

2. Представлені матеріали можуть бути використані при подальшій апроксимації форми зіниці, що дозволить визначити параметри відхилення викривлених зіниць та діагностувати захворювання [1].

#### Література

1. Кривенко В. В. и др. Иридодиагностика. Справочник. – К.: Украинская Советская Энциклопедия, 1991. – 142 с.
2. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
3. Canny J. A computation approach to edge detection. – IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6), pp.679 – 698.
4. Faugeras O. Three-Dimensional Computer Vision. – MIT Press, 1993. – 695 p.
5. Продеус А. Н. Компьютерная иридодиагностика в Украине. – <http://aprodeus.narod.ru/>

<p>Можарская Е.В., Сокуренок В.М. <b>Выделение краевых точек зрачка на иридодиагностическом изображении глаза</b> Предложен специализированный алгоритм выделения краевых точек на иридодиагностическом изображении глаза. Его преимущества и эффективность подтверждены результатами численного моделирования. <b>Ключові слова:</b> иридодиагностическое изображение, алгоритм</p>	<p>Mozharska K.V., Sokurenko V. M. <b>Pupil's edge detection on the iridological image of eye</b> Specialized algorithm of pupil's edge detection on the iridological image of eye was offered. Its advantages and efficiency were confirmed by results of the numerical experiment. <b>Key words:</b> iridological image, algorithm</p>
--	--

*Надійшло до редакції  
28 січня 2010 року*

УДК 528.7:621.382

## ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ДИФРАКЦІЙНИХ ЯВИЩ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ РОЗРАХУНКАХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З ТЕЛЕВІЗІЙНИМИ КАМЕРАМИ

*Демченко Л.І., Русняк І.М., Стефанович В.Т., Державне підприємство “НДІ “Квант”,  
м. Київ, Україна*

*Розглянуто вплив дифракційних явищ в енергетичних розрахунках систем спостереження з телевізійними камерами, визначено умови, за яких їх необхідно враховувати. Отримано формулу для розрахунку сигналу на виході телевізійної камери, що враховує дифракційний характер зображення об'єкта*

**Ключові слова:** телевізійна камера, енергетичний розрахунок, дифракційне зображення

### Вступ. Постановка задачі

Оптично-електронні системи спостереження (ОЕС), до складу яких входять телевізійні камери (ТВК), знайшли широке використання. Енергетичний розрахунок таких ОЕС передбачає встановлення залежності між їх основними тактико-технічними характеристиками і конструктивними параметрами для заданих умов спостереження. Зазвичай енергетичні розрахунки проводяться за методиками, розробленими для ОЕС і викладеними, зокрема, в [1-3]. Їх перевагою є відносна простота, що робить можливим їх використання при інженерних роз-

рахунках ОЕС. Зокрема, ці методики також використовуються і для ТВК з приймачами випромінювання (ПВ) на основі матриць приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ). Особливістю цих методик є припущення поширення оптичного випромінювання за законами геометричної оптики без урахування дифракційних явищ. Проте відомо, що об'єкти ТВК, за допомогою якого будується зображення у площині ПВ, навіть в ідеальному випадку зображає будь-яку точку об'єкта спостереження дифракційним кружком розсіювання (ДКР), центральний максимум якого має радіус [4]

$$r_0 = 1,22 \frac{\lambda}{\left( \frac{D_{\text{вх.зН}}}{f} \right)}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;  $D_{\text{вх.зН}}$  – діаметр вхідної зіниці об'єктива ТВК,  $f$  – фокусна відстань об'єктива ТВК.

У більшості випадків використання ТВК спостереженню підлягають розміщені на відносно невеликих дуальностях протяжні об'єкти, зображення яких у площині ПВ попадає на велику кількість світлочутливих елементів (СЕ) матриці ПЗЗ. Тому у врахування дифракційних явищ при енергетичних розрахунках зазвичай потреби не виникає. Проте є ціла низка задач, в яких спостереженню підлягають точкові об'єкти, розміщені на значних дальностях. Для спостереження таких об'єктів виникає потреба у використанні в ТВК довгофокусних об'єктивів зі зменшеними відносними отворами  $\frac{D_{\text{вх.зН}}}{f}$ . Це може призвести до

суттєвого впливу дифракції випромінювання у формуванні зображення точкового об'єкта у площині ПВ, що викличе необхідність врахування впливу дифракційних явищ в енергетичних розрахунках. Зазначені вище методики впливу дифракції випромінювання не враховують.

Дана робота присвячена визначенню умов, за яких застосування традиційних методик енергетичного розрахунку ОЕС у випадку ТВК стає неможливим, та отриманню уточненої методики енергетичного розрахунку ТВК з урахуванням впливу дифракції випромінювання.

### **Основна частина**

Згідно з методиками енергетичного розрахунку ОЕС [1-3], для випадку ТВК з матрицею ПЗЗ при спостереженні об'єкта на фоні, що його оточує, виявленню підлягає різниця спектральних потоків випромінювання об'єкта і фону  $\Delta\Phi(\lambda) = \Phi_{\text{об}}(\lambda) - \Phi_{\text{ф}}(\lambda)$ , яку можна визначити за такою формулою:

$$\Delta\Phi(\lambda) = \frac{1}{4} E_n(\lambda) (\rho_{\text{об}}(\lambda) - \rho_{\text{ф}}(\lambda)) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{оп}}(\lambda) A_{\text{СЕ}} \left( \frac{D_{\text{вх.зН}}}{f} \right)^2, \quad (2)$$

де  $E_n(\lambda)$  – спектральна освітленість об'єкта та фону;  $\rho_{\text{об}}(\lambda)$ ,  $\rho_{\text{ф}}(\lambda)$  – спектральні коефіцієнти відбивання випромінювання об'єктом та фоном відповідно;  $\tau_a(\lambda)$ ,  $\tau_{\text{оп}}(\lambda)$  – спектральні коефіцієнти пропускання випромінювання атмосфе-

рою та об'єктивом ТВК;  $A_{CE}$  – площа СЕ ПВ;  $\frac{D_{\text{вх.зн}}}{f}$  – відносний отвір об'єктива ТВК.

Електричний сигнал на виході ТВК, викликаний потоком  $\Delta\Phi(\lambda)$ , відповідно складає

$$U_{\text{об}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta\Phi(\lambda) S_{\text{ПЗЗ}}(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

де  $S_{\text{ПЗЗ}}(\lambda)$  – спектральна чутливість матриці ПЗЗ ТВК;  $[\lambda_1, \lambda_2]$  – діапазон спектральної чутливості матриці ПЗЗ ТВК.

Як уже було зазначено вище, застосування формули (2) передбачає випадок поширення випромінювання в оптичній системі за законами геометричної оптики і не розглядає впливу дифракції у формуванні зображення. Для того, щоб оцінити цей вплив, розглянемо випадок спостереження ОЕС з ТВК віддаленого точкового об'єкта в денних умовах. Точковим будемо називати такий об'єкт спостереження, площа геометричного зображення якого у площині ПВ рівна площі СЕ матриці ПЗЗ. Так, для матриці ПЗЗ формату 1/2" (розмір СЕ складає приблизно  $8,5 \times 8,2$  мкм<sup>2</sup> по горизонталі і вертикалі відповідно) і довгофокусного об'єктива ТВК з типовим значенням  $f = 0,24$  м точковий об'єкт, що спостерігається на дальності  $d_{\text{об}} = 10$  км, повинен мати площу, не більшу  $0,12$  м<sup>2</sup>.

Оцінку умов, за яких дифракція справляє суттєвий вплив, проведемо на базі аналізу світлотехнічних характеристик, так як зазвичай у специфікаціях на ТВК чутливість приводиться у люксах. Умови спостереження приймемо денні, причому розглянемо два випадки: ясний день, для якого освітленість складає  $E_n = 50$  клк, і похмурий день, для якого освітленість складає  $E_n = 10$  клк [1].

Відносний отвір об'єктива ТВК  $\frac{D_{\text{вх.зн}}}{f}$  вибирається з урахуванням яскравості  $L$  сцени, що спостерігається, і допустимої на матриці ПЗЗ освітленості  $E_{\text{дон}}$  [5]:

$$\frac{D_{\text{вх.зн}}}{f} = 2 \sqrt{\frac{E_{\text{доп}}}{\pi \tau L}}, \quad (4)$$

де  $\tau = \tau_a \tau_{\text{оп}}$  – інтегральний коефіцієнт пропускання випромінювання атмосферою і об'єктивом ТВК.

В якості допустимої освітленості  $E_{\text{доп}}$  приймемо таку величину, яка відповідає рівню вихідного сигналу ТВК 50 IRE. При такій освітленості забезпечується лінійний режим роботи матриці ПЗЗ і можливість спостереження об'єктів додатного чи від'ємного контрасту. Для промислових ТВК з матрицями ПЗЗ формату 1/2" типове значення  $E_{\text{доп}} = 0,03$  лк.

Інтегральний коефіцієнт пропускання атмосфери  $\tau_{\text{атм}}$  визначимо через метеорологічну дальність видимості (МДВ)  $d_v$  [6]:

$$\tau_a = \exp \left[ -\frac{3,9}{d_v} d_{об} \right].$$

Для МДВ  $d_v = 20$  км і дальності  $d_{об} = 10$  км коефіцієнт пропускання атмосфери  $\tau_a = 0,142$ . Для коефіцієнта пропускання об'єктива ТВК прийемо типове значення  $\tau_{оп} = 0,7$ .

Яскравість сцени, що спостерігається ТВК вдень, визначається за формулою [1]

$$L = \frac{E_n}{\pi} \rho_\phi.$$

Для оціночного розрахунку прийемо, що об'єкт спостерігається на фоні неба, яке є дифузним відбивачем оптичного випромінювання. У випадку ясного неба коефіцієнт відбивання  $\rho_\phi = 1$ , у випадку похмурого неба  $\rho_\phi = 0,7$  [1].

З урахуванням зазначених вище умов згідно формули (4) значення відносного отвору об'єктива ТВК при спостереженні точкового об'єкта на фоні неба в ясний день і в похмурий день складає  $\frac{D_{вх.зн}}{f} = \frac{1}{204}$  і  $\frac{D_{вх.зн}}{f} = \frac{1}{76}$  відповідно.

В таблиці 1 наведено значення діаметра  $2r_0$  ДКР і розмірів зображення точкового об'єкта  $\{n_x; n_y\}$  (у пікселях) для визначених таким чином значеннях  $\frac{D_{вх.зн}}{f}$  і для кількох довжин хвиль випромінювання із діапазону спектральної чутливості ПВ ТВК, матриця ПЗЗ формату  $1/2''$ .

Таблиця 1 – Діаметр ДКР і розміри зображення точкового об'єкта залежно від умов спостереження і довжини хвилі випромінювання

Умови спостереження, освітленість	$\frac{D_{вх.зн}}{f}$	$\lambda$ (мкм)	$2r_0$ (мкм)	$n_x$	$n_y$
Ясний день, 50 клк	$\frac{1}{204}$	0,4	199	23	24
		0,75	373	44	45
		1,1	548	64	67
Похмурий день, 10 клк	$\frac{1}{76}$	0,4	74	9	9
		0,75	139	16	17
		1,1	204	24	25

Як слідує з таблиці, у наведеному вище прикладі для точкового об'єкта, що спостерігається на великій дальності ( $d_{об} = 10$  км), розмір ДКР складає не менше ніж 9 пікселів по одній координаті. Тобто зображення такого об'єкта не є точковим, а застосування для енергетичного розрахунку ОЕС з ТВК формули (2) стає некоректним. Наведена вище методика оцінки розмірів зображення точкового об'єкта дає можливість визначити ті умови, за яких застосування формули (2) ще можливе.

Врахування впливу дифракції в енергетичному розрахунку можна здійснити через врахування розподілу потоку випромінювання  $\Delta\Phi(\lambda)$  по перерізу ДКР. У цьому випадку у формулі (2) необхідно додатково проводити інтегрування освітленості по площі СЕ ПВ. При цьому зазначимо, що максимальний потік випромінювання  $\Delta\Phi(\lambda)$  буде спостерігатися для СЕ ПВ, на якому об'єктив ТВК формує центр ДКР. Для спрощення викладок покладемо, що оптична вісь об'єктива ТВК проходить саме через центр такого СЕ ПВ, а розміри цього СЕ ПВ приймемо  $\{x_{CE}; y_{CE}\}$ .

У загальному випадку розподіл потоку випромінювання в ДКР описується залежністю [7]

$$\Phi(x; y; \lambda) = \Phi_0(\lambda) \left( \frac{2J_1(kD_{\text{ВХ.ЗН}} \omega)}{kD_{\text{ВХ.ЗН}} \omega} \right)^2,$$

де  $\Phi_0(\lambda)$  – максимальний потік в центрі ДКР;  $J_1()$  – функція Бесселя 1-го порядку;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\omega$  – координата точки ДКР в полярній системі координат,  $\omega = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

На практиці використовується гаусова апроксимація, згідно з якою спектральна освітленість в ДКР має вигляд

$$E(x; y; \lambda) = \frac{\Delta\Phi(\lambda)}{2\pi r_1^2} \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{2r_1^2}\right\}, \quad (5)$$

де  $r_1$  – радіус ДКР на рівні 0,606 від максимальної освітленості

З урахуванням того, що в ДКР з радіусом  $r_0$  зосереджено близько 84% енергії оптичного випромінювання, радіус  $r_1 \approx 0,85 r_0$ .

Тоді, підставляючи (2) у (3), з урахуванням (1) і (5), для електричного сигналу на виході ТВК отримуємо

$$U_{\text{об}} = \frac{1}{7,03\pi} \left( \frac{D_{\text{ВХ.ЗН}}}{f} \right)^4 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E_n}{\lambda} (\rho_{\text{об}}(\lambda) - \rho_{\text{ф}}(\lambda)) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{оп}}(\lambda) S_{\text{ПЗЗ}}(\lambda) \times \\ \times \int_{-\frac{x_{CE}}{2}}^{\frac{x_{CE}}{2}} \int_{-\frac{y_{CE}}{2}}^{\frac{y_{CE}}{2}} \exp\left\{-0,57 \frac{x^2 + y^2}{\lambda^2} \left( \frac{D_{\text{ВХ.ЗН}}}{f} \right)^2\right\} dx dy d\lambda. \quad (6)$$

Отримана таким чином формула (6) дає можливість врахувати вплив дифракційних явищ в зображенні віддаленого точкового об'єкта при енергетичних розрахунках ОЕС з ТВК.

## Висновки

1. При спостереженні за допомогою ТВК віддалених точкових об'єктів виникає потреба у використанні довгофокусних об'єктивів, внаслідок чого стає суттєвим вплив дифракційних явищ у формуванні зображення об'єкта у площині ПВ ТВК.

2. Запропоновано методику оцінки умов спостереження і параметрів ТВК, за яких вплив дифракції у формуванні зображення точкового об'єкта необхідно враховувати.

3. Отримано формулу уточненого розрахунку електричного сигналу на виході ТВК з ПВ матрицею ПЗЗ для гаусової апроксимації розподілу освітленості в дифракційному зображенні точкового об'єкта.

4. При подальшому уточненні впливу дифракційних явищ в енергетичних розрахунках слід враховувати параметри конкретних об'єктів, що застосовуються в ТВК.

#### **Література**

1. Павлов А.В. Оптико-електронные приборы. – М.: Энергия, 1974. – 360 с.
2. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. – 2-ое изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 696 с.
3. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для вузов. – Изд. 2-ое, перераб. и доп. – М.: «Сов. радио», 1980. – 392 с.
4. Рыфтин Я.А. Телевизионная система. – М.: «Сов. радио», 1967. – 272 с.
5. Теория оптических систем. Учебник для вузов / Б.Н.Бегунов, Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. – 2-ое изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.
6. Ламехов О.А., Фрид Ю.В., Журкин Г.В. Светотехника и светоизмерения: Учебн. пособие для средних специальных учебных заведений ГА/О. – М.: Машиностроение, 1980. – 296 с.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Пер. с англ. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит. «Наука», 1973. – 720 с.

Демченко Л.И., Русняк И.Н., Стефанович В.Т.  
**Учет влияния дифракционных явлений в энергетических расчетах систем наблюдения с телевизионными камерами.**

Рассмотрено влияние дифракционных явлений в энергетических расчетах систем наблюдения с телевизионными камерами, определены условия, при которых их необходимо учитывать. Получена формула для расчета сигнала на выходе телевизионной камеры, которая учитывает дифракционный характер изображения объекта.

**Ключевые слова:** телевизионная камера, энергетический расчет, дифракционное изображение

Demchenko L.I., Rusniak I.N., Stefanovich V.T.  
**Accounting of effects of diffraction phenomena in energy computation of observing systems with TV cameras.**

Effects of diffraction phenomena in energy computation of observing systems with TV cameras are considered, conditions of accounting of them are defined. Formula for computation of TV camera output signal with accounting of diffraction image of object are equated.

**Keywords:** TV camera, energy calculation, diffraction image

*Надійшла до редакції  
12 березня 2010 року*