

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-24>

УДК 535.23:621.383.52:546.28:004.9

ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ Юрій

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

<https://orcid.org/0000-0002-1248-3615>

e-mail: [y.dobrovolsky@chnu.edu.ua](mailto:y.dobrovolsky@chnu.edu.ua)

ЛІПКА Володимир

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

Акціонерне товариство «Центральне конструкторське бюро «Ритм»

<https://orcid.org/0000-0002-5899-6213>

e-mail: [lipka.volodymyr@chnu.edu.ua](mailto:lipka.volodymyr@chnu.edu.ua)

## ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ БАКТЕРИЦИДНИХ ОПРОМІНЮВАЧІВ В УМОВАХ ФОНОВОГО ОСВІТЛЕННЯ

Проведено дослідження щодо створення спеціалізованого УФ-радіометра для вимірювання бактерицидного УФ випромінювання з довжиною хвилі 254 нм в умовах фонового освітлення сонячним світлом. Розроблений фотодіод для УФ-радіометра на основі AlxGa1-xN, який володіє струмовою монохроматичною чутливістю на довжині хвилі 254 нм 0,05 А/Вт і має край поглинання на довжині хвилі близько 290 нм. Стійкість до фонового освітлення сонячним світлом забезпечується за допомогою автоматичного регулювання підсилення, яке забезпечує фіксацію робочої частоти модуляції у частотному діапазоні від 3 кГц до 2 МГц і запобігає додаванню до загального фотосигналу струмам, зумовленим оптичними завадами у низько частотному діапазоні від постійної складової до 3 кГц. Показано, що запропонована конструкція стійко компенсує струм до 15 мА, що є еквівалентним освітленості, створюваній світловими завадами, близько 20000 лк. Прилад, в умовах фонового освітлення датчика сонячним випромінюванням, генерує лише 3-4·10<sup>-2</sup> мкВт/см<sup>2</sup> при освітленості до 20000 лк і відсутності УФ випромінювання. Це дозволяє застосовувати запропоновану схему для вимірювання енергетичної освітленості УФ опромінювачів в умовах фонового освітлення Сонцем.

Ключові слова. Завади, фон, телекомунікації, фотодіод, УФ випромінювання, чутливість.

DOBROVOLSKY Yurii

Chernivtsi National University named after Yu. Fedkovicha

LIPKA Volodymyr

Joint-stock company "Central design bureau "Rytm"

## DEVICE FOR MEASURING THE RADIATION OF BACTERICIDAL IRRADIATORS UNDER BACKGROUND LIGHTING CONDITIONS

Research was conducted on the creation of a specialized UV radiometer for measuring bactericidal UV radiation with a wavelength of 254 nm under background sunlight conditions. The purpose of the work is: creation of an algorithm of schematic and technical solutions for the development of a specialized UV radiometer UVBV, for measuring bactericidal UV radiation with a wavelength of 254 nm, resistant to background radiation. As a result of the research, an algorithm of schematic and technical solutions for the development of the mentioned UV radiometer was created. In particular, the requirements for such devices were analyzed. A photodiode for a UV radiometer based on AlxGa1-xN has been developed, which has a current monochromatic sensitivity of 0.05 A/W at a wavelength of 254 nm and an absorption edge at a wavelength of about 290 nm. A preliminary electric circuit of the radiometer was developed, which showed unreliable data under sunlight up to 2000 lux, namely, it responded to solar radiation (up to 10 μW/cm<sup>2</sup> in the absence of UV radiation). An improved electrical circuit for suppressing the effect of background lighting on the photo signal generated by the radiometer. Resistance to background illumination by sunlight is ensured by automatic gain control, which ensures fixation of the modulation operating frequency in the frequency range from 3 kHz to 2 MHz and prevents the addition of currents caused by optical interference in the low frequency range from the constant component to 3 kHz to the overall photo signal. It is shown that the proposed design stably compensates the current up to 15 mA, which is equivalent to the illumination created by light interference, about 20,000 lux. The device, under conditions of background illumination of the sensor by solar radiation, generates only 3-4·10<sup>-2</sup> μW/cm<sup>2</sup> at illumination up to 20,000 lux and the absence of UV radiation. This makes it possible to use the proposed scheme for measuring the energy illuminance of UV irradiators in conditions of background illumination by the Sun. Further research involves the creation of a hardware capability to ensure the measurement of energy illumination created by a bactericidal irradiator with a wavelength of 254 nm under the conditions of its illumination by the Sun, which creates an illumination of 20,000 lux at a level of not less than 0.4 and not less than 0.1 μW/cm<sup>2</sup>. Solving this task will allow measuring the radiation of bactericidal lamps without additional expensive optical filters.

Keywords. Interference, background, telecommunications, photodiode, UV radiation, sensitivity.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Проблема контролю інтенсивності ультрафіолетового бактерицидного випромінювання (УФБВ), визначення безпечних умов його використання та вимог до засобів його контролю є не новою. УФБВ вже понад 70 років використовується для різних потреб людства [1]. Але, лише у березні 2009 році в США було випущено керівництво "Environmental Control for Tuberculosis: Basic Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines for Healthcare Settings" [2], у якому наведені рекомендації щодо використання

бактерицидного ультрафіолетового випромінювання у верхній зоні приміщення в присутності медичного персоналу.

В Україні вимоги і рекомендації щодо вимірювання ультрафіолетового (УФ) випромінювання з довжиною хвилі 254 нм висвітлено у «Санітарно-протиепідемічних правилах і нормах використання ультрафіолетового бактерицидного випромінювання для знезараження повітря та дезінфекції поверхонь в приміщеннях закладів охорони здоров'я та установ/закладів надання соціальних послуг/соціального захисту населення» [3], підготовленому МОЗ України (Наказ 882 від 06.05.2021).

Зокрема у правилах йдеться про те, що ультрафіолетовий радіометр (далі - УФ-радіометр), що повинен вимірювати інтенсивність бактерицидного потоку ультрафіолетового випромінювання починаючи від  $0,1 \text{ мкВт/см}^2$ . Окрім того, відповідно до [3], він має бути «сонячно сліпим». Це означає, що УФ-радіометр має вимірювати УФБВ в умовах фонових освітлення датчика (приймача УФ випромінювання) сонячним світлом. При великій інтенсивності УФБВ – до  $100$  і більше  $\text{мкВт/см}^2$  таке вимірювання цілком реалізується існуючими УФ-радіометрами. Але, при спробі виміряти значення інтенсивності УФБВ на рівні  $0,1 \text{ мкВт/см}^2$  в умовах освітлення датчика сонячним світлом у переважній більшості УФ-радіометрів виникають проблеми. Такі проблеми частково вирішуються за рахунок застосування спеціалізованих коштовних оптичних фільтрів, які встановлюються перед датчиком. І це одна з причин великої вартості таких радіометрів. Тому, створення УФ-радіометра для вимірювання УФБВ, який би був сонячно сліпим, т.т. захищеним від впливу фонових сонячного випромінювання і не використовував спеціалізовані оптичні фільтри, а здійснював таку фільтрацію за рахунок розроблення алгоритмів формування, генерування, підсилення та фільтрації з використанням методів радіотехніки та телекомунікацій, є актуальним завданням.

### Аналіз досліджень та публікацій

Для вимірювання інтенсивності УФ випромінювання на довжині хвилі 254 нм використовуються відповідні УФ радіометри. Зокрема, відомий у Європі Optometer X1-5 з UV-3718-5 UV детектором, виробництва німецької компанії Gigahertz-Optik GmbH, який забезпечує вимірювання інтенсивності УФБВ у діапазоні  $0,05 - 1000 \text{ мкВт/см}^2$ , є сонячно-сліпим і косинус-коригованим [4]. По при гарні технічні характеристики недолік приладу є його вартість, яка складає біля  $1500 \text{ €}$  у Німеччині і ще дорожчим він є в Україні. Окрім того прилад має «важкий» багатофункціональний користувацький інтерфейс на англійській мові, який ускладнює роботу оператора.

На ринку також представлений ультрафіолетовий радіометр Solar meret Model 8.0, виробництва компанії Thomas Scientific, США, який вимірює інтенсивність УФ випромінювання у діапазоні  $0 - 1999 \text{ мкВт/см}^2$  у діапазоні довжин хвиль  $262 - 246 \text{ нм}$ , по при необхідність здійснювати вимірювання на довжині хвилі  $254 \pm 2 \text{ нм}$  [5]. Компанія International Light Technologies, Inc. (США) Представляють комплексну систему ILT2400 UVGI-NB для вимірювання інтенсивності випромінювання з довжиною хвилі 254 нм у діапазоні  $0,4 - 400 \text{ мкВт/см}^2$  [6]. З урахуванням вимог до вимірювання мінімального значення інтенсивності [3], такий прилад також не може бути рекомендований для застосування в Україні.

Прямими аналогами створюваного приладу є Photo-radiometer Delta HD2302.0 [7] та LUTRON UV [8], які призначені для вимірювання інтенсивності УФ випромінювання на довжині хвилі 254 нм. По при у цілому гарні технічні характеристики, обидва прилади мають «важкий» багатофункціональний користувацький інтерфейс, що ускладнює роботу з ним медичних працівників.

Засоби радіометрії УФБВ в Україні представлені УФ радіометром Тензор-71 [9,10], який забезпечує усі технічні вимоги до приладів подібного класу, і є багаторічно перевіреним професійним засобом вимірювання параметрів УФ випромінювання, у тому числі УФБВ. Але, в умовах масового застосування приладу у закладах охорони здоров'я він виявився складним для користувачів без відповідної технічної підготовки.

Також на ринку представлений УФ радіометр Тензор-71Б [11, 12], який цілком відповідає вимогам [3], але, для протидії фоновому випромінюванню у ньому застосовані коштовні оптичні фільтри, що впливає на вартість приладу.

Тому, по при актуальність і необхідність вимірювання інтенсивності випромінювання УФБВ у медичних закладах України, до недавнього часу ця проблема вирішувалась за допомогою, переважно, імпортованих приладів.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** створення алгоритму схемо-технічних рішень для розробки спеціалізованого УФ-радіометра УФБВ, для вимірювання бактерицидного УФ випромінювання з довжиною хвилі 254 нм, стійкого до фонових опромінювання.

Для досягнення мети роботи потрібно виконати наступні завдання.

1. Проаналізувати вимоги до спеціалізованого УФ-радіометра УФБВ, для вимірювання бактерицидного УФ випромінювання з довжиною хвилі 254 нм.
2. Розробити та дослідити фотодіод, придатний для застосування у створюваному радіометрі.

3. Розробити електричну схему радіометра.

4. Розробити електричну схему для придушення впливу фонового освітлення на фотосигнал, генерований радіометром. Дослідити ефективність роботи такої схеми.

#### Виклад основного матеріалу

Аналіз літературних джерел показує, що сьогодні найбільш поширеним джерелом УФБВ є стаціонарна ртутна лампа низького тиску, найбільша частка інтенсивності якої (до 90 %) припадає на довжину хвилі 254 нм. Саме на цій довжині хвилі потрібно здійснювати вимірювання. При цьому, потоки оптичного випромінювання з іншими довжинами хвиль слід вважати фоновим і перешкоджати його потраплянню до фоточутливого детектора.

З другого боку відомо, що роботизовані самопересувні системи мають кращі показники як з точки зору покриття випромінюваною енергією в навколишньому середовищі, так і часу, необхідного для виконання завдання дезінфекції [13].

При розробці УФ-радіометра слід враховувати на розподіл УФ випромінювання на похилих поверхнях, які стають додатковим джерелом, про що йдеться у [14, 15], де розглянуто тривимірну модель опроміненої поверхні, яка перехоплює енергію УФС випромінювання. Показано, що площа опроміненої сфери дорівнює площі поперечного перерізу сфери.

Отже, виходячи з відомих вимог, розробка УФ-радіометра базувалася на створенні датчика (радіометричної головки (РМГ) на основі фотодіоду, оптичного фільтра та косинусної насадки, а також схемі обробки корисного фотосигналу та програмного забезпечення приладу.

Основних вимог до фотодіоду, що застосовуватиметься у УФ радіометрі, є три. Перша – мінімальна чутливість по за межами робочого спектрального діапазону ( $254 \pm 2$  нм), і, мінімальна у видимому та інфрачервоному діапазонах. Друга - максимальна чутливість до довжини хвилі 254 нм. Третя – фотодіод повинен мати нелінійність енергетичної характеристики не більше 1 % у діапазоні інтенсивності від  $0,1$  мкВт/см<sup>2</sup> до  $500$  мкВт/см<sup>2</sup>.

Окрім того, слід врахувати наступне.

УФ випромінювання повинно потрапляти до фотодіода через косинусну насадку, яка забезпечує вимогу «косинус-коригований датчик», а також через оптичний фільтр, який повинен відповідати вимозі «сонячно-сліпий». При цьому, косинусна насадка поглинає УФ випромінювання, зменшуючи його потік у 10 разів, а оптичний фільтр пропускає скрізь себе лише 20 % випромінювання, яке пройшло скрізь косинусну насадку. Таким чином, потік УФ випромінювання, яке дійшло до фотодіоду, є приблизно у 100 разів меншим, ніж потік, який падає на РМГ. При інтенсивності в  $10^{-1}$  мкВт/см<sup>2</sup> до фотодіода доходить не більше  $10^{-3}$  мкВт/см<sup>2</sup>. Для вимірювання такої малої інтенсивності потоку УФ випромінювання потрібен фотодіод з струмовою монохроматичною чутливістю на довжині хвилі 254 нм не менше за  $0,06$  А/Вт. У такому випадку фотострум фотодіода може бути на рівні  $10^{-12}$  А/мм<sup>2</sup>. Таку величину струму здатні підсилити існуючі підсилювачі.

Аналіз напівпровідникових матеріалів, на який можуть бути збудовані відповідні фотодіоди показує наступне.

Кремній має вузьку ширину забороненої зони (1.1 eV) і, отже, вимагає застосування фільтрів для роботи в якості ультрафіолетових фотодетекторів. Крім того, фоточутливість в ультрафіолетовій області спектру у кремнієвих фотоприймачів істотно знижується. Фотоприймачі на основі фосфіду галію також можуть бути використані для УФ-детектування. Фотодіоди на базі бар'єру Шоттки Ag-GaP можуть бути використані в якості «сонячносліпих» фотодетекторів [16-18]. Однак, вони мають непряму структуру зон, що відображається на їх параметрах. У  $Al_xGa_{1-x}N$  заборонена зона може бути змінена в діапазоні між 3.4 і 6.2 eV шляхом зміни частки  $Al_n$  в твердому розчині. Це дозволяє створити фотодіоди з довгохвильовою границею фотовідгуку у діапазоні 200 - 360 нм [19]. Фотодіоди на основі SiC хоча і має високу надійність, однак карбід кремнію має ширину забороненої зони 2.9 eV, що менше ніж у GaN, і немає можливості варіювання ширини забороненої зони як у  $Al_xGa_{1-x}N$ . Тому детектори на основі SiC так само можуть вимагати застосування дорогих оптичних фільтрів.

Таким чином, найкращим матеріалом, на основі якого може бути створений «сонячно-сліпий» фотодіод є очевидно  $Al_xGa_{1-x}N$ .

З другого боку, з досліджень [20-23] відомо, що ширину забороненої зони  $Al_xGa_{1-x}N$ , можна змінити шляхом зміни частки AlN у твердому розчині в діапазоні між 3.4 та 6.2 eV, що дозволяє створити фотодіоди з довгохвильовою межею фотовідповіді в діапазоні 200–360 нм. Надійність напівпровідників AlGaN також дає потенціал для стабільної роботи пристроїв на їхній основі в агресивних середовищах. Зокрема, показано, що спектральна характеристика фотодіода на основі бар'єра Шоттки до  $Al_{0.38}Ga_{0.42}N$  має «червоний» край поглинання близько 300 нм.

Для виготовлення фотодіоду використані структури MSE PRO AlGaN/GaN HEMT на 2-дюймовій кремнієвій пластині (GaN/Si) [24]. Бар'єр Шоттки, як і омичні контакти, виготовляли з шару золота 30 нм та 700 нм завтовшки відповідно.

Вимірювання струмової монохроматичної чутливості створеної фотодіодної структури на довжині хвилі 254 нм без електричного зміщення показало, що вона складає близько 0,05 А/Вт. Вигляд абсолютної спектральної характеристики чутливості створеного фотодіоду наведений на рисунку 1. З рисунка видно, що фотодіод має край поглинання близько 290 нм і, практично не чутливий до більш довгохвильового випромінювання.

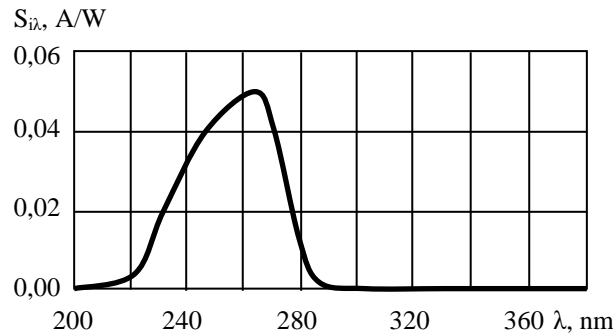


Рис. 1. Абсолютна спектральна характеристика чутливості створеного фотодіоду на основі AlGaIn/Au

Для обробки фотосигналу, генерованого фотодіодом, розроблено блок-схему приладу, яка наведена на рисунку 2.

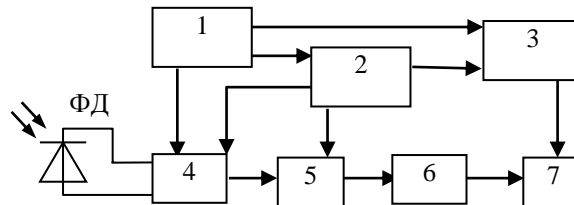


Рис. 2. Блок-схема приладу

На рисунку 2 показано наступне.

1 - джерела типу «Крона»; 2 - стабілізований інтегральний інвертор на  $\pm 5\text{В}$ ; 3 - прецизійним джерелом напруги; 4 - прецизійний перетворювач «струм-напруга»; 5 - підсилювач постійної напруги; 6 - аналогово-цифровий перетворювач; 7 - рідко кристалльний дисплей.

Обробка фотосигналу здійснювалась наступним чином. Вхідний сигнал, генерований потоком ультрафіолетового випромінювання, детектується фотодіодом (ФД) і прецизійним перетворювачем «струм-напруга» (5) перетворюється у напругу і підсилюється підсилювачем постійної напруги (6) та аналогово-цифровим перетворювачем (7).

Енергозабезпечення модуля здійснено від хімічного джерела типу «Крона» (1), на +9 В. Для живлення вузлів, що потребують двополярної напруги використовується стабілізований інтегральний інвертор (2) на  $\pm 5\text{В}$ , а необхідна точність аналогово-цифрового перетворення забезпечується прецизійним джерелом напруги (3) з допустимим відхиленням не більше 0,1%.

Проведено дослідження створеного приладу. Зокрема досліджено діапазон вимірювання енергетичної освітленості УФ-радіометра, яка складає від 0,1 до 1000 мкВт·см<sup>-2</sup>, робоча довжина хвилі 254±2 нм, дискретність показів, 0,01 Вт/м<sup>2</sup>. Таки параметри відповідають вимогам [5].

Подальші дослідження показали певні недоліки приладу. Виявилось, що при освітленні датчика приладу значеннями енергетичної освітленості, спів розмірними зі значеннями фонового освітлення від Сонця, його робота стає не коректною. Таким чином виявилось залежність приладу від фонового сонячного освітлення, або освітлення штучних джерел видимого діапазону. Залежність чутливості приладу (енергетична освітленість  $E_E$ ) до фонового випромінювання, створеного сонячним світлом (освітленість до 2000 лк), за відсутності УФ випромінювання, наведено на рисунку 3.

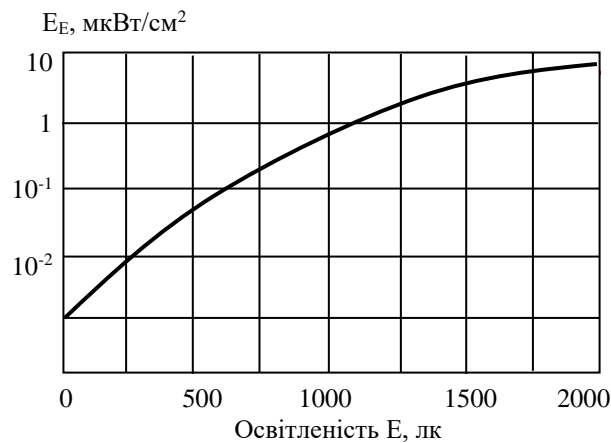


Рис. 3. Залежність чутливості приладу до фонового випромінювання (денного сонячного світла)

З рисунку 3 видно, що при освітленості до 2000 лк покази приладу не є достовірні, оскільки досягають 10 мкВт/см<sup>2</sup> за відсутності УФ випромінювання. Але, при такому значення фонові освітленості подальше зростання енергетичної освітленості, яку вимірює прилад, не відбувається. Як що в умовах фонові освітлення датчик приладу освітити УФ випромінюванням з довжиною хвилі 254 нм з інтенсивністю понад 50 мкВт/см<sup>2</sup>, то вклад фонові освітленості у загальне значення енергетичної освітленості зводиться до 2 – 3 %.

Таким чином, створений прилад може забезпечувати вимірювання енергетичної освітленості, створеної бактерицидними джерелами УФ випромінювання з довжиною хвилі 254 нм за умови вимірювання так званої працездатності лампи – вимірювання на відстані 1 метр від лампи. При цьому лампа з електричною потужністю 30 Вт має генерувати згідно наказу МОЗ № 882 [3] не менше 100 мкВт/см<sup>2</sup>, але не може вимірювати малі значення енергетичної освітленості на рівні 0,4 мкВт/см<sup>2</sup>, як того вимагає згаданий наказ.

Тому подальші дослідження були спрямовані на придушення фонові складової у складі фотоструму, який генерує фотодіод при вимірюванні малих рівнів енергетичної освітленості.

Поставлене завдання було вирішено шляхом створення додаткової електричної схеми яка повинна забезпечувати фільтрацію корисного сигналу на фоні оптичних завад. Сонячне випромінювання є не модульованим випромінюванням, що має суцільний частотний, або хвильовий спектр. А випромінювання з довжиною хвилі  $254 \pm 2$  нм є практично монохроматичним випромінюванням.

Раніше нами [25] була застосована схема автоматичного регулювання підсилення (АРП) [26], яка дозволяє здійснювати регулювання коефіцієнту підсилення сигналу, генерованого фотодіодом. Це забезпечує відстеження сигналу певної частоти, або довжини хвилі, який відповідає оптичному сигналу з робочою довжиною хвилі [26]. Фотосигнал, що відповідає суцільному частотному спектру, таким чином, може бути усунений.

Блок-схема такого пристрою наведено на рисунку 4. Наведена схема може бути виконана як фотоприймальний пристрій (ФПП), інтегрований у вимірювальний блок приладу для вимірювання інтенсивності УФ випромінювання. Такий ФПУ містить створений фотодіод на основі AlGa<sub>0,3</sub>N<sub>0,7</sub> (1), генерований фотострум якого перетворюється у напругу у (2). В якості перетворювача (2) застосовано операційний підсилювач ОР37. Він перетворює струм у вихідну напругу  $U_{\text{вих}}$ . Перетворювач струм-напруга (2) має зворотній зв'язок через RC фільтр високих частот (3) із джерелом струму, керованого напругою (4), який створено на базі транзистора 2П303Е. Коефіцієнт перетворення в полосі високих частот, а також коефіцієнт затухання у полосі низьких частотах забезпечує фільтр високої частоти (3). Вимірювання струму компенсації здійснюється за допомогою технологічного каскаду (5), створеного на базі операційного підсилювача NCS21911 (ON Semiconductor).

Робота запропонованої схеми ФПП, яка сприяє фільтрації фотосигналу, зумовленого оптичними завадами (сонячне освітлення) зводиться до наступного. Оптичне випромінювання, генероване як сонячним світлом, яке має широкій частотний спектр, так і робочою довжиною хвилі, поглинається фотодіодом (1). В наслідок цього фотодіод генерує фотострум, еквівалентний загальному потоку випромінювання. Цей сумарний фотострум перетворюється у вихідну напругу  $U_{\text{вих}}$  перетворювачем струм-напруга (2). Фільтр високих частот (3) формує коефіцієнт перетворення в полосі частот і коефіцієнт затухання на низьких частотах. Відсіювання фотосигналу, який зумовлений фоновим випромінюванням частотного складу, що відрізняється від робочого діапазону частот забезпечується за допомогою фільтра високих частот (3) і джерела струму керованого напругою (4). Компенсаційний струм  $I_{\text{комп}}$  на виході джерела струму керованого напругою (5), еквівалентне струму, який генерується оптичними завадами, створеними по за робочим

частотним діапазоном ФПП. Тому він віднімається від загального фотосигналу, який генерується фотодіодом (1). Значення струму компенсації  $I_{\text{комп}}$  вимірюється та контролюється технологічним каскадом для вимірювання струму компенсації (5).

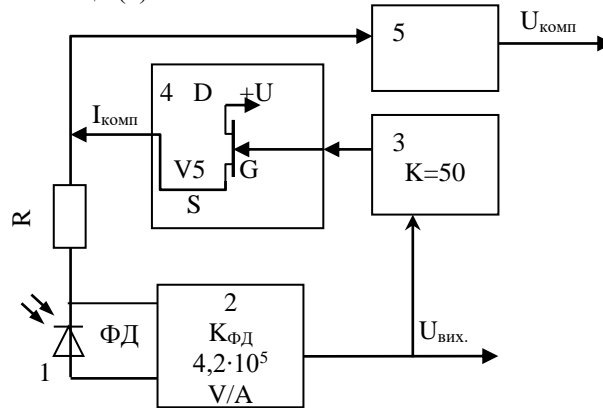


Рис. 4. Блок-схема пристрою, стійкого до не модульованого фонового випромінювання.  
1 – фотодіод; 2 – перетворювач струм-напруга; 3 – фільтр високої частоти; 4 - джерело струму кероване напругою; 5 – технологічний каскад для вимірювання струму компенсації;  $U_{\text{вих.}}$  - вихідна напруга;  $U_{\text{комп}}$  – напруга, пропорційна струму компенсації;  $R$  – обмежувальний резистор струму компенсації фотодіоду

Створений ФПП перевірявся на стійкість до фонового опромінювання в умовах реєстрації УФ випромінювання з довжиною хвилі 254 нм. Як і у попередньому випадку [25] виявилось, що створена схема забезпечує фіксацію робочої частоти модуляції у частотному діапазоні від 3 кГц до 2МГц і запобігає додаванню до загального фотосигналу струмам, зумовленим оптичними завадами у низько частотному діапазоні від постійної складової до 3 кГц. Також виявлено, що запропонована конструкція стійко компенсує струм  $I_{\text{комп}}$  до 15 мА, що еквівалентно освітленості, створюваній світловими завадами, що потрапляють на фотодіод, близько 20000 лк.

Окрім частотного аналізу струму компенсації фонових завад, було здійснено дослідження залежності чутливості приладу із вище згаданим ФПП до фонового випромінювання, створеного лампою розжарювання, яка за кольоровою температурою є аналогом Сонця. В якості джерела УФ випромінювання було обрано опромінювач ультрафіолетовий бактерицидний відкритого типу UV-BLAZE 30W OS [27]. Результати дослідження наведено на рисунку 5. Тут  $E_E$ , як і вище, енергетична освітленість, яку вимірює прилад. Освітленість вимірювалась фотометром Люксметр цифровим з висувним датчиком LX1010B (діапазон вимірювань 1-50000 Lx) [28] з похибкою 5%. В ході експерименту вимірювалася енергетична освітленість, створена лампою розжарювання. Результати вимірювання (рис. 5), показали, що прилад нової конструкції не чутливий до оптичного випромінювання, створюваного джерелом типу А до освітленості 20000 лк.

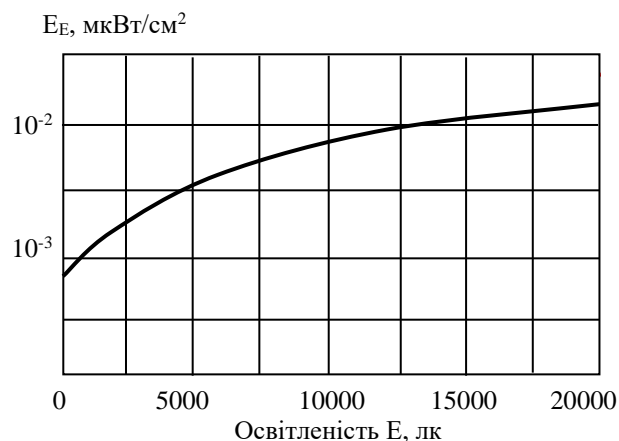


Рис. 5. Залежність чутливості приладу до фонового випромінювання (денного сонячного світла)

Критерій оцінювання полягає у тому, що в умовах фонового освітлення прилад має вимірювати величину у 0,4 мкВт/см<sup>2</sup> згідно [3]. В нашому випадку маємо, що прилад генерує лише  $3\text{-}4 \cdot 10^{-2}$  мкВт/см<sup>2</sup> при освітленості до 20000 лк і відсутності УФ випромінювання.

Наступним кроком було вивчення роботи приладу за призначенням – вимірювання енергетичної освітленості, створюваної бактерицидною лампою (довжина хвилі 254 нм) в умовах фонового освітлення джерелом типу А, який створював освітленість у 20000 лк. В таких умовах прилад забезпечив вимірювання енергетичної освітленості починаючи від 0,4 мкВт/см<sup>2</sup>.

Такий результат дозволяє стверджувати що прилад є стійким до фонових оптичних завад від джерел типу А, які створюють освітленість до 20000 лк.

Подальші дослідження передбачають створення апаратної можливості придушення впливу фонового освітлення. А саме – забезпечення вимірювання енергетичної освітленості, створюваної бактерицидним опромінювачем з довжиною хвилі 254 нм в умовах його освітлення джерелом типу А, що створює освітленість 20000 лк на рівні не 0,4, а не менше 0,1 мкВт/см<sup>2</sup>. Вирішення цього завдання дозволить забезпечити вимірювання випромінювання бактерицидних ламп без додаткових вартісних оптичних фільтрів.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Проаналізовано вимоги до спеціалізованого УФ-радіометра УФБВ, для вимірювання бактерицидного УФ випромінювання з довжиною хвилі 254 нм, які вимагають забезпечення вимірювання інтенсивності УФБВ у діапазоні від 0,1 мкВт/см<sup>2</sup> до 500 мкВт/см<sup>2</sup> в умовах фонового освітлення датчика приладу сонячним світлом.

2. Визначено вимоги та розроблений фотодіод на основі Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N з струмовою монохроматичною чутливістю на довжині хвилі 254 нм 0,05 А/Вт, який має край поглинання на довжині хвилі близько 290 нм, що дозволяє вважати його умовно сонячно-сліпим.

3. Розроблено електричну схему УФ-радіометра з фотодіодом на основі Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, який забезпечує діапазон вимірювання енергетичної освітленості, створюваної УФБВ від 0,1 до 1000 мкВт·см<sup>-2</sup>. Але, така конструкція виявилася не стійкою до фонові сонячної освітленості понад 2000 лк.

4. Розроблено електричну схему для придушення впливу фонового освітлення на основі АРП, яка забезпечує фіксацію робочої частоти модуляції у частотному діапазоні від 3 кГц до 2МГц і запобігає додаванню до загального фотосигналу струмам, зумовленим оптичними завадами у низько частотному діапазоні від постійної складової до 3 кГц. Також виявлено, що запропонована конструкція стійко компенсує струм I<sub>комр.</sub> до 15 мА, що еквівалентно освітленості, створюваній світловими завадами, що потрапляють на фотодіод, близько 20000 лк. Проведено дослідження нової конструкції приладу, яке показало, що прилад, в умовах фонового освітлення датчика сонячним випромінюванням, генерує лише 3-4·10<sup>-2</sup> мкВт/см<sup>2</sup> при освітленості до 20000 лк і відсутності УФ випромінювання.

#### Література

1. Офіційна заява Міжнародної комісії з освітлення по використанню ультрафіолетового (УФ) випромінювання для зниження ризику передачі COVID-19 від 12 травня 2020р. URL: <http://cie.co.at/publications/cie-position-statement-use-ultraviolet-uv-radiation-manage-risk-covid-19-transmission>

2. Environmental Control for Tuberculosis: Basic Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines for Healthcare Settings. URL: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-105/pdfs/2009-105.pdf>

3. Наказ МОЗ від 06.05.2021р. Про затвердження санітарно-протиепідемічних правил і норм використання ультрафіолетового бактерицидного випромінювання для знезараження повітря та дезінфекції поверхонь в приміщеннях закладів охорони здоров'я та установ/закладів надання соціальних послуг/соціального захисту населення. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0978-21#Text>

4. X1-5-UV-3718. UV radiometer for germicidal UV-C 254nm mercury lamps. Data Sheet. URL: <https://www.gigahertz-optik.com/en-us/product/x1-1-uv-3718/getpdf/>

5. Solar Light/ Data Sheet. URL: [https://www.thomasci.com/Instruments/Light-Meters/\\_/NIST-traceable-UVC-radiometer-with-remote-probe-that-measures-254-/-8nm-light-with-a-range-of-0-1999-withcm?q=Uv%20Lamp%20254](https://www.thomasci.com/Instruments/Light-Meters/_/NIST-traceable-UVC-radiometer-with-remote-probe-that-measures-254-/-8nm-light-with-a-range-of-0-1999-withcm?q=Uv%20Lamp%20254).

6. ILT2400 UVGI-NB Complete System For Measuring 254 nm UVC Germicidal/Disinfecting Light Sources. Data Sheet. URL: <https://www.intl-lighttech.com/products/ilt2400-uvgi-nb-measuring-254-nm-uv-germicidal-disinfecting-light-sources>

7. Photo-radiometer Delta OHM\_HD2302.0. URL: [https://www.deltaohm.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM\\_HD2302.0\\_manual\\_ENG.pdf](https://www.deltaohm.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM_HD2302.0_manual_ENG.pdf)

8. LUTRON UV light meter. URL: <http://lutron.co.kr/database/pdf/UVC-254.PDF>

9. Добровольський Ю.Г. Фотодиоди для измерения характеристик ультрафиолетового излучения / Добровольський Ю.Г., Шабашкевич Б.Г. – Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. -79 p.

10. УФ радиометр-дозиметр Тензор-71. URL: <https://tenzor.ua/products/izmerenie-opticheskikh-harakteristik/pribory-dlya-izmereniya-harakteristik-ultrafioletovogo-izlucheniya/uf-radiometr-dozimetr-tenzor-71/>

11. Шабашкевич Б.Г., Добровольський Ю.Г., Юр'єв В.Г., УФ-радіометрія бактерицидних опромінювачі. Актуальні проблеми світлотехніки [Електронний ресурс] : матеріали VIII міжнар. наук.-техн. онлайн-конф., Харків, 13 – 14 трав. 2021 р. / Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва. ім. О. М. Бекетова ; [ред. кол. : М. К. Сухонос, П. І. Неєжмаков та ін. ] – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 58 с. -С. 9-11. URL:[https://sds.kname.edu.ua/images/%D0%A1%D0%91\\_%D0%90%D0%9F%D0%A1-2021\\_1\\_1\\_compressed.pdf](https://sds.kname.edu.ua/images/%D0%A1%D0%91_%D0%90%D0%9F%D0%A1-2021_1_1_compressed.pdf)
12. УФ радіометр Тензор-71Б. URL:<https://tenzor.ua/products/priladi-dlya-borotbi-z-covid-19/uf-radiometr-tenzor-71b>
13. L.Tiseni, D.Chiaradia, M.Gabardi, M.Solazzi. UV-C Mobile Robots with Optimized Path Planning: Algorithm Design and On-Field Measurements to Improve Surface Disinfection Against SARS-CoV-2. // IEEE Robotics & Automation Magazine (Volume: 28, Issue: 1, March 2021). Page(s): 59 – 70. DOI:10.1109/MRA.2020.3045069
14. G.Salvadori, D.Lista, Ch.Burattini, L.Gugliermetti, F.Leccese, F.Bisegna. Sun Exposure of Body Districts: Development and Validation of an Algorithm to Predict the Erythematous Ultra Violet Dose // Int J Environ Res Public Health. 2019 Oct; 16(19): 3632. doi: 10.3390/ijerph16193632. URL:<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6801664/>
15. R.O.Rahn, P.Xu, S.L.Miller. Dosimetry of room-air germicidal (254 nm) radiation using spherical actinometry // Photochem Photobiol. 1999 Sep;70(3):314-8. URL:<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10483359/>
16. Omnes F., Monroy E., Calle F., Munoz, Beaumont B., Gibart P. Opto-Electronics Review. 8. № 1. P. 43. (2000).
17. Pikhtin A., Tarasov S., Kloth B. IEEE Transactions on Electron Devices. 50. №1. C. 215. (2003)
18. . Yu. Dobrovolsky, L. Pidkamin and G. Prokhorov, "Photodiodes on the basis of gallium phosphate with increased sensitivity at a wavelength of 254 nm", Proc. SPIE 8338, 83380N (2011); doi:10.1117/12.920931.
19. Sang Li-Wen, Qin Zhi-Xin and etc. Chinese Physics Letters. 25. № 1. P. 258. (2008).
20. Thermal conductivity of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (0≤x≤1) epitaxial layers Dat Q. Tran, Rosalia D. Carrascon, Motoaki Iwaya, Bo Monemar, Vanya Darakchieva, and Plamen P. Paskov Phys. Rev. Materials 6, 104602 – Published 7 October 2022/ DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.6.104602>,
21. Feng, Y., Saravade, V., Chung, TF. *et al.* Strain-stress study of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlN heterostructures on c-plane sapphire and related optical properties. *Sci Rep* 9, 10172 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46628-4>,
22. Nick Pant, Zihao Deng, Emmanouil Kioupakis. High electron mobility of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N evaluated by unfolding the DFT band structure. *Appl. Phys. Lett.* Volume 117, Issue 24, 242105 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0027802>
23. Ryota Akaike, Shuhei Ichikawa, Mitsuru Funato, Yoichi Kawakami. Lattice relaxation in semipolar Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N grown on (1102) AlN substrates. *Applied Physics Express*, Volume 13, Number 6, 2020, 061008. DOI 10.35848/1882-0786/ab9183
24. Структури MSE PRO AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub> HEMT. URL: <https://www.mseshop.com/products/mse-pro-algan-gan-hemt-on-2-inch-si-wafer-gan-si?variant=23435858247738>
25. V. M. Lipka, Yu. G. Dobrovolsky, and Yu. Sorokanyi. Algorithm for compensation of background light in a photo-receptive device for FSO. Proc. SPIE 12938, Sixteenth International Conference on Correlation Optics, 129380H (5 January 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3009329> ISSN:0277-786X
26. Alegre Pérez, Juan Pablo, Celma Santiago López, Belén Calvo. Automatic Gain Control. Techniques and Architectures for RF Receivers. 2011 <https://www.springer.com/gp/book/9781461401667>.
27. Опромінювач ультрафіолетовий бактерицидний відкритого типу UV-BLAZE 30W OS. URL:[https://www.uv-blaze.com/good\\_view/uv-blaze-30w-os/](https://www.uv-blaze.com/good_view/uv-blaze-30w-os/)
28. Люксметр цифровим з висувним датчиком LX1010B (діапазон вимірювань 1-50000 Lx). URL: <https://mpr-kip.com/ua/p506371627-lyuksmetr-tsifrovoy-vynosnym.html>

## References

1. Official statement of the International Commission on Illumination on the use of ultraviolet (UV) radiation to reduce the risk of transmission of COVID-19 dated May 12, 2020. URL: <http://cie.co.at/publications/cie-position-statement-use-ultraviolet-uv-radiation-manage-risk-covid-19-transmission>
2. Environmental Control for Tuberculosis: Basic Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines for Healthcare Settings. URL: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-105/pdfs/2009-105.pdf>
3. Order of the Ministry of Health dated 06.05.2021 On the approval of sanitary and anti-epidemic rules and norms for the use of ultraviolet bactericidal radiation for air disinfection and disinfection of surfaces in the premises of health care facilities and institutions/institutions providing social services/social protection of the population. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0978-21#Text>
4. X1-5-UV-3718. UV radiometer for germicidal UV-C 254nm mercury lamps. Data Sheet. URL: <https://www.gigahertz-optik.com/en-us/product/x1-1-uv-3718/getpdf/>
5. Solar Light/ Data Sheet. URL:[https://www.thomasci.com/Instruments/Light-Meters/\\_/NIST-traceable-UVC-radiometer-with-remote-probe-that-measures-254-8nm-light-with-a-range-of-0-1999-withcm?q=Uv%20Lamp%20254](https://www.thomasci.com/Instruments/Light-Meters/_/NIST-traceable-UVC-radiometer-with-remote-probe-that-measures-254-8nm-light-with-a-range-of-0-1999-withcm?q=Uv%20Lamp%20254).
6. ILT2400 UVGI-NB Complete System For Measuring 254 nm UVC Germicidal/Disinfecting Light Sources. Data Sheet. URL: <https://www.intl-lighttech.com/products/ilt2400-uvgi-nb-measuring-254-nm-uv-germicidal-disinfecting-light-sources>



7. Photo-radiometer Delta OHM\_HD2302.0. URL: [https://www.deltaohm.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM\\_HD2302.0\\_manual\\_ENG.pdf](https://www.deltaohm.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM_HD2302.0_manual_ENG.pdf)
8. LUTRON UV light meter. URL: <http://lutron.co.kr/database/pdf/UVC-254.PDF>
9. Dobrovolsky Y.G., Shabashkevich B.G. Photodiodes for measuring characteristics of ultraviolet radiation – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. -79 p.
10. UV radiometer-dosimeter Tensor-71. URL: <https://tenzor.ua/products/izmerenie-opticheskikh-harakteristik-pribory-dlya-izmereniya-harakteristik-ultrafioletovogo-izlucheniya/uf-radiometr-dozimetr-tenzor-71/>
11. Shabashkevich B.G., Dobrovolsky Y.G., Yuryev V.G., UV radiometry of bactericidal irradiators. Actual problems of lighting technology [Electronic resource]: materials of the VIII International science and technology online conference, Kharkiv, May 13-14 2021. Kharkiv: XNUMX named after O. M. Beketova, 2021. – 58 p. -p. 9-11. URL: [https://sds.kname.edu.ua/images/%D0%A1%D0%91\\_%D0%90%D0%9F%D0%A1-2021\\_1\\_1\\_compressed.pdf](https://sds.kname.edu.ua/images/%D0%A1%D0%91_%D0%90%D0%9F%D0%A1-2021_1_1_compressed.pdf)
12. UV radiometer Tensor-71B. URL: <https://tenzor.ua/products/priladi-dlya-borotbi-z-covid-19/uf-radiometr-tenzor-71b>
13. L.Tiseni, D.Chiaradia, M.Gabardi, M.Solazzi. UV-C Mobile Robots with Optimized Path Planning: Algorithm Design and On-Field Measurements to Improve Surface Disinfection Against SARS-CoV-2. // IEEE Robotics & Automation Magazine (Volume: 28, Issue: 1, March 2021). Page(s): 59 – 70. DOI:10.1109/MRA.2020.3045069
14. G.Salvadori, D.Lista, Ch.Burattini, L.Gugliemetti, F.Leccese, F.Bisegna. Sun Exposure of Body Districts: Development and Validation of an Algorithm to Predict the Erythral Ultra Violet Dose // Int J Environ Res Public Health. 2019 Oct; 16(19): 3632. doi: 10.3390/ijerph16193632. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6801664/>
15. R.O.Rahn, P.Xu, S.L.Miller. Dosimetry of room-air germicidal (254 nm) radiation using spherical actinometry // Photochem Photobiol. 1999 Sep;70(3):314-8. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10483359/>
16. Omnes F., Monroy E., Calle F., Munoz, Beaumont B., Gibart P. Opto-Electronics Review. 8. № 1. P. 43. (2000).
17. Pikhin A., Tarasov S., Kloth B. IEEE Transactions on Electron Devices. 50. №1. C. 215. (2003)
18. . Yu. Dobrovolsky, L. Pidkamin and G. Prokhorov, "Photodiodes on the basis of gallium phosphate with increased sensitivity at a wavelength of 254 nm", Proc. SPIE 8338, 83380N (2011); doi:10.1117/12.920931.
19. Sang Li-Wen, Qin Zhi-Xin and etc. Chinese Physics Letters. 25. № 1. P. 258. (2008).
20. Thermal conductivity of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (0≤x≤1) epitaxial layers Dat Q. Tran, Rosalia D. Carrascon, Motoaki Iwaya, Bo Monemar, Vanya Darakchieva, and Plamen P. Paskov Phys. Rev. Materials 6, 104602 – Published 7 October 2022/ DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.6.104602>,
21. Feng, Y., Saravade, V., Chung, TF. *et al.* Strain-stress study of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlN heterostructures on c-plane sapphire and related optical properties. *Sci Rep* 9, 10172 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46628-4>,
22. Nick Pant, Zihao Deng, Emmanouil Kioupakis. High electron mobility of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N evaluated by unfolding the DFT band structure. *Appl. Phys. Lett.* Volume 117, Issue 24, 242105 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0027802>
23. Ryota Akaike, Shuhei Ichikawa, Mitsuru Funato, Yoichi Kawakami. Lattice relaxation in semipolar Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N grown on (1̄1̄02) AlN substrates. *Applied Physics Express*, Volume 13, Number 6, 2020, 061008. DOI 10.35848/1882-0786/ab9183
24. Structures MSE PRO AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub> HEMT. URL: <https://www.ms Supplies.com/products/mse-pro-algan-gan-hemt-on-2-inch-si-wafer-gan-si?variant=23435858247738>
25. V. M. Lipka, Yu. G. Dobrovolsky, and Yu. Sorokanyi. Algorithm for compensation of background light in a photo-receptive device for FSO. Proc. SPIE 12938, Sixteenth International Conference on Correlation Optics, 129380H (5 January 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3009329> ISSN:0277-786X
26. Alegre Pérez, Juan Pablo, Celma Santiago López, Belén Calvo. Automatic Gain Control. Techniques and Architectures for RF Receivers. 2011 URL: <https://www.springer.com/gp/book/9781461401667>.
27. Open type ultraviolet bactericidal irradiator UV-BLAZE 30W OS. URL:[https://www.uv-blaze.com/good\\_view/uv-blaze-30w-os/](https://www.uv-blaze.com/good_view/uv-blaze-30w-os/)
28. Digital lux meter with retractable sensor LX1010B (measurement range 1-50000 Lx). URL:<https://mpr-kip.com/ua/p506371627-lyuksmetr-tsifrovj-vynosnym.html>