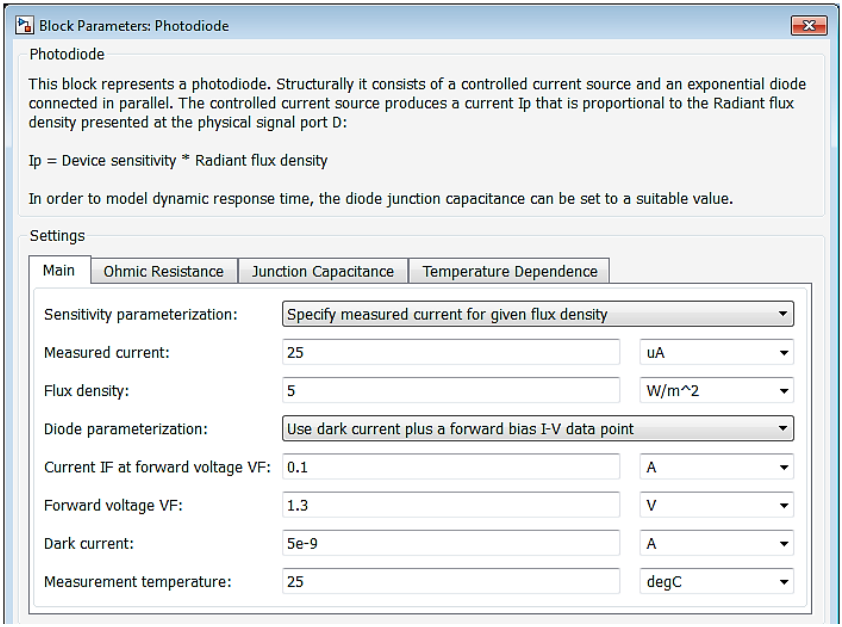


Рисунок 5.22 – Вікно задання параметрів блоку фотодіоду

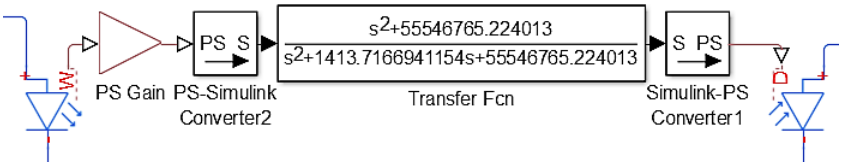


Рисунок 5.23 – Модель оптичного каналу датчика озону

Блоки PS-SimulinkConverter і Simulink-PS Converter виконують функції фізичних сигналів у сигнал моделювання і навпаки відповідно. Таким способом реалізується поєднання з фізичними моделями світлодіоду і фотодіоду загальної моделі передавальної функції смугового фільтру.

Блок PS Gain реалізує за допомогою функції твору послаблення оптичного сигналу в каналі датчика.

Отже, розроблена модель дає змогу синтезувати на більш високому ієрархічному рівні схему вимірювання концентрації озону з використання одного чи декілька опорних сигналів і власно вимірювального сигналу.

5.3. Синтез трипроменевої моделі системи вимірювання концентрації озону

5.3.1. Структура трипроменевої системи вимірювання концентрації

Метод визначення вмісту озону за поглинанням УФ-випромінювання було розроблено для газоподібних середовищ. Було запропоновано [94] структуру системи вимірювання концентрації озону у воді, дія якої базується на таких же принципах. Але на відміну від відомих варіантів реалізації, така структура містить джерело УФ-випромінювання у вигляді УФ-світлодіоду, перевагою якого в порівнянні з ртутними лампами є стабільність і монохроматичність випромінювання, а в порівнянні з УФ-лазерами – собівартість і знижена потужність споживання. Структура розробленої системи наведена на рис. 5.24 (див. с. 102).

Озонаторна станція виконує збагачення води озоном для її дезінфекції і дезодорування. Цьому процесі потрібно контролювати вміст розчиненого озону у воді, щоб визначати ступінь очищення і продуктивність станції. На гідравлічному виході станції для цього встановлено абсорбційний оптичний датчик озону, структура і принцип дії якого наведено у п.п. 5.2.1, що формує вимірювальний канал. Але, згідно з (5.1) для визначення ступеня поглинання УФ-випромінювання, необхідно здійснювати

вимірювання інтенсивності випромінювання УФ-світлодіоду. Тому для цього, а також для врахування можливості поглинання випромінювання іншими складовими обробляємої води, застосовано розподілену двопроменеву схему вимірювань, де значення опорного оптичного сигналу отримується за допомогою датчика, ідентичного датчику вимірювального каналу, який встановлюється на гідравлічному вході станції. Але така схема не може враховувати побічні зміни вміст води, що виникають у процесі її обробки і проходження крізь станцію і комунікації.

Тому у вимірювальному каналі пропонується застосування додаткового широкосмугового оптичного абсорбційного датчика, що встановлюється безпосередньо перед вимірювальним датчиком і враховує зміни макроскладу води. Такий датчик реалізується поєднанням світлодіоду видимого спектру випромінювання зі спектрально неселективним приймачем на основі

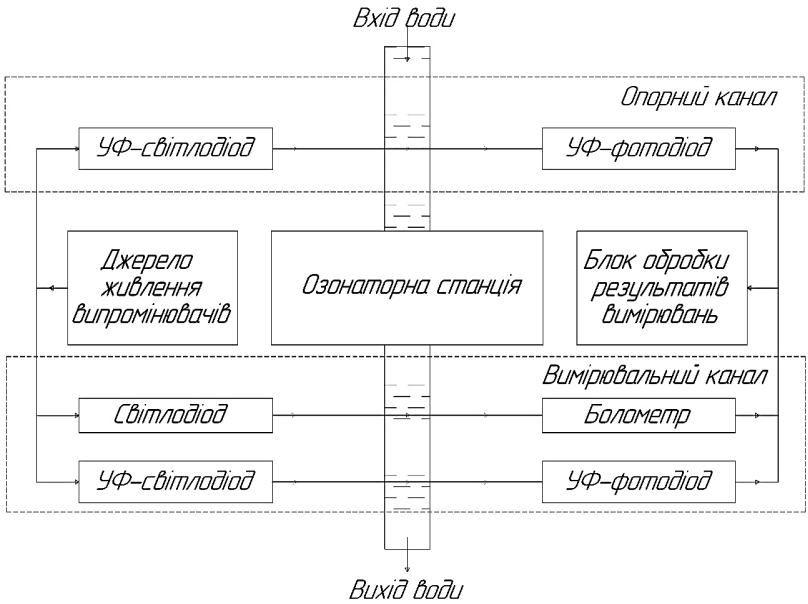


Рисунок 5.24 – Структура системи вимірювання концентрації озону

болометру. У разі коли його вихідний сигнал зменшується нижче критичного значення, то результати вимірювань розпізнаються як хибні.

Структура передбачає наявність джерела живлення випромінювачів датчиків і схему обробки результатів вимірювань, що формує інформативний сигнал, щодо ступеня поглинання УФ-випромінювання водою і здійснює корекцію щодо зміни інтенсивності в результаті змін макроскладу води.

У розробленій структурі необхідно забезпечити додаткову фільтрації води на вході виході озонаторної станції. Також пропонується, за можливості, здійснювати переміщування обробленої води перед її подачею до вимірювального каналу.

5.3.2. Опис основного датчика вимірювального каналу

На основі моделі оптичного каналу датчика озону (рис. 5.23) у середовищі Matlab Simulink [95] було розроблено модель основного датчика вимірювального каналу. Структура моделі датчика наведено на рис. 5.25.

У розробленій моделі в якості джерела живлення УФ-світлодіоду використовується блок генератора прямокутних імпульсів

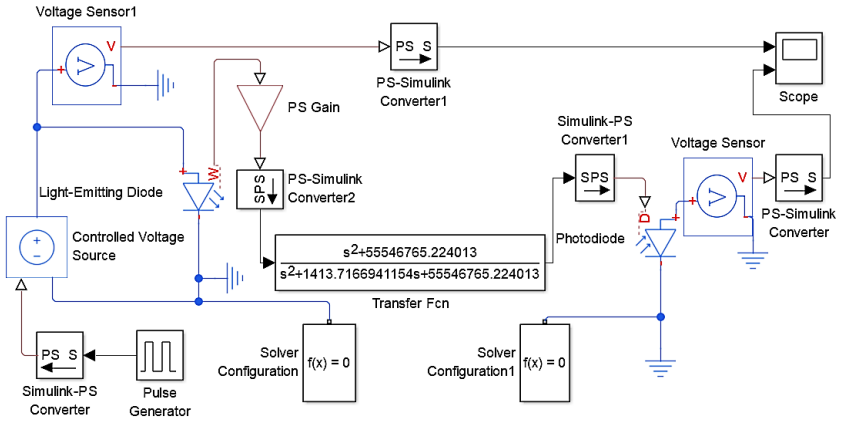


Рисунок 5.25 – Модель основного датчика вимірювального каналу

Pulse Generator, що через перетворювач загальних сигналів Simulink у фізичні сигнали Simulink-PS Converter задає напругу на полюсах керованого джерела напруги Controlled Voltage Source. Для вимірювання інформаційних сигналів моделі застосовано сенсори напруги Voltage Sensor, що через перетворювачі фізичних величин у загальні сигнали Simulink PS – Simulink Converter поєднані з блоком відображення сигналів Scope.

У моделі додатково використовуються блоки Solver Configuration для обчислювального поєднання підсистем загального і фізичного моделювання.

Параметри моделей УФ-світлодіоду й УФ-фотодіоду задавалися відповідно довідкових даних на прилади CUD5GF1A і GUVC-T21GH відповідно.

Результати дослідження розробленої моделі наведено на рис. 5.26.

З рис. 5.26 видно, що вихідний сигнал, розрахований за розробленою моделлю датчика, зменшує амплітуду вхідного сигналу в 74 рази не змінюючи його форму при частоті 1 Гц.

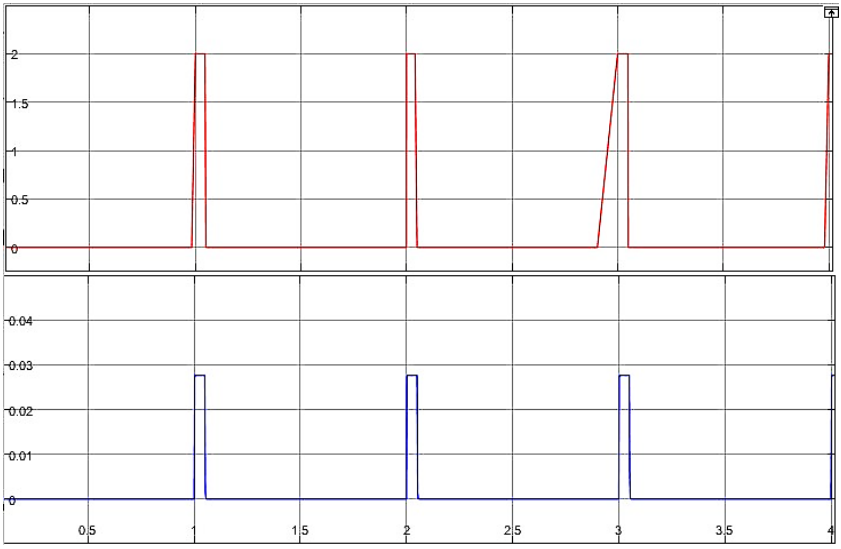


Рисунок 5.26 – Епюри сигналів моделі основного датчика

Результати частотного аналізу розробленої моделі показано на рис. 5.27 у вигляді АЧХ.

Аналіз АЧХ-датчика показує, що максимальне послаблення сигналу рівня 130 дБ відповідає смузі поглинання озону. Це перевищує зміну амплітуди сигналів на інших ділянках АЧХ майже у 2 рази.

Отже, отримані результати випробування розробленої моделі підтверджують її працездатність і можуть бути основою для синтезу моделі вимірювального тракту системи визначення концентрації озону.

5.3.3. Синтез моделі опорного каналу

На основі структури системи вимірювання концентрації озону й результатів синтезу моделі основного датчика системи було створено модель опорного каналу, яка наведена на рис. 5.28 (див. с. 106).

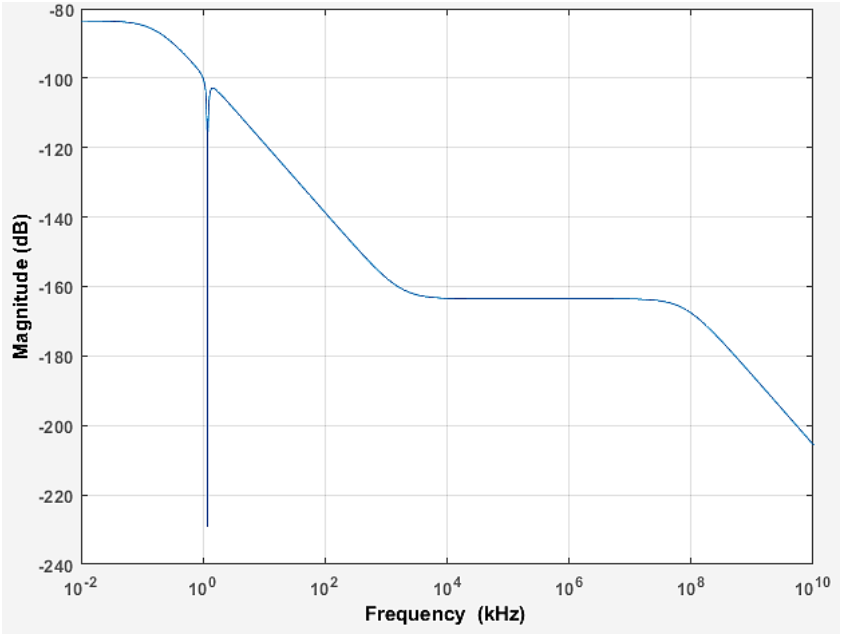


Рисунок 5.27 – Амплітудно-частотна характеристика моделі основного датчика

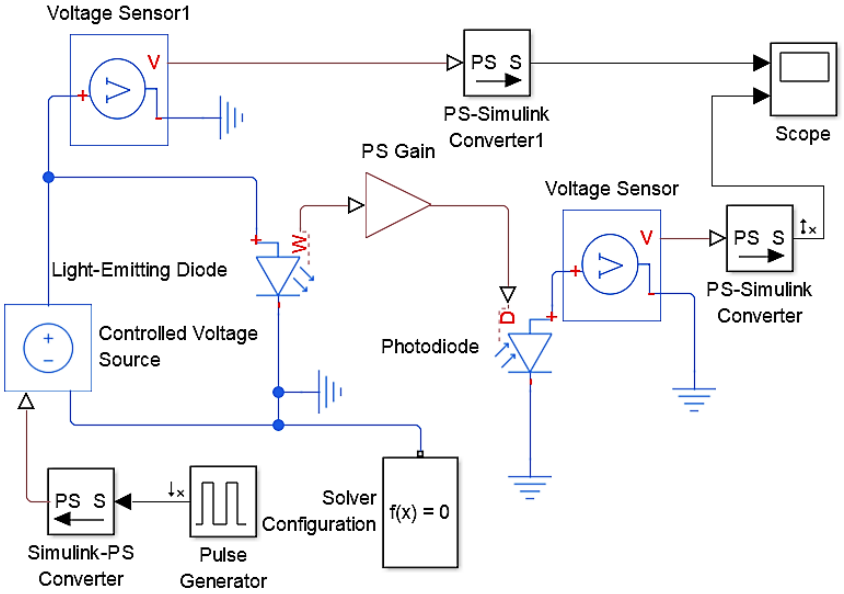


Рисунок 5.28 – Модель опорного каналу системи

Основною відмінністю розробленої моделі від моделі основного датчика є те, що в оптичному каналі відсутній блок моделювання спектру поглинання озону, залишено лише блок PS Gain, який відповідає загальному поглинанню УФ-випромінювання водою.

Результати частотного аналізу синтезованої моделі у вигляді АЧХ наведено на рис. 5.29 (див. с. 107).

Порівняння результатів наведених на рис. 5.29 і 5.27 показує, що АЧХ опорного каналу не характеризується послабленням сигналів у смузі поглинання озону.

5.3.4. Синтез моделі широкосмугового датчика

На основі структури системи вимірювання концентрації озону й результатів синтезу моделі основного датчика системи було створено модель широкосмугового датчика, яка наведена на рис. 5.30 (див. с. 107).

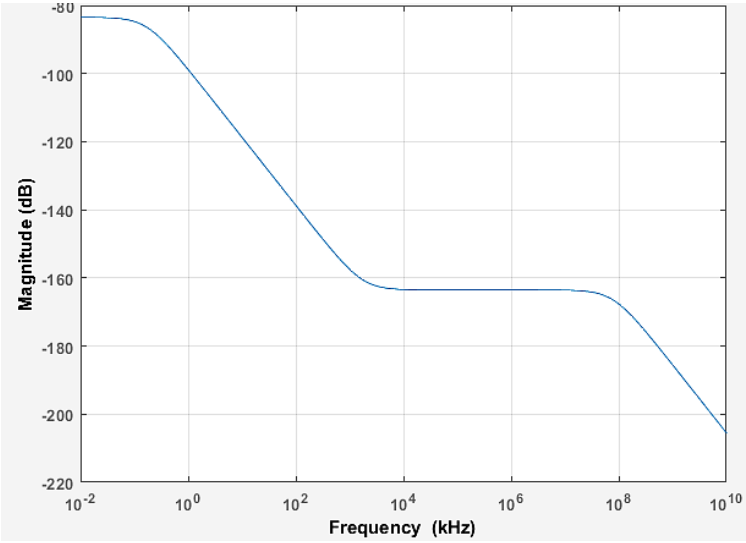


Рисунок 5.29 – Амплітудно-частотна характеристика опорного каналу

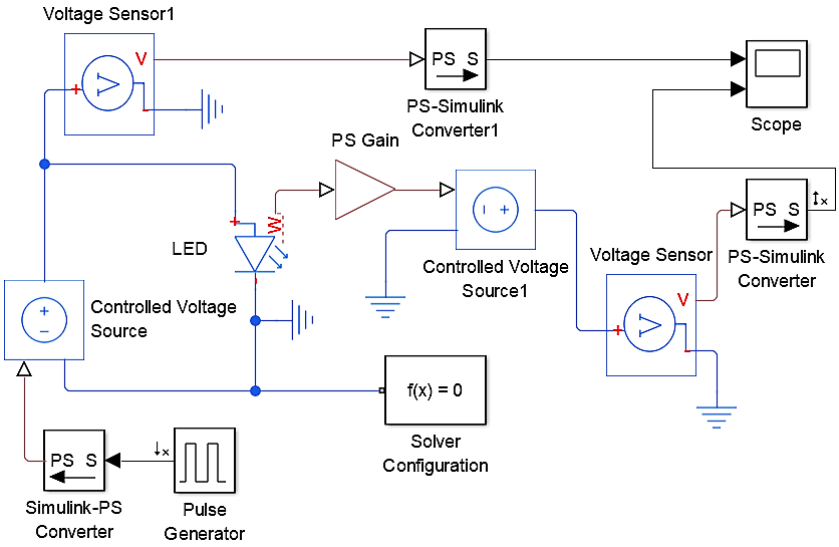


Рисунок 5.30 – Модель широкосмугового датчика

Основною відмінністю розробленої моделі від моделі опорного каналу є те, що в оптичному каналі відсутній блок фотодіоду, у якості приймача випромінювання використано модель болометру у вигляді джерела напруги, яке керується оптичним сигналом.

Результати частотного аналізу синтезованої моделі широкосмугового датчика у вигляді АЧХ наведено на рис. 5.31.

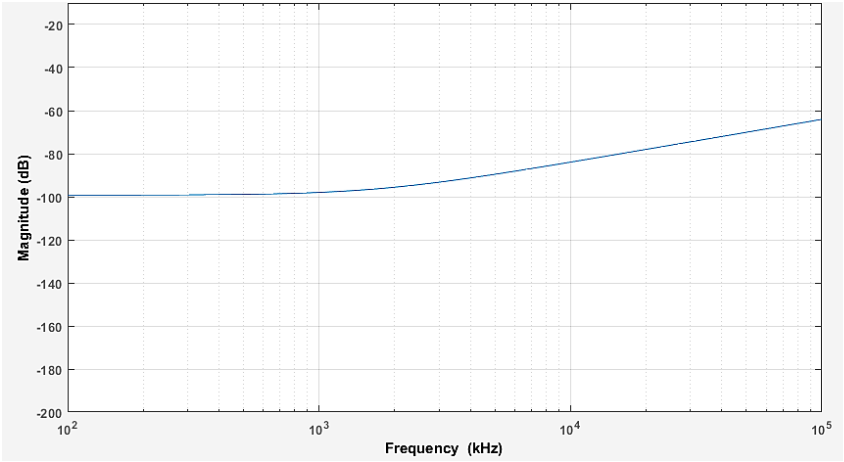


Рисунок 5.31 – Амплітудно-частотна характеристика широкосмугового датчика

Аналіз рис. 5.31 показує, АЧХ має майже постійний коефіцієнт передачі в діапазоні робочих частот і змінює це значення на 20 дБ при зростанні частоти за його межами.

5.3.5. Комплексна модель системи визначення концентрації озону

На основі синтезу моделей основного датчика, опорного каналу й широкосмугового датчика було розроблено комплексну модель системи визначення концентрації озону.

Структура розробленої в системі MatlabSimulink моделі наведено на рис. 5.32 (див. с. 109).

Модель містить випромінювачі у вигляді УФ-світлодіодів UV LED і UV LED1 вимірювального й опорного каналів, а також

світлодіод LED широкосмугового датчика. Ці блоки мають спільне живлення від генератору прямокутних імпульсів, що керує джерелом напруги ControlledVoltageSource3. Приймачам випромінювання відповідають блоки фотодіодів UV Photodiode і UV Photodiode1 для вимірювального й опорного каналів відповідно. У якості моделі широкосмугового приймача застосовується блок Voltage Sensor.

Сигнали з виходів блоків приймачів Sample, Ozone і Error відповідають напругам опорного каналу, вимірювального каналу й широкосмугового датчика відповідно. Останній призначено для корекції результатів вимірювань викликаних відбуттям і розсіюванням випромінювання на забрудненнях води. Результати випробування моделі наведено на рис. 5.33 (див. с. 110) у вигляді епюрів напруги приймачів випромінювання.

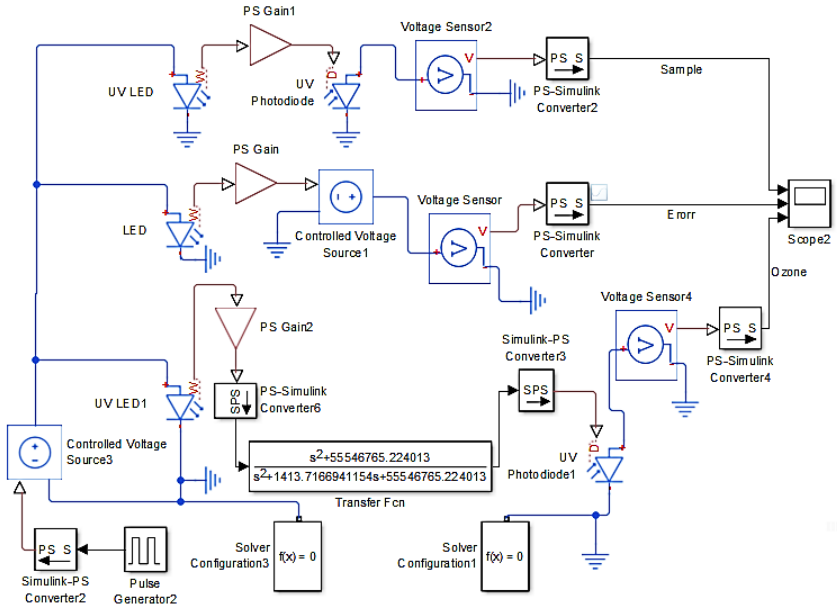


Рисунок 5.32 – Модель вимірювального тракту системи визначення концентрації озону

Аналіз отриманих результатів показує, що форма всіх трьох сигналів співпадає одне з одним, але відрізняється від прямокутної форми напруги живлення випромінювачів. Це можливо пояснити тим, що при малій тривалості прямокутних імпульсів, завдяки нелінійності приймачів і випромінювачів, відбувається викривлення форми до вигляду меандрів. Також фази сигналів опорного і вимірювального каналів співпадають, а сигнал широкосмугового датчика випереджає їх завдяки менший інерційності болометру на 0,1 с. Це також має відповідати геометричному розташуванню широкосмугового датчика перед основним датчиком.

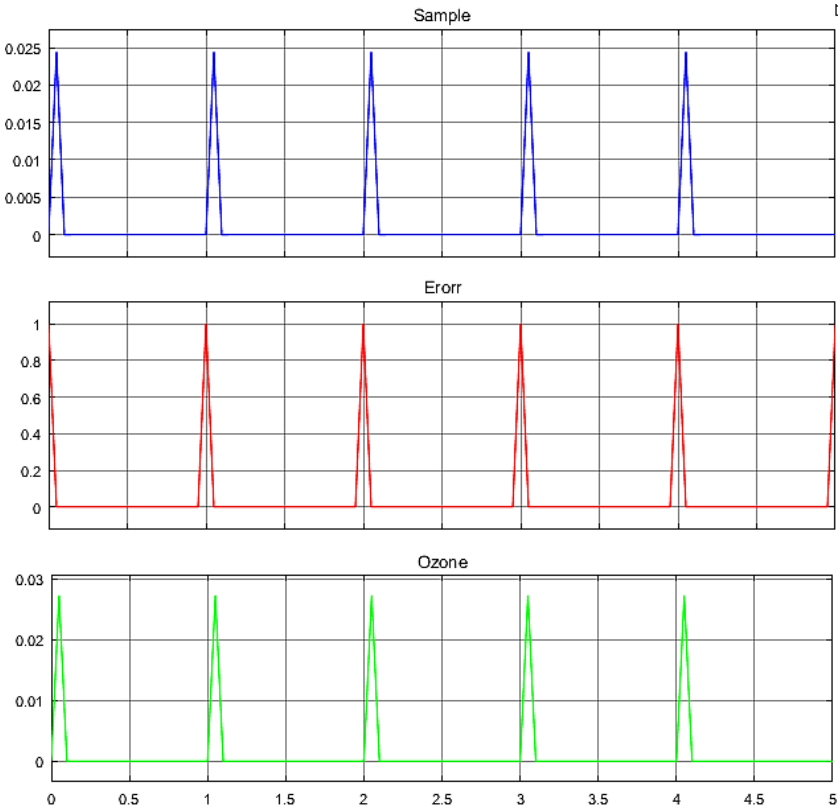


Рисунок 5.33 – Епюри сигналів на виході каналів моделі

Отже, для об'єктивного визначення концентрації озону більш оптимальним є застосування вимірювальних імпульсів зі значною тривалістю і в граничному випадку – УФ-випромінювання з постійною інтенсивністю.

5.4. Моделювання системи визначення концентрації озону

5.4.1. Моделювання системи з джерелами випромінювання постійної інтенсивності

Як показали випробування моделі вимірювального тракту системи визначення концентрації озону (п.п. 5.3.5), результати визначення зміни інтенсивності випромінювання в опорному і вимірювальному каналі краще проводити в стаціонарних режимах роботи оптичних підсистем. Тому розроблена модель була доповнена постійним джерелом живлення випромінювачів – світлодіодів (рис. 5.34). Поєднання джерела з електричною частиною моделі здійснюється таким же чином, як і при імпульсному джерелі.

Крім того, модель було доповнено блоками з обробки і спостереження вихідних сигналів Sample, Ozone і Error приймачів випромінювання, як показано на рис. 5.35 (див. с. 112). Так,

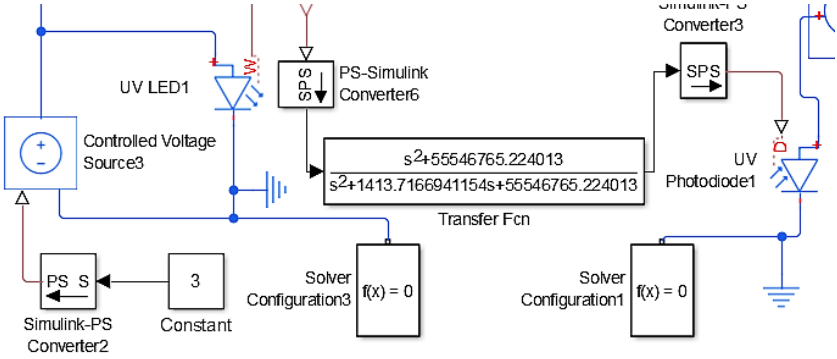


Рисунок 5.34 – Реалізація постійного джерела живлення в моделі

відповідно до (5.1), визначається відношення сигналів вимірювального каналу й опорного каналу за допомогою блоку Divide.

У наступному блоці Math Function виконується логарифмування ступені послаблення сигналів і обчислюється коефіцієнт поглинання УФ-випромінювання молекулами озону – сигнал Alfa (рис. 5.36, див. с. 113).

На основі блоку компаратора Compare To Constant реалізовано повідомлення про наявність непрозорих макрочастинок у воді і скидання, шляхом твору його вихідного значення Check на величину сигналу Alfa, результатів вимірювань до нуля (блок Product). Такому скоригованому сигналу відповідає величина AlfaCorr. При перевищенні вихідним сигналом широкосмугового датчика граничного значення (2 В) відбувається скидання стану компаратора до нуля і величина AlfaCorr також буде дорівнювати нулю. На наведених епюрах такий стан спостерігається

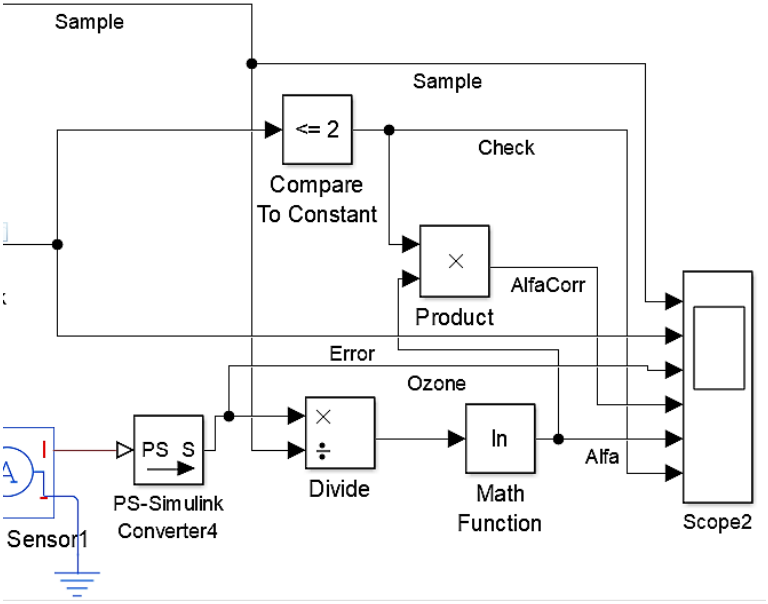


Рисунок 5.35 – Блоки обробки вихідних сигналів приймачів моделі

на початкових ділянках часу, коли встановлюється рівноважний стан функціонування випромінювачів і приймачів системи.

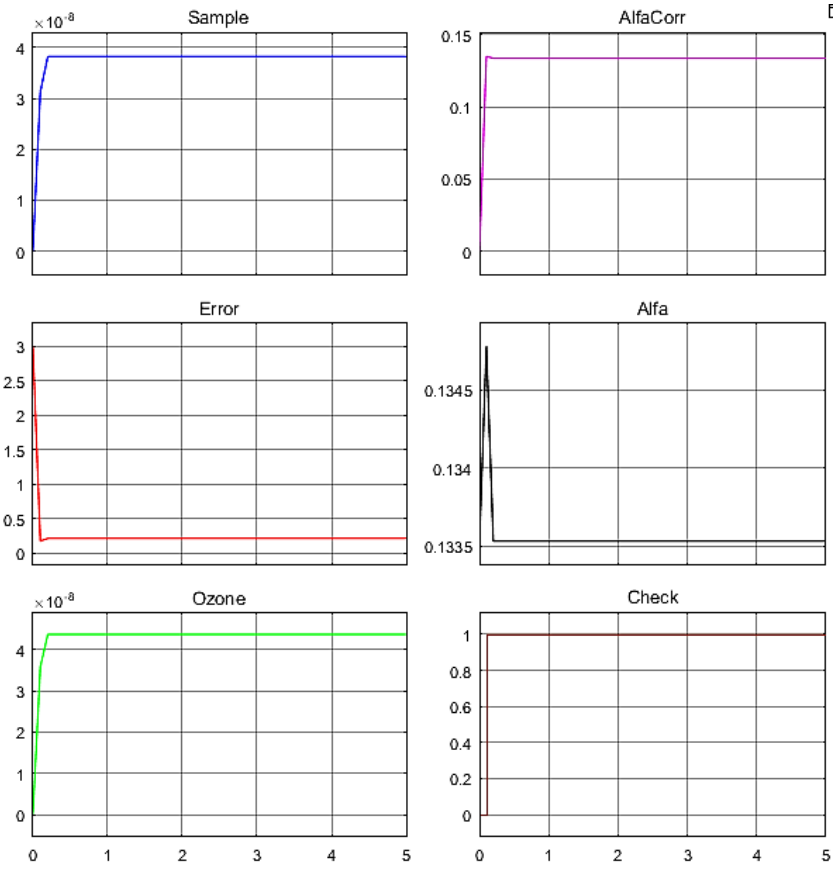


Рисунок 5.36 – Епюри сигналів при моделюванні стаціонарного режиму роботи моделі:

Sample – вихідний сигнал опорного каналу;
Error – вихідний сигнал широкосмугового датчика;
Ozone – вихідний сигнал вимірювального каналу;
AlfaCorr – скориговане значення коефіцієнта поглинання;
Alfa – значення коефіцієнта поглинання;
Check – сигнал, що відповідає наявності непрозорих макрочастинок у воді

Аналіз отриманих результатів показує, що час встановлення результатів вимірювань становить 0,21 с при значенні коефіцієнта поглинання 0,135.

5.4.2. Моделювання впливу випадкових процесів на точність визначення концентрації озону

Проблема завадостійкості інформаційно-вимірювальних систем є однією з найважливіших проблем сучасної теорії передачі інформації. Ця проблема виникає при проєктуванні й експлуатації інформаційно-вимірювальних систем, що мають обмежений енергетичний потенціал. Це насамперед відноситься до інформаційно-вимірювальної техніки, у якій у якості носія інформації використовується оптичне випромінювання. Оптоелектронні інформаційно-вимірювальні системи передачі інформації ефективно працюють за умови, що співвідношення «сигнал / шум» на вході приймача випромінювання перевищує деяке порогове значення.

Зменшення співвідношення «сигнал / шум» на вході приймача випромінювання при роботі в області порога призводить до швидкого зростання похибки вимірювання і, відповідно, до різкого погіршення якості вимірювання. До теперішнього часу немає єдиних і чітких визначень для порогового режиму, порогового сигналу й порогового співвідношення «сигнал / шум».

Робота інформаційно-вимірювальних систем при порогових режимах мало вивчена. Відомо лише, що разом із корисним сигналом через елементи оптоелектронної інформаційно-вимірювальної системи практично завжди проходять перешкоди, звані шумами, які можуть генеруватися і у самих елементах системи. Накладаючись на корисний сигнал, ці перешкоди спотворюють його параметри, що неминуче веде до виникнення похибок вимірювання. У більшості випадків ці перешкоди є випадковими, статистичні характеристики яких залежать від характеру задання, структури і складу елементів оптоелектронної інформаційно-вимірювальної системи. Для зменшення інерційності оптоелектронної інформаційно-вимірювальної системи і зниження значення її динамічних похибок смуга частот, що пропускаються

частотної характеристики системи розширюється, що веде до підвищення рівня перешкод і зростання спотворень параметрів корисного сигналу від них. Отже, тенденції зміни динамічних похибок і похибок від шумів при зменшенні інерційності інформаційно-вимірювальних систем протилежні, й існують такі параметри системи, що визначають її частотну передавальну функцію, при яких сума динамічної похибки та похибки від шумів буде мінімальною для заданих умов роботи.

Тому аналіз функціонування моделі вимірювального тракту в умовах дії випадкових перешкод є актуальним для розробки методів підвищення точності системи визначення концентрації озону. Для цього в синтезовану модель із постійними джерелами живлення було додано джерело випадкових сигналів Band-Limited White Noise до оптичного каналу вимірювального тракту (рис. 5.37).

Отже, за допомогою блоків підсумовування PS Add1 і PS Add реалізовано адитивну суміш випромінювання світлодіодів із завадами на входах приймачів основного й широкосмугового датчиків (рис. 5.38, див. с. 116).

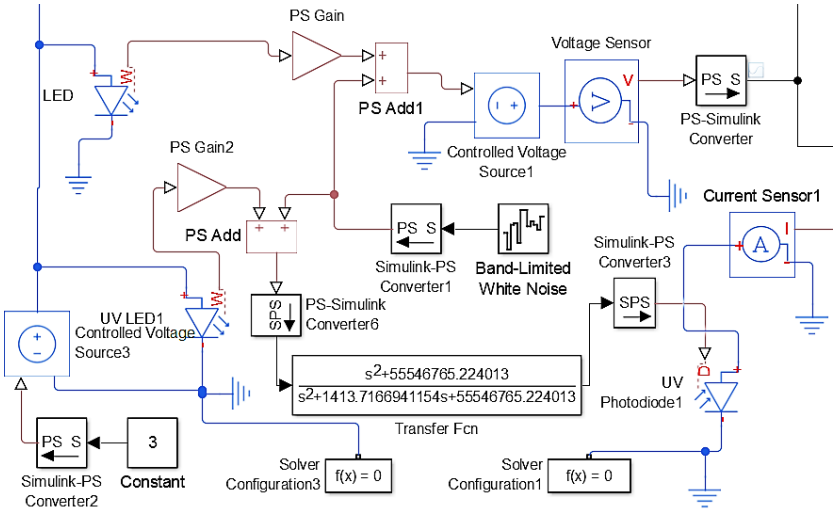


Рисунок 5.37 – Реалізація дії завад у вимірювальному каналі

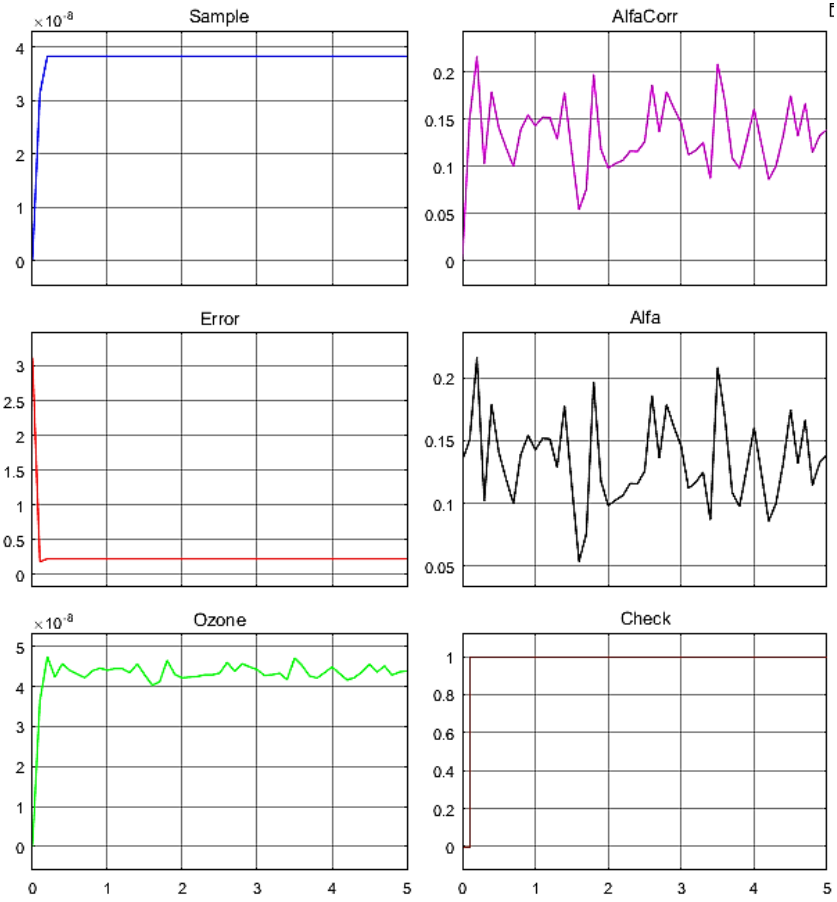


Рисунок 5.38 – Епюри сигналів при моделюванні завадостійкості в стаціонарному режимі роботи моделі:

Sample – вихідний сигнал опорного каналу;
Error – вихідний сигнал широкосмугового датчика;
Ozone – вихідний сигнал вимірювального каналу,
AlfaCorr – скориговане значення коефіцієнта поглинання;
Alfa – значення коефіцієнта поглинання;
Check – сигнал, що відповідає наявності непрозорих макрочастинок у воді

Аналіз рис. 5.38 показує, що результати поглинання УФ-випромінювання AlfaCorr під дією випадкових перешкод також хаотично змінюються від 0,056 до 0,22. Це відповідає виникненню помилки вимірювань від 0,17 до 0,69 при потужності шумів 1 нВт/Гц.

5.4.3. Моделювання системи з модуляцією інтенсивності випромінювання

Для зниження величини похибки вимірювань пропонується застосовувати вимірювальний тракт із модуляцією випромінювання, фрагмент візуально-блочної моделі якого наведено на рис. 5.39.

На відміну від нестаціонарної моделі (рис. 5.32) у цьому завданні додано блок Rate Transition для узгодження частоти модуляції випромінювання в каналі (0,33 Гц) з випадковою частотою появи завад. При цьому шпаруватість модуляції складає 0,7. Крім того, було запропоновано застосування обробки вихідних сигналів датчиків, так як показано на рис. 5.40 (див. с. 118).

Для зниження величини похибки визначення було додано, у порівнянні з початковим варіантом (рис. 5.35), обмежувач рівня коефіцієнта поглинання Alfa на основі двох паралельно

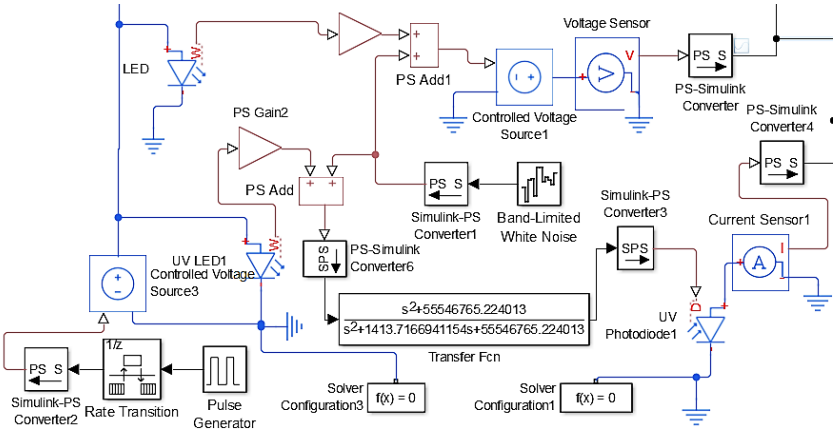


Рисунок 5.39 – Фрагмент моделі з модуляцією випромінювання

поєднаних блоків Compare1 і Compare2. Вихідні значення цих операцій перемножуються зі значенням Alfa, що враховує розсіювання світла на макродефектах у оптичному каналі. Результати моделювання цих процесів наведено на рисунку 5.41 (див. с. 119).

Аналіз рис. 5.41 показує, що амплітуда сформованого імпульсу AlfaCorr є інформативним показником із визначення поглинання випромінювання. При цьому похибка визначення концентрації озону стабілізується на рівні 0,1 %.

Також було виконано моделювання завадостійкості розробленої моделі для різних значень частоти модуляції випромінювання, але при незмінності всіх інших умов. Результати досліджень показано на рис. 5.42 (див. с. 120) у вигляді залежності величини похибки вимірювань від частоти модуляції випромінювання.

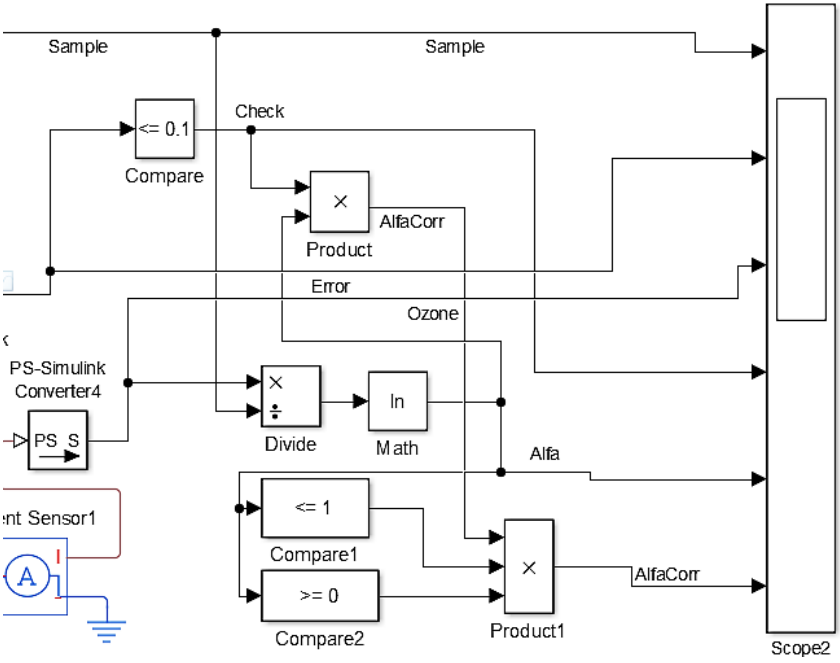


Рисунок 5.40 – Фрагмент моделі з додатковою обробкою вихідних сигналів

З рис. 5.42 видно, що величина похибки зростає зі збільшення частоти модуляції випромінювання за нелінійних законом від 0,1 до 2,62 %.

Для встановлення аналітичної залежності величини похибки вимірювань від частоти модуляції випромінювання було

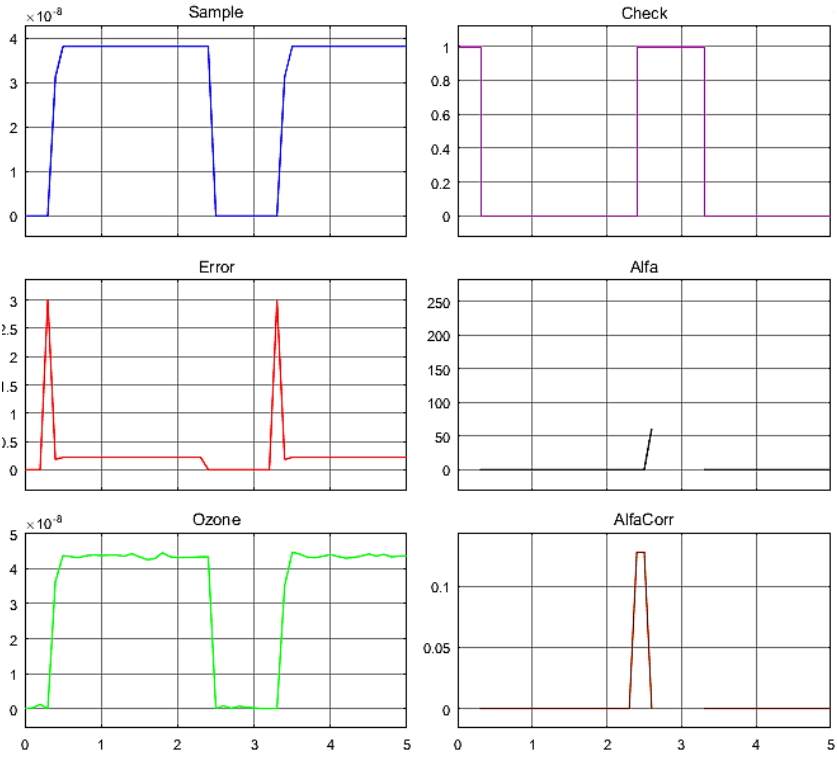


Рисунок 5.41 – Епюри сигналів при моделюванні завадостійкості при модуляції випромінювання:

Sample – вихідний сигнал опорного каналу;
Error – вихідний сигнал широкосмугового датчика;
Ozone – вихідний сигнал вимірювального каналу;
AlfaCorr – скориговане значення коефіцієнта поглинання;
Alfa – значення коефіцієнта поглинання;
Check – сигнал, що відповідає наявності
непрозорих макрочастинок у воді

проведено апроксимації отриманих даних за допомогою лінії тренду. Найбільшої збіжності теоретичної залежності й отриманих даних було досягнуто для поліноміальної лінії п'ятого ступеня. Отже, встановлено, що похибка вимірювань може бути задана як:

$$D = -0{,}0002\,f^5 + 0{,}0065\,f^4 - 0{,}0757\,f^3 + 0{,}3377\,f^2 - 0{,}0899\,f, \quad (5.13)$$

де f – частота модуляції випромінювання, Гц.

Оцінка точності апроксимації оцінювалась за допомогою коефіцієнта множинної кореляції $R^2 = 0{,}9947$. Це означає, що похибка апроксимації за допомогою (5.13) становить 0,53 %.

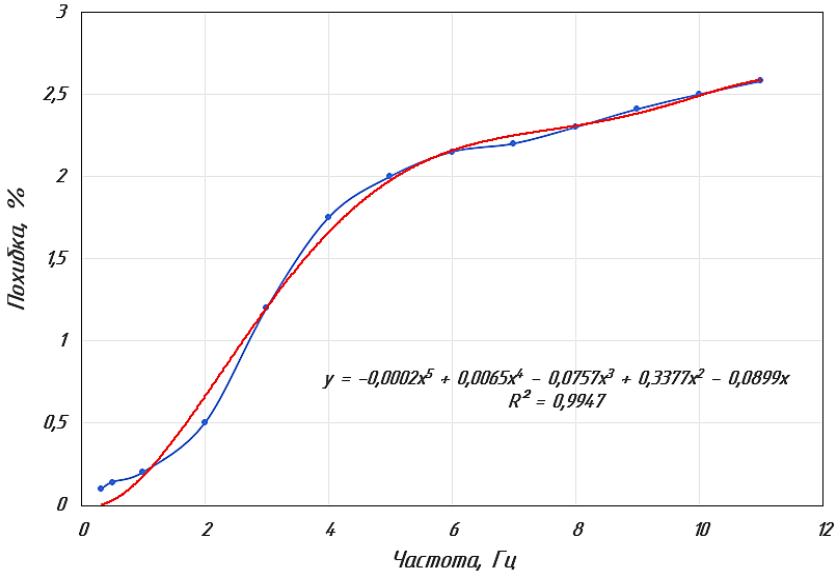


Рисунок 5.42 – Залежність величини похибки вимірювань від частоти модуляції випромінювання

5.5. Висновки

Показано, що є потреба в точних, надійних і специфічних щодо озону методах прямого вимірювання та датчиках для вимірювання концентрації озону в озонованій воді.

Розроблено фільтр Чебишева першого типу для моделі поглинання випромінювання молекулами озону в оптичному каналі датчика.

Розроблено візуально-блочну модель оптичного каналу абсорбційного датчика озону.

Запропоновано трипроменеву структуру датчика озону, для дослідження якої розроблено моделі основного, опорного та широкосмугового каналів.

Визначено структуру блоку обробки сигналів датчиків і режимів проведення вимірювання, що дає змогу мінімізувати величину похибки під дією випадкових завад.

Показано, що в діапазоні модуляції від 0,1 до 11 Гц похибка вимірювання концентрації озону зростає від 0,1 до 2,75 % за поліноміальною залежністю п'ятого ступеню від частоти.

6

ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ ІЗ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ В УМОВАХ ПРОМИСЛОВОСТІ

На сучасному етапі активно розвиваються технології Інтернету, і їх вплив на наше повсякдення надзвичайно помітний. Кількість підключених до глобальної мережі пристроїв щороку стрімко зростає. За розрахунками консалтингового підрозділу Cisco IBSG, наразі ми маємо понад 30 млрд підключених пристроїв, і ця цифра, за їхніми прогнозами, перевищить 50 млрд до 2025 р. Упродовж останніх п'яти років найпопулярнішими засобами зв'язку стали смартфони, які стали невід'ємною частиною нашого щоденного життя, сприяючи вирішенню різноманітних завдань. Потім йдуть планшети з мобільними операційними системами та сенсорним інтерфейсом. І коли Інтернет речей стане стандартом у промисловості, перед нами розкриються нові перспективи використання споживчих та бізнес-додатків.

Найпоширенішим способом доступу до мережі для пристроїв Інтернету речей та користувачів залишається бездротовий спосіб. Однак часто користувачам необхідно дбати про належну конфігурацію своєї мережі, її оптимізацію чи вирішення проблем із завадами, що стає актуальним у промислових умовах. У таких випадках приходять на допомогу спеціальні програми та апаратні рішення для сканування бездротових мереж. Стандартні засоби операційних систем і роутерів часто не надають достатньої інформації та можливостей для тонкої настройки, тому користувачі звертаються до зовнішнього програмного забезпечення. На ринку є велика кількість програм, призначених для роботи зі скануванням доступних мереж і сигналів, і вони різняться за ціною, яка може сягати 300 тис. грн. Однак різниця між ними не завжди є суттєвою. У різних продуктах можна спостерігати різний рівень уваги до інтерфейсу – деякі вражають якістю, тоді як інші залишають його стандартним. У деяких програмах

може бути корисна функція, а в інших її може бракувати, проте може виокремлюватися своєю особливістю. Незалежно від цього, результати роботи часто сводяться до створення таблиць із висновками щодо стану мереж та їх аналізу.

Основною метою цього дослідження є створення рішення, яке значно полегшить взаємодію з Wi-Fi мережами, використовуючи при цьому хмарні технології та маючи доступну ціну при порівнянні з аналогічними функціями.

6.1. Основні поняття та технології

Аналізатори бездротових мереж Wi-Fi представляють собою пристрої, програмне забезпечення або стаціонарні програмно-апаратні комплекси, спрямовані на вивчення та виправлення неполадок, що виникають у роботі бездротових мереж Wi-Fi стандартів 802.11 a/b/g/n/ac.

Аналізатор Wi-Fi проводить сканування радіочастотного спектру, ідентифікує всі доступні бездротові мережі, точки доступу, клієнтів Wi-Fi та подає докладну інформацію, включаючи назву мережі, типи шифрування, дані про рівні сигналу, перешкоди в каналах, виявлення несанкціонованих підключень та інші корисні відомості.

Застосування аналізатора Wi-Fi на етапі впровадження бездротової мережі дає змогу швидко оцінити рівень радіоперешкод та вибрати оптимальне розташування точок доступу для максимального охоплення. У випадку виникнення проблем у роботі Wi-Fi мережі, аналізатор радіочастотного спектру допомагає оперативно виявити та усунути джерела перешкод [96].

Є значна кількість багатофункціональних програмних рішень на ринку для роботи з великими бездротовими мережами, що дають змогу проводити комплексне тестування Wi-Fi. Проте, вартість багатьох із них може сягати сотень тисяч гривень (наприклад, Ekahau Connect Pack – Аналізатор Wi-Fi мережі з тестером SideKick – 319 998,90 грн) [97–98]. У випадках, коли необхідно отримати теплову карту Wi-Fi мережі за більш

доступними умовами, варто розглядати безкоштовні інструменти або розробки цільових пристроїв. Давайте розглянемо безкоштовні програми для діагностики Wi-Fi мереж.

У рамках аналізу розглянемо ряд безкоштовних програмних інструментів, більшість із яких призначені для операційних систем Windows, а інші підтримують macOS або Android. Ці інструменти надають базову інформацію про наявність Wi-Fi сигналів в області дії, зокрема ідентифікатори SSID, рівень сигналу, використовувані канали, MAC-адреси та типи захисту для кожної мережі. Деякі з них вміють виявляти приховані SSID, визначати рівні шуму або надавати статистику щодо успішно та неуспішно переданих пакетів у бездротовому з'єднанні. Важливо відзначити, що більшість описаних нижче інструментів є безкоштовними версіями комерційних продуктів від того самого постачальника, але з обмеженим функціоналом.

Першим у списку є Acrylic Wi-Fi Home, який є сканером бездротових локальних мереж та є спрощеною версією комерційного рішення Tarlogic Security. У версії 3.1, яку ми розглядаємо, цей інструмент вражає своєю деталізацією бездротового оточення та високо розвиненими графічними можливостями відображення зібраної інформації. Функціонал Acrylic Wi-Fi Home включає в себе огляд знайдених мереж Wi-Fi за стандартами 802.11 a/b/g/n/ac, виявлення несанкціонованих точок доступу та відображення підключених клієнтів, сканування та аналіз використовуваних бездротовими мережами каналів Wi-Fi на частотах 2,4 ГГц і 5 ГГц, а також побудову графіків рівня сигналу та його потужності для точок доступу Wi-Fi [96].

Wi-Fi сканер Acrylic Wi-Fi Home для операційної системи Windows надає можливість реального часу для сканування та перегляду доступних бездротових мереж. Він надає інформацію про виявлені Wi-Fi мережі, такі як ідентифікатори SSID і BSSID, тип захисту, а також відомості про бездротові пристрої, що в цей момент підключені до мережі. Крім того, програма дозволяє отримати список паролів Wi-Fi (встановлених за замовчуванням виробниками) завдяки вбудованій системі плагінів.

У якості безкоштовного продукту Acrylic Wi-Fi Home 3.1 має зручний та привабливий графічний інтерфейс. Детальний список SSID відображається у верхній частині вікна програми, де можна знайти інформацію, таку як рівень сигналу (RSSI) у негативних значеннях дБм, ідентифікація виробника, модель та MAC-адреса мережевих пристроїв. Програма також розпізнає ширину смуги пропускання, використовувану мережею, і відображає всі використовувані канали. Хоча вона не проводить пошук прихованих SSID, вона може відобразити їх, якщо виявить мережеві дані, які вказують на їхню наявність. Також Acrylic Wi-Fi Home має функціональність для інвентаризації роботи Wi-Fi мереж, дозволяючи призначати та зберігати імена виявлених SSID та/або клієнтів, хоча в безкоштовній версії ця можливість обмежена кількісно.

На нижній частині екрана програми за замовчуванням демонструється наочна рейтингова інформація за характеристиками мережі обраної SSID. Також тут розташований графік рівня сигналу та потужності всіх виявлених точок доступу. При переході в розширений режим відображення стану бездротових мереж ви отримаєте два додаткових графіка – для смуги 2,4 ГГц і 5 ГГц, – де одночасно відображається, як інформація про канали, у тому числі й об'єднані в один «широкий» канал, так і дані про рівень сигналу.

Виробляти експорт або збереження захоплених даних вкрай незручно, оскільки компанія-розробник програмного забезпечення вирішив надмірно урізати цю функціональність у безкоштовному рішенні: ви можете скопіювати не більше одного рядка даних у буфер обміну, а потім вставити текст у текстовий документ або електронну таблицю. Також є функція публікації скріншоту в Twitter.

Загалом Acrylic Wi-Fi Home є гарним програмним сканером WLAN, особливо, з огляду на те, що він нічого не вартий. Він збирає всю базову інформацію про ваш бездротовий простір і наочно демонструє отримані дані, як у текстовому, так і графічному вигляді, що чудово підходить для простих завдань діагностики Wi-Fi мереж. Основним недоліком цього рішення можна вважати

великі проблеми з експортом даних, вірніше, фактична відсутність такої можливості через урізаний самим виробником функціоналу в безоплатному рішенні.

Додаток AirScout Live від компанії Greenlee перетворить ваш Android-смартфон на зручний та портативний аналізатор Wi-Fi мережі. AirScout Live має сім режимів роботи, чотири з яких можна використовувати абсолютно безкоштовно без будь-яких обмежень для пристроїв Android. Комерційна версія, на відміну від безкоштовної, сумісна з більшістю настільних комп'ютерів (Windows) та мобільних пристроїв (Android та iOS). За допомогою базового функціоналу ви зможете швидко, мобільно і, що важливо, безкоштовно вирішувати проблеми, пов'язані з недостатнім рівнем сигналу Wi-Fi в деяких місцях вашого офісу чи будинку.

AirScout live покаже всі характеристики виявлених у радіусі дії точок доступу: від рівня сигналу та протоколів безпеки до можливостей обладнання. Дозволить визначити найменш завантажений канал, виміряти потужність сигналу в кожній точці Wi-Fi мережі та виявити місця з недостатнім рівнем сигналу. Допоможе визначити джерела перешкод шляхом аналізу параметрів використання каналів у смузі 2,4 ГГц та 5 ГГц. Використовуючи програму, можна вибрати оптимальне місце для розташування точок доступу, щоб забезпечити якісне покриття приміщень Wi-Fi мережею та налаштувати її на максимальну продуктивність, не купуючи додаткового обладнання. Крім того, програма AirScout дає змогу робити знімки мережі Wi-Fi і зберігати локально або завантажувати їх у хмару.

AirScout Live – це дуже простий у використанні інструмент, який не вимагає додаткового навчання. Його інтерфейс користувача має привабливий та інтуїтивно зрозумілий вигляд. Перші два пункти меню – «Графік Точок Доступу» й «Таблиця Точок Доступу» – забезпечать наочну та вичерпну інформацію про характеристики всіх точок доступу, які знаходяться в зоні видимості.

Графіки покриття точок доступу візуально демонструють залежність рівня сигналу та завантаженості каналів у смузі 2,4 ГГц та 5 ГГц для кожної з них. Розширена

інформація в табличному форматі про кожну точку доступу (SSID, MAC-адреса, виробника обладнання, канал, ширину каналу, рівень сигналу в дБм та налаштування безпеки) доступна в другому за порядком пункті меню.

Пункт «Графік часу» дає змогу вам переглядати всі точки доступу, виявлені вашим Android-пристроєм у спостережуваному місці, та їх графік зміни рівня сигналу в дБм відносно часу. Наприклад, при дослідженні мережі із кількома точками доступу ця інформація допоможе зрозуміти, як буде змінюватися рівень сигналу кожної точки доступу в заданому місці та як клієнтський пристрій буде перемикатися між ними. Вибір конкретної точки доступу підсвічує рівень сигналу, полегшуючи візуальне сприйняття інформації.

Пункт «Потужність сигналу» дасть змогу наочно протестувати рівень сигналу кожної точки доступу протягом часу. Ви можете вибрати конкретний SSID та побачити поточний, а також мінімальний та максимальний рівень сигналу, зафіксований пристроєм для цієї точки доступу. Оригінальна інтерпретація отриманих результатів у вигляді червоно-жовто-зеленого спідометра дозволить наочно переконатися, чи працюватиме та чи інша функція в цьому конкретному місці чи ні. Наприклад, стабільне знаходження рівня сигналу в зеленій зоні вам скаже, що тут у вас не виникне проблем із такими ресурсомісткими технологіями, як передача голосу через IP або передача потокового відео у форматі Full HD. Знаходження в жовтій зоні скаже про доступність лише вебсерфінгу. Ну, а червона зона означатиме великі проблеми із прийомом сигналу від цієї точки доступу в цьому місці.

Для використання додаткових функцій, які не доступні в безкоштовній версії програмного забезпечення без додаткового обладнання (виявлення найбільш поширених проблем: субоптимальне покриття сигналу або неправильний вибір каналу; визначення джерел перешкод, у тому числі і від «не-Wi-Fi» пристроїв; оптимізація конфігурацій Wi-Fi мереж, сусідніх із мережами стандарту 802.15.4, налаштування продуктивності Wi-Fi шляхом порівняння параметрів інтенсивності сигналу та його використання, тест швидкості Ookla та багато іншого) вам знадобиться

контролер AirScout або комплект, що включає контролер та віддалені клієнти.

AirScout Live – це чудова програма, яка насамперед приваблює своєю мобільністю. Погодьтеся, мати інструмент, який завжди буде під рукою, дорогого вартує. У безкоштовній версії продукту вам доступна вся необхідна інформація, яка може знадобитися для швидкого аналізу стану невеликих офісних або домашніх мереж Wi-Fi та виявлення базових проблем із їх продуктивністю. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та грамотне графічне оформлення отриманих результатів виміру не тільки залишають гарне враження, а і сприяють прискоренню роботи з додатком.

Ekahau HeatMapper – це картографічний програмний інструмент для розгортання невеликих бездротових мереж рівня будинку та визначення оптимального розташування установки точки доступу. Це спрощена безкоштовна версія професійних рішень компанії Ekahau. Цей програмний продукт надає таку ж мережну інформацію, як і Wi-Fi сканер бездротових мереж, але при цьому ще й генерує теплову Wi-Fi карту, щоб ви могли візуалізувати рівні сигналів. У рамках цього огляду йтиметься про версію 1.1.4.

Програмне забезпечення пропонує можливість створення плану або макета об'єкта, що досліджується, а також проєктування топології бездротової мережі координатною сіткою для приблизного орієнтування.

На лівій стороні основного екрана інтерфейсу користувача відображається список бездротових мереж та їх дані, які сортуються за сигналом, каналом, SSID, MAC-адресою і типом захисту. Цей список включає основну інформацію, але не містить значень рівня сигналу в дБм і відсотковому співвідношенні. Крім того, програма не розпізнає мережі з підтримкою стандарту 802.11ac, визначаючи їх як 802.11n.

Використовуючи Ekahau HeatMapper, як і при роботі з іншими картографічними інструментами, ви позначаєте своє поточне місцезнаходження на карті, поки ви обходите будівлю, щоб згенерувати теплову карту покриття Wi-Fi. Ekahau HeatMapper автоматично обчислить розташування точок доступу та розмістить

їх на карті. Після того, як усі дані буде зібрано, сформується інтерактивна теплова карта покриття Wi-Fi. Так, наприклад, при наведенні курсору на іконку точки доступу окремо підсвічуватиметься її покриття; а при наведенні курсору на область теплової карти з'явиться спливаюче вікно підказки для показника рівня сигналу з негативним значенням дБм для цієї точки.

За відгуками, програмне рішення Ekahau HeatMapper визнається як досить спрощений картографічний Wi-Fi сканер, особливо у безкоштовній версії, де виробники вирішили залишити майже весь додатковий функціонал, зробивши його призначеним в основному для домашнього використання. Єдина доступна можливість для експорту або збереження – це просто зробити скріншот карти. Тим не менш, його можна використовувати для невеликих мереж або для отримання базового уявлення про роботу професійніших інструментів на основі карт.

Порівняно із цим, програма NetSpot (доступна для Windows та macOS) є більш функціональним рішенням для дослідження, аналізу та покращення Wi-Fi мереж. У комерційній версії використовується картографічний інструментарій для теплової візуалізації зон покриття, але в безкоштовній версії для домашнього використання це недоступно. Тим не менше, NetSpot Free версії 2.8, яку ми розглядаємо в цьому огляді, добре справляється із завданнями виявлення Wi-Fi мереж, хоч і не підтримує роботу з прихованими мережами. Варто відзначити, що безкоштовна версія NetSpot має обмежену функціональність, включаючи відсутність візуалізацій та неможливість використовувати теплову карту, а також відсутність можливості експорту.

Отже, проведення лише приблизних розрахунків потужності поля за обмеженою кількістю точок і прогнозування на основі математичних обчислень може призвести до неточностей, оскільки не враховуються матеріал стін, їх поглиблення сигналу Wi-Fi та інші чинники. Більшість програм, які використовують цей підхід, платні та не завжди підтримують усі операційні системи, частіше підходять для IPad, IPhone та MacOS.

Додатково, розглядаючи обмежену візуалізацію у 2D без можливості вимірювання та обробки у 3D, стає зрозумілим, що

ці рішення не забезпечують повноцінного та універсального підходу, особливо для систем на ОС Android.

З огляду на недоліки безкоштовних рішень, розглянемо альтернативні шляхи вирішення питання отримання теплових карт.

6.2. Технології навігації всередині приміщення

Для багатьох організацій важливо вирішити завдання створення системи навігації всередині приміщень, особливо, якщо організація розташована в кількох будівлях та має складну структуру. Використання навігаційного сервісу може значно спростити пошук та побудову маршруту для відвідувачів та персоналу. Для реалізації дипломної роботи важливо вирішити питання побудови теплових карт розподілу Wi-Fi сигналу [99].

На ринку навігаційних сервісів уже є безліч компаній, що пропонують свої послуги зі створення та розгортання подібних систем. Проте, досі немає єдиного найкращого підходу для визначення координат користувача всередині приміщень. Є новаторські рішення, такі як технології, що використовують виявлення магнітних аномалій, представлені, наприклад, компанією IndoorAtlas [100]. Це свідчить про необхідність дослідження доступних технологій та рішень для побудови карт розподілу Wi-Fi сигналу. Літературний огляд можна представити у вигляді таких результатів: у [99] описані результати дослідження ринку навігаційних сервісів та актуальність проблеми indoor-навігації, рішення деяких популярних компаній представлені у [100; 103–106], у [101] – компанія, зацікавлена у вирішенні проблеми навігації всередині приміщень, специфікації різних протоколів для роботи з BLE-маяками представлені в [106; 107], у статті [108] виводиться залежність показника рівня сигналу, що приймається, від відстані між приймачем і випромінювачем, у [109] розповідається про застосування алгоритму трилатерації до задачі навігації, а також наводяться деякі способи вирішення проблеми трилатерації в просторі. Стаття [110] є оригінальною статтею Рудольфа Калмана, де він описує популярний фільтр

Калмана. У [112] міститься повна інформація про використовуваний SDK від компанії Accent Systems, а про саму компанію можна дізнатися у [111; 113] містить статистику про пристрої Android за різними критеріями, а [114] – репозиторій з усією необхідною інформацією про бібліотеку trilateration. У роботі [115] описується застосування алгоритму Левенберга – Марквардта для вирішення систем рівнянь методом найменших квадратів.

На ринку навігаційних послуг уже є декілька компаній і стартапів, які пропонують рішення в галузі indoor-навігації. Вони використовують різні підходи, включно з GPS, Wi-Fi, Bluetooth, магнітометрію, камери мобільних пристроїв та ІНС на базі інерційних датчиків. Деякі компанії також виробляють обладнання для своїх рішень.

Зазвичай, використання послуг таких компаній супроводжується високою вартістю та труднощами інтеграції з іншими технологіями. Це може бути проблемою для організацій, які потребують систем визначення координат усередині приміщень.

Єдиним показником для визначення відстані до пристрою, який використовується, є RSSI.

Залежність RSSI від відстані виводиться з формули передачі Фрііса (Friis) і має такий вигляд [105]:

$$Pd = P_0 - 10 - n \times lg\ (d / d_0), \tag{6.1}$$

де Pd – RSSI (dBm), P_0 – потужність сигналу, виміряна з відривом d_0, n – коефіцієнт втрат потужності сигналу від 2 до 4 для повітря (залежно від наявності перешкод), lg – десятковий логарифм, d – відстань до передавача, d_0 – калібрувальна відстань, на якій проводилося вимірювання потужності P_0 (наприклад, 1 м).

Отже, рівняння для розрахунку відстані виглядає так:

$$d = d0 - 10^{(P0 - Pd)/10 \times n}. \tag{6.2}$$

Отже, наявне рішення на основі Bluetooth дає змогу визначати розташування користувача з похибкою, що сягає до 2 м [116]. Після аналізу результатів можна зробити висновок щодо необхідності розробки власної системи навігації всередині приміщень. Оскільки похибка, яку можна отримати при

використанні описаної технології, сягає до 2 м, це може еквівалентувати довжині робочого столу користувача, що може призвести до неточностей у розташуванні та спаду швидкості з'єднання.

У подальшому планується розробка прототипу пристрою на основі мікропроцесора ESP8266, що дозволить користувачеві визначати своє місце розташування всередині приміщення в ручному режимі. Основною технологією візуалізації запропоновано використання хмарних технологій.

Чіп ESP8266EX від компанії Espressif – це високоінтегроване Wi-Fi SoC рішення, яке задовольняє вимоги індустрії Інтернету речей у низькому енергоспоживанні, компактності та надійності, підтримуючи режими 802.11 b/g/n/d/e/i/k/r. Маючи повноцінний Wi-Fi та мережевий стек, чіп ESP8266EX може як виконувати програми самостійно, так і працювати під керуванням зовнішнього мікроконтролера. Працюючи самостійно, ESP8266EX виконує програму, завантажуючи її із зовнішньої флеш-пам'яті. Вбудований високошвидкісний кеш підвищує продуктивність системи та дозволяє ефективно використовувати оперативну пам'ять. Працюючи під керуванням зовнішнього мікроконтролера, ESP8266EX може виступати в ролі Wi-Fi адаптера, передаючи дані через SPI, SDIO, I2C чи UART інтерфейси.

ESP8266EX містить антенний перемикач, узгоджуючий трансформатор, підсилювач потужності, малошумливий підсилювач, фільтри, модулі керування живленням. Компактна конструкція та високий ступінь інтеграції дають змогу мінімізувати розмір друкованої плати та кількість зовнішніх компонентів.

ESP8266EX містить розширену версію 32-бітного процесора Lx106 фірми Tensilica серії Diamond та вбудовану оперативну пам'ять (SRAM). Він може бути з'єднаний із зовнішніми датчиками та іншими пристроями через інтерфейси введення / виведення загального призначення (GPIO). Пакет програм для розробки програм (SDK) містить зразки програм для різноманітних застосувань.

Smart Connectivity Platform (ESCP) компанії Espressif Systems забезпечує складні функції, включно з швидким переходом між режимом сну та режимом пробудження для цілей

енергоефективності, адаптивне підстроювання радіо тракту для роботи з низьким енергоспоживанням, удосконалену обробку сигналу, придушення паразитних сигналів та механізм радіопередачі для стільникового зв'язку, Bluetooth, DDR, LVDS, пом'якшення LCD перешкод.

Є безліч модифікацій плат, які називаються зазвичай від ESP-01 до ESP-12. Сьогодні вже з'явилися ще інші назви плат від сторонніх розробників. Відмінності в платах полягає в основному в портах вводу-виводу, кількості флеш-пам'яті, виду конекторів тощо. Процесор – той самий, отже, з погляду програмування немає значення, яку плату програмувати.

Специфікація ESP8266:

– напруга живлення: 3,3 В;
– енергоспоживання: 10 мкА – 170 мА;
– флеш-пам'ять: до 16 мб максимум (зазвичай 512 кб);
– процесор: Tensilica L106, 32 біта;
– швидкість процесора: 80–160 МГц;
– ОЗП: 32 кб+80 кб;
– порти введення-виведення загального призначення: 17 (мультиплексовані з іншими функціями);
– максимальна кількість підключень TCP: 5.

ESP8266EX має 17 виводів GPIO, які можуть бути призначені для різних функцій шляхом програмування відповідних регістрів [117].

Кожен GPIO є двоспрямованим та неінвертованим, має внутрішні підтяжки на напругу живлення або на землю, і може бути переведений у стан із високим імпедансом. Коли GPIO налаштовано як вхід, вхідні значення можуть бути прочитані з регістрів. Вхід також може бути використаний як джерело переривань за рівнем або перепадом напруги.

Ці виводи можуть бути поєднані з іншими функціями, такими як I2C, I2S, UART, PWM, IR тощо.

Отже, модуль є закінченим функціональним пристроєм, який здатний використовуючи технології хмарних обчислень, (наприклад, thingspeak.com) побудувати теплову карту розподілу поля Wi-Fi мереж.

Для отримання координат у процесі вимірювання на етапі тестуванні пропонується ручний режим за допомогою кнопок.

Надалі планується робота щодо поліпшення пристрою, збільшення точності обчислень та значне розширення функціоналу. Для зменшення похибки планується розробити рішення на основі використання сучасних датчиків.

6.3. Публічні хмарні сервери для візуалізації інформації від IoT-пристроїв

Мікроконтролер не може самостійно візуалізувати теплову карту, яка нам потрібна для оцінювання рівня сигналу. Для вирішення цього питання будемо використовувати якийсь сервер-посередник, який прийматиме повідомлення від пристрою і передаватиме їх користувачу, і навпаки. Крім того, на сервер також лягає завдання відображати теплову карту. Звичайно, є варіанти і прямого зв'язку, але вони не розглядаються через складність реалізації.

Проведемо аналіз і структуруємо можливості тих чи інших безкоштовних сервісів, які допоможуть вирішити поставлене завдання.

Сервіс ThingSpeak це відкрита IoT-платформа із MATLAB-аналітикою. Сервіс компанії Math Works, створений для Інтернету речей, тісно пов'язаний із продуктами Math Works (MATLAB). ThingSpeak – це служба аналітичної платформи IoT, яка дозволяє збирати, візуалізувати та аналізувати потоки даних у реальному часі в хмарі. Ви можете надсилати дані до ThingSpeak зі своїх пристроїв, створювати миттєві візуалізації даних у реальному часі та надсилати оповіщення за допомогою вебсервісів, таких як Twitter та Twilio. Завдяки аналітиці MATLAB усередині ThingSpeak ви можете писати та виконувати код MATLAB для виконання попередньої обробки, візуалізації та аналізу. ThingSpeak доступний як безкоштовний сервіс для некомерційних невеликих проєктів (<3 млн повідомлень на рік або ~8200 повідомлень на день). Сервіс дає змогу накопичувати

дані в своїх сховищах, після чого їх можна зручно переглядати у вигляді графіків [118; 119].

З особливостей сервісу він має інтеграцію з MatLab Analytics з підтримкою скриптів MatLab. У безкоштовному обліковому записі сервіс дає змогу створювати до чотирьох каналів, у кожному з каналів можна зберігати до 8 полів із різними даними. Ще в безкоштовному акаунті є ще одне обмеження – не можна публікувати дані частіше одного разу на 15 с (рекомендується пауза у 20 с), це як би «захист» від перевищення ліміту 8200 повідомлень на день.

У принципі, пристроям легко вписатися в цей ліміт для цього завдання. Є кілька програм – клієнтів для Android, але набагато менше, ніж для MQTT.

Отже, робимо висновок о використанні сервісу ThingSpeak для обробки отриманих даних та подальшого отримання теплових карт розповсюдження сигналу.

Отримана теплова карта у відносних одиницях потужності сигналу після проведення виміру приведена на рис. 6.1.

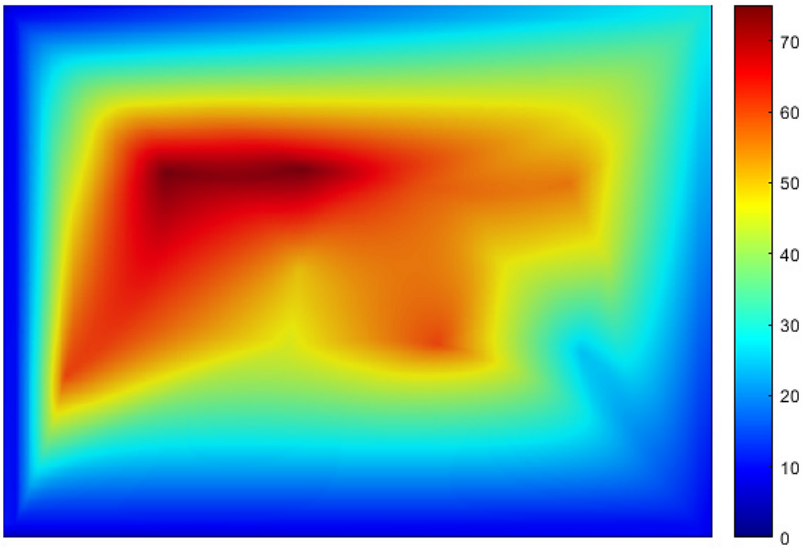


Рисунок 6.1 – Теплова карта радіосигналу Wi-Fi мережі

У роботі було розроблено прототип пристрою на основі мікропроцесора ESP8622. Як основна технологія візуалізації пропонується використання хмарних технологій. Використовуючи макроси MatLab отримано візуалізацію теплових карт Wi-Fi сигналу.

ВИСНОВКИ

Монографія містить результати науково-дослідних робіт які проводилися за напрямками сучасної електроніки, щодо енергозберігаючих технологій (фотовольтаїка, вітроенергетика, використання мікроконтролерів), розроблення логічного пристрою для кодування і передачі оптичної двійкової інформації, моделюванню і розроблення конструкції датчика концентрації озону в озонованої воді, моделюванню деградації підсилювальних властивостей тестових NPN-структур ІС при різних дозах α-опромінення.

На цей момент енергозбереження стало основним і найефективнішим способом розвитку сучасної світової енергетики. Одним із напрямків, покликаним у майбутньому замінити традиційні види палива, є перехід на енергозберігаючі технології в рамках використання поновлюваних джерел енергії, серед яких сонячна енергетика найпоширеніша на планеті, оскільки в процесі вироблення електрики, а при необхідності ще й тепла для обігріву житлових приміщень і подачі гарячої води, використовують невичерпне джерело енергії – сонячне світло. На сьогодні є зростаючий попит на використання альтернативних джерел енергії в народному господарстві, промисловості та побуті.

Потенційні можливості джерел відновлюваної енергії можна наближено оцінити припускаючи, що при раціональному її використанні для створення комфортних умов життя потрібно в середньому 2 кВт на людину. З кожного квадратного метра земної поверхні можна одержувати, використовуючи різні фотоелектричні перетворювачі (ФЕП), у середньому 500 Вт потужності. Якщо вважати, що ефективність перетворення цієї енергії в зручну для споживання форму всього 4 %, то для потужності 2 кВт потрібна площа 100 м^2. Середня щільність населення в містах з урахуванням приміської зони приблизно 500 осіб на 1 км^2. Для забезпечення їх енергією з розрахунку 2 кВт на людину необхідно з 1 км^2 знімати 1000 кВт, тобто достатньо зайняти всього 5 % площі. Отже, фотоелементи можуть цілком забезпечити задовільний рівень життя, якщо будуть знайдені прийнятні за вартістю методи її перетворювання, з урахуванням ресурсного потенціалу.

Перевагами використання фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), поряд із відсутністю викидів забруднюючих сполук, економії корисного палива, є понижені експлуатаційні витрати, модульний принцип збирання фотовольтаїчної системи, достатньо тривалий термін служби. Однак присутні й суттєві недоліки, як конструктивні, що стосуються технології виготовлення ФЕП, так і пов'язані з використаними матеріалами, високою питомою вартістю конструкції, залежністю роботи від погодних умов, негативних зовнішніх факторів (температура, опромінювання вторинними атмосферними нейтронами і т. ін.). Авторами проаналізовано причини підвищення енергоефективності ФЕП та запропоновано низку заходів, що сприятимуть її підвищенню, а саме – формування епітаксійного n^+-шару, формування подвійного прозорого просвітлюючого шару $In_2O_3+SnO_2$, зниження питомого опору шарів In_2O_3/SnO_2 та оптимізація контактного рисунку.

Для кодування оптичної двійкової інформації використовуються оптичні логічні пристрої, які володіють трьома та чотирма стійкими станами, залежно від типу модуляції зовнішнього сигналу. Формування стійких режимів поглинання та випромінювання в резонаторі залежить від статичних характеристик випадкового поля, поданого на вхід резонатора.

Проведено дослідження біфуркацій у середовищі дворівневих атомів, що знаходяться в резонаторі, який збуджується випадковим імпульсним полем. Відмічається, що оптичні нелінійні пристрої, які базуються на фізичних процесах, пов'язаних із властивостями оптичних електронів, набагато менше чутливі до електромагнітного імпульсу, який виникає при ядерному вибуху і призводить до виводу із ладу на довгий час сучасної напівпровідникової апаратури. Розроблено модель, яка встановлює зв'язок розподілу амплітуд поля резонатора зі стійкими режимами поглинання слабкого та сильного полів. Виявлено ефекти мультистабільності, пов'язані зі стохастичним збудженням резонатора. Запропоновано пристрої оптичної логіки, що основані на ефектах мільтистабільності у випадковому полі.

Вітроенергетична установка являє собою послідовний тракт перетворення енергії, що включає в себе вітротурбіну, механічну

передачу, електричний генератор та електрообладнання, що забезпечує заданий режим роботи генератора і відповідні параметри електричної енергії на виході вітроелектрогенеруючої системи. Однією з ланок енергетичного тракту є мультиплікатор. Його основною функцією є узгодження параметрів потоку механічної енергії, що передається від вітротурбіни до генератора. З погляду забезпечення вимог механічної міцності та граничних значень швидкості повітряного потоку, що обдуває лопаті, вітротурбіна мусить мати відносно невелику кутову швидкість обертання. Особливо це стосується ВЕУ великої потужності, які мають великі розміри. І напроти, з погляду зниження маси та габаритів, генератор мусить мати велику кутову швидкість. Узгодження малої та великої кутової швидкості і виконує мультиплікатор. Але застосування мультиплікатора має свої недоліки. Для подолання цих недоліків деякі фірми-виробники ВЕУ почали використовувати тихохідні генератори з безпосереднім механічним зв'язком із вітротурбіною. Природно, недоліком цього класу ВЕУ є велика матеріалоємність та маса генератора. Причому, треба зазначити, що збільшення маси генератора призводить до додаткового збільшення матеріалоємності всієї ВЕУ за рахунок збільшення навантаження на несучі конструкції. Одним з альтернативних шляхів подолання технічного протиріччя між прагненням позбутися мультиплікатора та прагненням підвищити масогабаритні показники генератора є застосування концепції аеродинамічного мультиплікування, що пропонується авторами.

В умовах стрімкого розвитку систем відеоспостереження та відеофіксації промислових процесів актуальним питанням є дослідження щодо використання сучасних джерел світла. Наприклад, для фотофіксації в умовах слабкого освітлення цехів потрібно обов'язково використовувати фотоспалах. Впровадження нових технологій світлодіодного освітлення поступово практично повністю замінить традиційні світильники у всьому світі, але питання застосування світлодіодів у фотоспалахах залишається відкритим, що і стало метою дослідження авторів. Було показано, що перегрів світлодіода істотно скорочує ресурс роботи, і єдиною гарантією від перегріву

напівпровідникового випромінювача є заходи щодо обмеження зростання температури. При ігноруванні питань, пов'язаних із застосуванням активного або пасивного охолодження, використання світлодіодів у фотоспалаху не раціонально і призводить до збільшення габаритів самої конструкції в порівнянні з лампами. Розраховано потужність імпульсу для типового спалаху (приблизно 3 кВт), що дало дані для проєктування світлодіодного спалаху та порівняння показників.

Якщо брати типові світлодіоди, то для отримання світлового потоку рівної потужності потрібно приблизно 300 шт. Цей факт значно ускладнює реалізацію спалаху, тому що потрібна послідовно-паралельна з'єднання світлодіодів, а це радикально знижує надійність усього спалаху загалом. Ці фактори не дають змогу рекомендувати використовувати на момент проведення дослідження світлодіоди у якості фотоспалаху.

Але, з огляду на такі патентовані розробки, як віддалений люмінофор, у перспективі можна зменшити недоліки світлодіодів у порівнянні з лампами, але поки що не виключити їх повністю, маючи на увазі деградацію.

Отже, використання світлодіодів рекомендовано на сьогодні виключно як джерело освітлення з урахуванням температурного режиму, який не буде перевищувати 50° в умовах промислових процесів. А виконання цієї умови іноді може ускладнюватися технологічним процесом.

На сьогодні є потреба в точних, надійних і специфічних відносно озону методах та датчиках прямого вимірювання концентрації озону в озонованій воді. Відрізняють специфічні методи (поглинання ультрафіолетових променів, десорбції та виявлення газової фази, метод індиго, амперометрично-мембранний метод), та неспецифічні для озону методи – метод йодистого калію, простий амперометричний метод.

Проведено дослідження, щодо синтезу моделі вимірювального тракту системи визначення концентрації озону у воді. У якості джерела випромінювання обрано УФ-світлодіод CUD5GF1A з максимумом випромінювальної характеристики на довжині хвилі 255 нм, що відповідає піку поглинання

озону в смузі Хартлі, відібрано HIX-фільтри і використано блок Light-EmittingDiode з бібліотеки Simulink – Simscape / Electric / Sensors&Transducers. Запропоновано трипроменеву структуру датчика озону, для дослідження якої розроблено моделі основного, опорного та широкосмугового каналів. Розроблено фільтр Чебишева першого типу для моделі поглинання випромінювання молекулами озону в оптичному каналі датчика. Розроблено візуально-блочну модель оптичного каналу абсорбційного датчика озону. Визначено структуру блоку обробки сигналів датчиків і режимів проведення вимірювання, що дає змогу мінімізувати величину похибки під дією випадкових завад. Встановлено, що в діапазоні модуляції від 0,1 до 11 Гц похибка вимірювання концентрації озону зростає від 0,1 до 2,75 % за поліноміальною залежністю п'ятого ступеню від частоти.

Вирішення наукових проблем, прикладних завдань із використанням космічних апаратів (КА) доцільно та економічно виправдано лише у разі їх тривалої безаварійної експлуатації. Це можливо при застосуванні ІС з високою стійкістю до радіації, оскільки значні потенційні ризики з метою забезпечення надійної експлуатації КА, що визначають ресурс роботи бортової радіоелектронної апаратури (БРЕА) КА, пов'язані з несприятливими факторами космічного простору. Основним фактором ризику для БРЕА КА є радіаційні впливи потоків заряджених частинок радіаційних поясів Землі (переважно протонів та електронів) на технологічні системи КА. Виникають збої та відмови в роботі електронних схем, деградація сонячних батарей та інші позаштатні режими роботи КА.

Запропонована методика обробки експериментальних результатів дослідження характеру радіаційної деградації тестових вертикальних NPN-структур ІС, вироблених із використанням технології «кремній із діелектричною ізоляцією» (КСДІ) на монокристалічних пластинах Si n-типу (CZ n-Si<P>) при застосуванні α-опромінення. Опромінення α-частинками здійснювалася безпосередньо на пластинах із тестовими транзисторними NPN-структурами після нанесення металізації, з подальшим вимірюванням коефіцієнта підсилювання за током до та після

опромінення. Використана спеціально розроблена та виготовлена лабораторна установка, у якій застосовані радіоізотопні джерела типу АІП-Н (80 % ^{238}Pu, 15,8 % ^{239}Pu, максимальна активність ізотопів плутонію в джерелі 3×10^{8} Бк ($8{,}1\times10^{-3}$ Кі). Вимірювання коефіцієнтів посилення струму ($h_{21\text{E}}$) проводилися із застосуванням вимірювача статичних вольт-амперних характеристик планарних NPN-структур, підключеного до стандартної багатозондової установки.

Показана можливість застосування методики дослідження радіаційної деградації $h_{21\text{E}}$ тестових NPN-структур ІС, що включає опромінення транзисторних структур α-частинками з енергією ≅4,5 МеВ та апроксимацію експериментальних результатів нелінійними залежностями в обчислювальному середовищі OriginPRO.

Передбачається ефективне застосування запропонованої методики для порівняльного аналізу радіаційної стійкості NPN-структур, виготовлених із застосуванням різноманітних технологій.

Технології електроніки та реалізація їх досягнень у приладових структурах та електронних системах – одна з галузей сучасної промисловості, що найбільш бурхливо розвиваються. З кожним новим поколінням інтегральних схем, силових напівпровідникових приладів, фотовольтаїчних та вітрогенеруючих систем, квантових генераторів створюються принципово нові підходи до технологій виробництва, що відображають останні досягнення науки. Авторський колектив цієї монографії поставив перед собою завдання в досить доступній формі, але на достатньо високому рівні продемонструвати галузь наукових інтересів колективу кафедри мікроелектронних та електронних інформаційних систем.

Автори не тільки відобразили рівень сучасних уявлень, але й відобразили переваги та недоліки кожного технологічного спрямування або методу, оцінили перспективність тих чи інших процесів та їх роль у подальшому розвитку електроніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Морозова Е. И., Безродных И. П., Семенов В. Т. Радиационные факторы риска для космических аппаратов. *Вопросы электромеханики*. 2009. Т. 112. С. 35–40.

2. Соловьев А. В. Исследование и разработка конструктивно-технологических методов улучшения электрических характеристик радиационно-стойких интегральных микросхем в условиях серийного производства. Специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-, наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» : автореферат дисс. кандидата технич. наук. Москва, 2018.

3. Mazur J. E. An Overview of the Space Radiation Environment. Crosslink. The Aerospace Corporation Magazine of advances in aerospace technology. Summer 2003. Vol. 4, No. 2. P. 12–16.

4. Абрамешин А. Е. Методология проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с учётом воздействия поражающих факторов электризации. Специальность 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» : Диссертация … доктора технических наук ; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Москва, 2017.

5. Радиационная стойкость биполярных транзисторов : учебное пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств». Научно-образовательный центр Московского региона в области фундаментальных проблем радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения. НОЦ – Московский государственный институт электроники и математики. Составители: Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. Москва, 1999. 101 стр.

6. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. Москва : НИЯУ МИФИ, 2010. 149 с.

7. Интегральное радиационное изменение параметров полупроводниковых материалов : учебное пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств». Научно-образовательный центр Московского региона в области фундаментальных проблем радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения. НОЦ – Московский государственный институт электроники

и математики. Составители: Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. Москва, 1998. 94 стр.

8. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов : учебное пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств». Научно-образовательный центр Московского региона в области фундаментальных проблем радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения. НОЦ – Московский государственный институт электроники и математики. Составители: Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. Москва, 2001. 70 стр.

9. Радиационные эффекты в космосе. Часть 3. Влияние ионизирующего излучения на изделия электронной техники / И. П. Безродных, А. П. Тютнев, В. Т. Семёнов. Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. 64 с.

10. Грабчиков С. С. Материалы электромагнитной и радиационной защиты для изделий электроники. *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* 2018. Т. 63, № 1. С. 7–14.

11. Моделирование пробегов и потерь энергии высокоэнергетических ионов в однослойных и многослойных материалах / С. С. Грабчиков [и др.]. *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. 2020. Т. 65, № 1. С. 25–34. DOI: https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-25-34

12. Безродных И. П., Морозова Е. И., Петрукович А. А., Казанцев С. Г., Кочетов И. В., Семенов В. Т. Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчёта. *Вопросы электромеханики*. 2011. Т. 120. С. 37–44.

13. Комнатнов М. Е. Анализ эффективности экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата и создание устройств для испытаний на электромагнитную совместимость. Специальности: 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»; 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» : автореф. дисс. … канд. технич. наук. Томск, 2016.

14. Budroweit J., Patscheider H. Risk Assessment for the Use of COTS Devices in Space Systems under Consideration of Radiation Effects. *Electronics*. 2021. V. 10. P. 1008. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics10091008

15. Иевлев В. И., Филиппов Г. А. Качество и надежность электронной компонентной базы ЭВМ специального назначения : учебное пособие. Екатеринбург : УрФУ, 2013. 102 с.

16. Севастьянов Н. Н., Андреев А. И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации / под общ. ред. Н. Н. Севастьянова. Томск : Издательский Дом ТГУ, 2015. 266 с.

17. Боровиков С. М., Шнейдеров Е. Н., Бересневич А. И., Казючиц В. О. Индивидуальное прогнозирование надежности биполярных транзисторов с использованием электрического напряжения в качестве имитационного фактора. Доклады БГУИР. 2020. № 18 (5). С. 80–88.

18. Павлов П. Г., Чан Туан Чунг, Костров А. И., Нелаев В. В., Стемпицкий В. Р. Предварительная обработка экспериментальных данных в статистическом проектировании изделий микроэлектроники. Доклады БГУИР. 2013. № 2 (72). С. 14–20.

19. Мискевич С. А. Моделирование работы биполярных транзисторов в условиях радиационного облучения. [Электронный ресурс]. URL: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/159747/1/Мискевич.pdf

20. Мискевич С. А., Комаров Ф. Ф., Комаров А. Ф., Заяц Г. М., Ювченко В. Н. Влияние ионизирующего излучения на характеристики приборов полупроводниковой электроники. Взаимодействие излучений с твердым телом=Interaction of Radiation with Solids : материалы 13-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 30 сент. – 3 окт. 2019 г. / редкол.: В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]. Минск : БГУ, 2019. С. 163–165. [Электронный ресурс]. URL: https://elib.bsu.by/handle/123456789/233899

21. Dielectric Isolation in Integrated Circuits. [Электронный ресурс]. URL: https://www.circuitstoday.com/dielectric-isolation

22. Свистова Т. В. Основы микроэлектроники : учеб. пособие. [Электронный ресурс]. Электрон. текстовые и граф. Данные (2,6 Мб). Воронеж : ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017.

23. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование : учеб. пособие для вузов по спец. «Конструирование и производство радиоаппаратуры» и «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры» / Л. А. Коледов, В. А. Волков, Н. И. Докучаев и др. ; под ред. Л. А. Коледова. Москва : Высш. шк., 1984. 231 с.

24. Светличный А. М., Наумченко А. С., Светличная Л. А., Житяев И. Л. Методы изоляции элементов микро- и наноструктур : учебное пособие. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2014. 56 с.

25. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость : учебное пособие по дисциплине «Радиационная стойкость изделий электронной техники». Научно-образовательный центр Московского региона в области фундаментальных проблем радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения. НОЦ – Московский государственный институт электроники и математики. Составители: Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. Москва, 2002. 46 стр.

26. Прохождение альфа-излучения через вещество : учебно-методическое пособие / Е. Н. Дулов, Р. Р. Гайнов, Н. Г. Ивойлов. Казань : Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. 15 с.

27. Материалы обоснования лицензии на осуществление деятельности в области использования атомной энергии. Эксплуатация радиационного источника – комплекса, в котором содержатся радиоактивные вещества, включая обращение с радиоактивными веществами при их транспортировании. ФГУП «Производственное объединение “Маяк”». Завод 45. РФ, Челябинская обл., г. Озерск, 2015.

28. Что такое электрофоретическое осаждение? [Электронный ресурс]. URL: https://www.netinbag.com/ru/manufacturing/what-is-electrophoretic-deposition.html

29. Кузнецов В. Г. Способ контроля герметичности источника излучения. Описание изобретения к патенту РФ RU 2 031 417 C1 G 01 T1/167. Заявитель: Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации. Заявка 4856150/25, 01.08.1990. Дата публикации 20.03.1995.

30. Источники ионизирующего излучения и препараты. Каталог продукции. «Производственное объединение “Маяк”», 2018.

31. «ИЗМЕРИТЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ Л2-56, Л2-56А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации».

32. Исакова О. П., Тарасевич Ю. Ю. Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета Origin : учебно-методическое пособие. Астрахань, 2007.

33. Алимов А. С. Практическое применение электронных ускорителей. [Электронный ресурс]. URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuc_techn/el_ac/application.html

34. Александров Л. М., Алексеев А. Г., Асписов А. Н. и др. Радиационная стойкость некоторых элементов и электронных узлов оборудования ускорителя : Препринт ИФВЭ 2002-25. Протвино, 2002. 12 стр.

35. Курмашев Ш. Д., Викулин И. М., Софронков А. Н. Свойства планарных транзисторных термодатчиков при действии радиации. *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*. 2011. № 2. С. 63–68.

36. Сидоров Д. В. Применение радионуклидных источников а-излучения для имитации нейтронного воздействия на кремниевые биполярные транзисторы. Специальность: 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» : автореф. дисс. кандидата технических наук. Москва, 2013.

37. Ніконова З. А., Небеснюк О. Ю., Ніконова А. О. Контактні системи в електроніці. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2015.

38. Yimai Liang, Na Guo, Linlin Li, Ruiqing Li, Guijuan Ji, Shucai Gan, Appl. Surf. Sci. 332, 32 (2015).

39. Wenjun Wang, Hefeng Cheng, Baibiao Huang, Xiaolei Liu, Xiaoyan Qin, Xiaoyang Zhang, Ying Dai, J. Colloid Inter face Sci. 442, 97 (2015).

40. Bilal Masood Pirzada, Niyaz A. Mir, Nida Qutub, Owais Mehraj, Suhail Sabir, M. Muneer, Mater. Sci. Eng. B 193, 137 (2015).

41. R. Loganathan, M. Jayasakthi, K. Prabakaran, R. Ramesh, P. Arivazhagan, K. Baskar, J. Alloy Compd. 616, 363 (2014).

42. Subhash Chand, Rajender Kumar, J. Alloy Compd. 613, 395 (2014).

43. B. C. Luo, J. Wang, M. M. Duan, K. X. Jin, C. L. Chen, Mater. Lett. 120, 133 (2014).

44. Upadhyay A. Mandal, H. Ghadi, D. Pal, A. Basu, A. Agarwal, N. B. V. Subrahmanyam, P. Singh, S. Chakrabarti, J. Lumin. 161, 129 (2015).

45. Hong-Jian Feng, M. Wang, F. Liu, B. Duan, J. Tian, X. Guo, J. Alloy Compd. 628, 311 (2015).

46. Andriy V. Kozytskiy, Oleksandr Stroyuk, Mykola Skoryk, Stepan Kuchmiy, J. Photochem. Photobiol. Sci. 14, 942 (2015).

47. O. Y. Nebesniuk, Z. A. Nikonova, A. A. Nikonova, S. L. Khrypko, Journal of Nano-and Electronic Phisics. 11(5), 05020 (2019).

48. O. Y. Nebesniuk, Z. A. Nikonova, A. A. Nikonova, Journal of Nano-and Electronic Phisics. 12(5), 05012 (2020).

49. Nebesniuk O. Y., Nikonova Z. A., Nikonova A. A. Journal of Nano- and Electronic Phisics. 13(5), 05033 (2021).

50. Ніконова А. О., Ніконова З. А., Небеснюк О. Ю. Конструктивно-технологічні рішення виготовлення енергоефективних фотоперетворювачів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2021. № 3. С. 128-134.

51. Hermann G. A., Walls D. F. Theory of Two-Photon Optical Tristability. Phys.Rev. A, 1982. V. 26, No. 4. P. 2083–2095.

52. Bonifacio R., Lugiato L. A. Optical Bistability and Cooperative Effects in Resonance Fluorescence. Phys. Rev. A, 1978. V. 18, No. 3. P. 1129–1144.

53. Михайловський Д. Ю., Тупіков В. А., Москаленко А. Ю., Світанько М. В. Резонатори із нелінійним резонансним середовищем : матеріали І Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України». Запоріжжя : ЗНУ, 19–21 жовтня 2021 р. С. 257.

54. Oseledchik Yu. S., Osadchuk V. V., Prosvirnin A. L., Selevich A. F. Growth of BBO from Na_2O-NaF solution. J. Crystal Growth. 1993. V. 131. P. 199–203.

55. Oseledchik Yu. S., Pisarevsky A. I., Prosvirnin A. L. et al. Nonlinear optical properties of the flux growth RTP cristal. Optical Materials. V. 3. 1994. P. 237–242.

56. Oseledchik Yu. S., Prosvirnin A. L., Svitanko N. V., Kudrjavtcev D. P., Lozova E. A. SrB_4O_7 – nonlinear optical material for deep UV. ICCM'2005. Kharkov, Ukraine, 2005. P. 91.

57. Kudrjavtcev D. P., Oseledchik Yu. S., Prosvirnin A. L., Svitanko N. V. The luminescence of the Praseodymium-doped Strontium borate $Sr_4B_{14}O_{25}:Pr^{3+}$. Ukr. J. Phys. Opt. 2002. V. 3. № 2. P. 155–160.

58. Comparative analysis of static control paths wind turbine variable speed wind turbine / D. Alekseevskiy, T. Kritskaya, O. Pankova, V. Kulikov, A. Dostaeva, S. Arinova. Electronic scientific journal. 2016. Karaganda, Kazakhstan: Karaganda State Technical University. № 6. P. 14–21.

59. Шнайдер Д. Преобразователи высокой мощности для возобновляемых источников энергии / переклад А. Колпакова. *Силовая электроника.* Санкт-Петербург : ООО «Медиа КиТ», 2010. № 28. С. 90–94.

60. Control for variable speed wind turbine driving a doubly fed induction generator using fuzzy-PI control / B. Hamane, M. Benghanem, A. M. Bouzid, A. Belabbes, M. Bouhamida, A. Draou. Energy Procedia. 2012. Amsterdam: Elsevier. Volume 18. P. 476–485.

61. Wind estimation with a non-standard extended Kalman filter and its application on maximum power extraction for variable speed wind turbines / D. Song, J. Yang, Z. Cai, M. Dong, M. Su, Y. Wang. Applied Energy. 2017. Amsterdam: Elsevier. Volume 190. P. 670–685.

62. DFIG wind turbine sliding mode control with exponential reaching law under variable wind speed / Y. Liua, Z. Wang, L. Xiong, J. Wang, X. Jiang, G. Baic, R. Li, S. Liu. Electrical Power and Energy Systems. 2018. Amsterdam: Elsevier. Volume 96. P. 253–260.

63. Active participation of variable speed wind turbine in inertial and primary frequency regulations / Y. Fu, X. Zhang, Y. Hei, H. Wang. Electric Power Systems Research. 2017. Amsterdam: Elsevier. Volume 147. P. 174–184.

64. Strategy for wind power plant contribution to frequency control under variable wind speed / P. Li, W. Hu, R. Hu, Q. Huang, J. Yao, Z. Chen. Renewable Energy. 2019. Amsterdam: Elsevier. Volume 130. P. 1226–1236.

65. Abuaisha T. S. General study of the control principles and dynamic fault behaviour of variable-speed wind turbine and wind farm generic models. Renewable Energy. 2014. Amsterdam: Elsevier. Volume 68. P. 245–254.

66. Serban I., Marinescu C. A sensorless control method for variable-speed small wind turbines. Renewable Energy. 2012. Amsterdam: Elsevier. Volume 43. P. 256–266.

67. Modeling and control of DFIG-based variable-speed wind-turbine / H. Ko, G. Yoon, N. Kyung, W.-P. Hong. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Amsterdam: Elsevier. Volume 103. P. 109–121.

68. Boukhezzar B., Siguerdidjane H. Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization. Energy Conversion and Management. 2009. Amsterdam: Elsevier. Volume 50. P. 885–892.

69. Passivity-based sliding-mode control design for optimal power extraction of a PMSG based variable speed wind turbine / B. Yang, T. Yu, H. Shu, Y. Zhang, J. Chen, Y. Sang, L. Jiang. Renewable Energy. 2018. Amsterdam: Elsevier. Volume 103. P. 577–589.

70. Sanchez A. G., Molina M. G., Rizzato Lede A. M. Dynamic model of wind energy conversion systems with PMSG-based variable-speed wind turbines for power system studies. International journal of hydrogen energy. 2012. Amsterdam: Elsevier. Volume 37. P. 10064–10069.

71. Shehata E. G. Sliding mode direct power control of RSC for DFIGs driven by variable speed wind turbines. Alexandria Eng. J. 2015. Amsterdam: Elsevier. Volume 54. P. 1067–1075.

72. Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault / A. A. El-Sattar, N. H. Saad, M. Z. Shams El-Dein. Electric Power Systems Research. 2008. Amsterdam: Elsevier. Volume 78. P. 1240–1246.

73. Observer backstepping control of DFIG-Generators for wind turbines variable-speed: FPGA-based implementation / B. Bossoufi, M. Karim, A. Lagrioui, M. Taoussi, A. Derouich. Renewable Energy. 2015. Amsterdam: Elsevier. Volume 81. P. 903–917.

74. Deraz S. A., Abdel Kader F. E. A new control strategy for a stand-alone self-excited induction generator driven by a variable speed wind turbine. Renewable Energy. 2013. Amsterdam: Elsevier. Volume 51. P. 263–273.

75. Muljadi E., Pierce K., Migliore P. Soft-stall control for variable-speed stall-regulated wind turbines. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2000. Amsterdam: Elsevier. Volume 85. P. 277–291.

76. Implementation of MRAC controller of a DFIG based variable speed grid connected wind turbine / S. Abdeddaim, A. Betka, S.d Drid, M. Becherif // Energy Conversion and Management. 2014. Amsterdam: Elsevier. Volume 79. P. 281–288.

77. Marcus T. C. E. et al. Transmittance optimization for high sensitivity ozone concentration measurement. Sensors and ActuatorsbyChemistry. 2016. No. 229. P. 528–533.

78. Gordon I. E. et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. No. 203. P. 3–69.

79. Devkota J., Ohodnicki P., Greve D. SAW Sensors for Chemical Vapors and Gases. Sensors. 2017. No. 17. P. 801.

80. Garcia G., Allen A. G., Cardoso A. A. A New and Simple Visual Technique Based on Indigo Dye for Determination of Ozone in Ambient Air. Water Air Soil Pollution. 2014. No. 225. P. 1836.

81. АСТ Компонентс : Электрохимические газовые датчики и сенсоры : Озон O_3 : Электрохимические газовые датчики и сенсоры. Озон O_3. URL: http://www.gassensor.ru/ru/gas/ozon-o3 (дата звернення: 01.12.2021).

82. Бобков Ю. В. Дослідження електрохімічних сенсорів озону для малогабаритного переносного індикатора / вимірювача концентрації озону. Інформаційні системи, механіка та керування. 2016. № 15. С. 5–11.

83. Кісельов Є. М., Алексієвський Д. Г., Туришев К. О. Датчик озону для дезінфектора рідини та повітря. Інформаційні системи та технології в медицині : III Міжнародна науково-практична конференція (ISM-2020) : збірник наукових праць. Харків : Національний аерокосмічний університет, 2020. С. 186–187.

84. Li Y. et al. Highpowerdeep UV – LEDs for analytical optical instrumentation. Sensors and Actuators by Chemistry. 2018. No. 255. P. 1238–1243.

85. Khan S., Newport D., LeCalvé S. Developmentof a Toluene Detector Based on Deep UV Absorption Spectrophotometry Using Glass and Aluminum Capillary Tube Gas Cells with a LED Source. Micromachines. 2019. No. 10. P. 193.

86. Light&Amp; Radiation Sources | Hamamatsu Photonics. URL: https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/light-and-radiation-sources/index.html (дата звернення: 01.12.2020).

87. Venugopalan H. UVC LEDs enable cost-efective spectroscopic instruments. Laser Focus World. 2015. No. 51. P. 81–85.

88. Khan S., Newport D., LeCalvé S. Gas Detection Using Portable Deep-UV Absorption Spectrophotometry : A Review. *Sensors*. 2019. No. 19. P. 5210.

89. Total UV solutionprovider : Seoul VIOSYS SETi – UV LED Product Catalog download. URL: http://www.s-et.com/en/product/SETi.pdf (дата звернення: 01.12.2021).

90. Масленников Д. Розробка структури системи визначення концентрації озону. *III Молода наука – 2020* : збірник наукових праць студентів, аспірантів і молодих вчених. Том V : Секція Інженерного інституту ЗНУ. Запоріжжя : ЗНУ, 2020. С. 63–64.

91. UV Sensor Module GUVC-T21GH. URL: http://www.geni-uv.com/download/products/GUVC-T21GH.pdf (дата звернення: 01.12.2020).

92. Александров С. Е. и др. Моделирование характеристик оптических газовых сенсоров на основе диодных оптопар среднего

ИК-диапазона спектра. *Журнал технической физики*. 2009. Том 79, вып. 6. С. 112–118.

93. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на Electronics Workbench и VisSim по элементам телекоммуникационных систем. Москва : Солон-Пресс, 2010. 481 с.

94. Кісельов Є. М., Масленников Д. А. Моделювання оптичного каналу датчика озону. *Енергетика, електроніка та інформаційні технології* : матеріали XXV науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів. Запоріжжя : ІННІ ЗНУ. 2020. Т. 3. С. 53.

95. Курбатова Н. В., Пустовалова О. Г. Основы MatLab в примерах и задачах : учебно-методическое пособие. Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2017. 69 с.

96. Використання сканеру Wi-Fi для збирання інформації про бездротові мережі [Електронний ресурс]. URL: https://sukachoff.ru/uk/programmy/ispolzovanie-skanera-wi-fi-dlya-sbora-informacii-o-besprovodnyh-setyah

97. Ekahau Survey [Електронний ресурс]. URL: https://www.ekahau.com/products/ekahau-connect/survey/

98. Аналізатор Wi-Fi сети с тестером SideKick [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://networkdiscount.com.ua/p1145844755-ekahau-connect-pack.html

99. Дослідження компанії Berg Inside [Електронний ресурс]. URL: http://www.berginsight.com/ReportPDF/ProductSheet/bi-lpt5-ps.pdf

100. Компанія IndoorAtlas [Електронний ресурс]. URL: http://www.indooratlas.com/

101. Компанія Vista [Електронний ресурс]. URL: http://vistamed.com

102. Google «Схеми будівель» [Електронний ресурс]. URL: https://www.google.com/maps/about/partners/indoormaps/

103. Правила використовування сервісу «Схеми будівель» [Електронний ресурс]. URL: https://support.google.com/maps/answer/2803784?p=gmm_guidelines&visit_id=1-636308877238996756-3255448617&rd=1

104. 2GIS «Поверхи» [Електронний ресурс]. URL: http://floors-widget.2gis.ru/

105. OpenStreetMap Indoors [Електронний ресурс]. URL: http: //wiki.openstreetmap.org/wiki/Indoor_Mapping

106. iBeacon [Електронний ресурс]. URL: https://developer.apple.com/ibeacon/

107. Eddystone [Електронний ресурс]. URL: https://developers.google.com/beacons/eddystone

108. Park J. J. and Yang L. T. and Lee C. Future Information Technology: 6th International Conference on Future Information Technology, Future-Tech 2011, Crete, Greece, June 28–30, 2011. Proceedings. Springer, 2011. P. 89–90. 526 p.

109. Trilateration: The Mathematics Behind a Local Positioning System [Електронний ресурс]. URL: https://github.com/lemmin-gapex/trilateration/blob/master/TurgutOzal-11-Tri lateration.pdf

110. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Prob-lems. Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering, 82 (Series D): 35–45. Copyright © 1960 by ASME

111. Компанія Accent Systems [Електронний ресурс]. URL: https://accent-systems.com/

112. Accent Systems Android SDK [Електронний ресурс]. URL: https://github.com/AccentSystems/iBKS-SDK-Android

113. Android Dashboards [Електронний ресурс]. URL: https://developer.android.com/about/dashboards/index.html

114. Бібліотека Lemmingapex Trilateration [Електронний ресурс]. URL: https://github. com/lemmingapex/trilateration

115. The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems [Електронний ресурс]. URL: http://people.duke.edu/~hpgavin/ce281 /lm.pdf

116. Паскевич А. А. Визначення координат та навігація всередині приміщень. 2017. 38 с.

117. Модуль ESP8266 [Електронний ресурс]. URL: https://www.euromobile.ru/upload/iblock/38e/38edea9ed541014c941ac8a47619db65.pdf

118. Публічні хмарні сервери для IoT пристроїв [Електронний ресурс]. URL: https://iot.com/cloud_services/

119. ThingSpeak for IoT Projects [Електронний ресурс]. URL: https://thingspeak.com/

Наукове видання

КРИТСЬКА Тетяна Володимирівна
АЛЕКСІЄВСЬКИЙ Дмитро Геннадійович
КІСЕЛЬОВ Єгор Миколайович та ін.

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОСТІ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ НАПРЯМІВ

Монографія

Технічний редактор *О. Гринюк*
Дизайн обкладинки *В. Савельєва*
Верстка *О. Данильченко*

Підписано до друку 19.10.2023 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Цифровий друк. Гарнітура Cambria.
Ум. друк. арк. 8,95. Наклад 300.
Замовлення № 1223-137.

Видавництво та друк: Олді+
65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
тел.: +38 (095) 559-45-45, e-mail: office@oldiplus.ua
Свідоцтво ДК № 7642 від 29.07.2022 р.

Замовлення книг:
тел.: +38 (050) 915-34-54, +38 (068) 517-50-33
e-mail: book@oldiplus.ua