

# ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

УДК.621.327

**В.Андрійчук, канд.фіз.-мат.наук; Я.Герій**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОПРОМІНЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ІЗ ЗМІННИМ КУТОМ ПРЕЦЕСІЇ ОПРОМІНЮВАЧА

*Запропонована конструкція енергоощадного опромінювального пристрою (ОП) переривчастого опромінювання рослин з прецесійним рухом опромінювача та змінним кутом прецесії. Розглянуто методику розрахунку опромінення площини довільного розташування від опромінювача з круглосиметричним та несиметричним світловим розподілом. Подано графіки однакового рівня опромінення горизонтальної площини опромінювачами ЖСП-04В та ЖСП-В0Т-02 з лампами ДНаТ-400.*

### Умовні позначення

- ОП — опромінювальний пристрій;
- ОСУ — опромінювальна світлотехнічна установка;
- СВ — сила випромінювання;
- ФАР — фотосинтезно активна радіація;
- ДВ — джерело випромінювання;
- ОХУZ — система координат опромінювальної установки;
- АФЕІ — система координат джерела;
- РХ<sub>1</sub>У<sub>1</sub>Z<sub>1</sub> — система координат приймача;
- ДНаТ-400 — ДВ ОП, лампа натрієва високого тиску потужністю 400 Вт.

### Вступ

Вирощування рослин в замкнутому екологічному середовищі є енергомістким процесом, у якому на освітлення припадає основна частина енерговитрат (від 250 до 400 Вт/м<sup>2</sup>). Забезпечення оптимального світлового режиму в технологічному процесі є одним з напрямків енергоощадності у сільському господарстві та шляхів здешевлення продукції овочівництва закритого ґрунту. Знижувати енергоспоживання на світлокультуру рослин можна у двох напрямках, а власне: підбір найбільш ефективних джерел випромінювання (ДВ), оптимізація режимів опромінення [1–3].

Підбирають ДВ як за фотосинтезною ефективністю їх випромінювання, яка визначається із спектра поглинання “середнього” зеленого листка, так і за інтегральним потоком випромінювання видимої ділянки спектра, який ще називають потоком фотосинтезно активної радіації (ФАР) [4–6].

Підбирали ДВ за їх фотосинтезною ефективністю, що вимірювалася на автоматизованій спектрометричній установці з обчисленням на ЕОМ за спеціально виробленою програмою [7]. Встановлено, що найбільш ефективними джерелами для світлокультури рослин є металогалогенні лампи ДРИ-1000-5, ДРИ-2000-2м та натрієві лампи ДНаТ-400.

Пошук оптимальних режимів опромінення базувався на адаптаційній здатності рослин до малого опромінення та його переривчастої дії [2, 8].

У даному повідомленні розглянуто конструкцію та геометричну модель опромінювального пристрою з прецесійним рухом опромінювача та змінним кутом прецесії, подано методи обчислення кута нахилу оптичної осі опромінювача, положення випромінювального тіла та середнього значення опромінення горизонтальної площини.

**Теоретична частина**

У [9, 10] описана конструкція ОП із зміщеним відносно осі пристрою центром маси та прецесійним рухом опромінювача із заданим незмінним кутом прецесії. Він дозволяє опромінювати поверхню у вигляді круга, радіус якого залежить від кута нахилу оптичної осі опромінювача до вертикалі. Розрахунок опромінення довільної площі від даного ОП подано в [11]. При опроміненні прямокутних ділянок посіву такий пристрій має непродуктивні втрати потоку випромінювання. Для цього випадку була розроблена нова конструкція ОП із змінним кутом прецесії опромінювача. Зовнішній вигляд пристрою подано на рис.1.

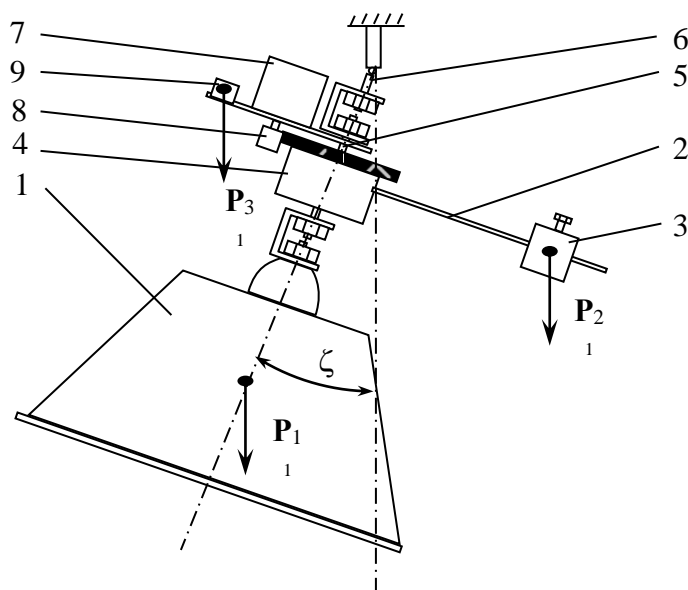


Рис. 1. Опромінювальний пристрій із змінним кутом нахилу опромінювача:  
 1 — опромінювач; 2 — напрямна штанга; 3 — основний вантаж;  
 4 — поворотний блок; 5 — вал поворотного блоку; 6 — шарнірне з'єднання;  
 7 — електродвигун; 8 — фрикційна передача; 9 — додатковий вантаж.

Установка складається з опромінювача 1, напрямної штанги 2, на якій розміщений основний вантаж 3. Вантаж кріпиться до штанги за допомогою штопорного гвинта і може змінювати своє положення вздовж штанги. Штанга твердо кріпиться до поворотного блоку 4 пристрою переривчастого опромінення. Вал поворотного пристрою 5 має осьовий отвір, через який проходить кабель живлення опромінювача. Вал через П-подібні пластини з'єднаний з одного боку з шарнірним з'єднанням 6, що кріпиться до перекриття теплиці, а з другого — з опромінювачем 1.

Обертальний рух до поворотного блоку передається через фрикційну передачу 8 від електродвигуна 7, на одній площині з яким кріпиться додатковий вантаж 9.

Установка працює так: вантажі зміщують центр ваги пристрою і нахилиють опромінювач на кут  $\zeta$  від вертикалі; кут нахилу задається як вагою основного вантажу  $P_2$  і довжиною плеча 2, що можна змінювати, так і вагою електродвигуна 7 з додатковим вантажем 9; електродвигун через фрикційну передачу та поворотний блок повертає штангу з основним вантажем, що забезпечує прецесійний рух опромінювача. Завдяки зміщенню центрів мас електродвигуна та додаткового вантажу відносно осьової лінії установки, кут прецесії змінюватиметься. Він буде максимальним, коли штанга з основним вантажем та електродвигун з додатковим вантажем будуть знаходитимуться з одного боку опромінювача, і мінімальним — коли з протилежних боків. Це дозволяє опромінити площу еліптичної форми, що збільшує коефіцієнт використання світлового потоку на прямокутних ділянках посіву.

Швидкість прецесійного руху опромінювача задається як параметрами електроприводу так і розмірами поворотного блоку.

Для обчислення кута нахилу оптичної осі опромінювача використовувалася його геометрична модель, яка подана на рис. 2.

Тут ОП поданий як система жорстко зв'язаних трьох елементів: опромінювача  $P_1$ , рухомого  $P_2$  та нерухомого  $P_3$  вантажів. Положення їх центрів мас у системі  $SX_sY_sZ_s$  задаються векторами  $\overrightarrow{SP_i}$  ( $i = 1 \dots 3$ ). Початок даної системи  $S$  розташований у точці шарнірного з'єднання ОП з перекриттям теплиці (рис. 1(б)). Система координат  $AFEI$  розташована в точці  $A$ , що збігається із світним тілом джерела, вміщеним у відбивачі і збігається з системою координат установки, в якій виконувалися експериментальні вимірювання світлового розподілу опромінювача. Вісь  $PI$  є оптичною віссю опромінювача.

При повороті рухомого вантажу  $P_2$  на кут  $\delta$  центр мас установки переміститься у нове положення, що на рис. 2, б зображено вектором  $\overrightarrow{SCm}$ . Це положення ОП є нестійке. Перехід до стійкого стану відбувається за рахунок повороту всіх структурних елементів пристрою навколо осі  $OO'$  на кут  $\zeta$ . Кінцеві положення центрів мас ОП та його структурних елементів задаються векторами  $\overrightarrow{SCmq}$  та  $\overrightarrow{SPq_i}$  відповідно.

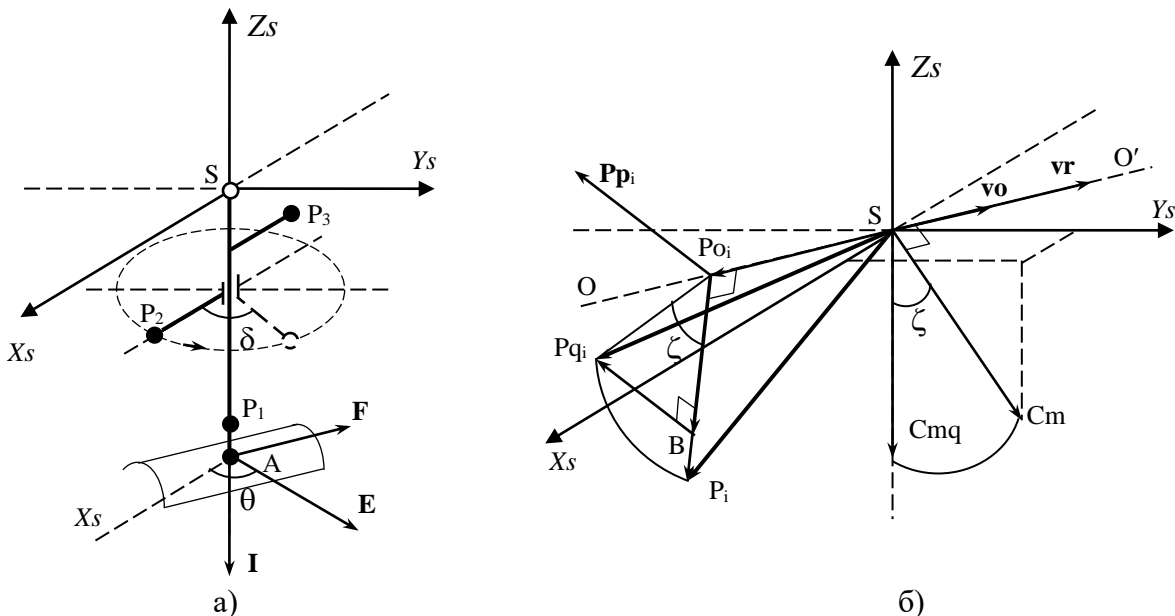


Рис. 2. Геометрична модель опромінювального пристрою із змінним кутом нахилу опромінювача: а) до переходу до стійкого положення (початковий стан); б) перехід до стійкого положення: ( $P_1$  — приведений центр маси опромінювача;  $P_2, P_3$  — центри мас рухомого та нерухомого вантажів відповідно;  $A$  - випромінювальне тіло;  $Cm, Cmq$  — центр мас опромінювального пристрою до і після переходу до стійкого положення;  $\zeta$  — кут повороту елементів ОП при його переході до стійкого стану;  $\mathbf{v}_o$  — одиничний вектор осі обертання ОП під час переходу до стійкого стану).

Для обчислення опромінення довільної площини круглосиметричним та несиметричним ОП, які можна замінити точковим джерелом випромінювання з заданим світловим розподілом, необхідно знати кут нахилу оптичної осі опромінювача до вертикалі та положення джерела. Для цього задамо маси та координати структурних елементів пристрою. Положення центру мас ОП залежить від кута повороту  $\delta$  рухомого вантажу і визначається за формулою

$$\overrightarrow{SCm}(\delta) = \frac{\sum_i \overrightarrow{SP_i} \cdot m_i}{\sum_i m_i}. \quad (1)$$

Перехід ОП до стійкого стану відбувається в результаті переміщення його центру мас з точки  $Cm$  в  $Cmq$  і визначається вектором  $\overrightarrow{SCmq}(\delta)$  з координатами

$$\overrightarrow{SCm}(\delta) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -|\overrightarrow{SCm}(\delta)| \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Одиничний вектор  $\mathbf{vo}$ , спрямований вздовж осі обертання  $OO'$ , визначимо з векторного добутку

$$\mathbf{vo} = \frac{\mathbf{vr}}{|\mathbf{vr}|}, \quad \mathbf{vr} = \overrightarrow{SCm} \times \overrightarrow{SCm}q. \quad (3)$$

Проекція вектора  $\overrightarrow{SP_i}$  на вісь обертання опромінювача дасть вектор  $\overrightarrow{SPo_i}$ , який визначимо через скалярний добуток векторів

$$\overrightarrow{SPo_i} = (\overrightarrow{SP_i} \cdot \mathbf{vo}) \mathbf{vo}. \quad (4)$$

Положення точки  $P_i$  після переходу опромінювача до стійкого стану  $Pq_i$  запишемо як суму векторів

$$\overrightarrow{SPq_i} = \overrightarrow{SPo_i} + \overrightarrow{Po_iPq_i}. \quad (5)$$

Вектор  $\overrightarrow{Po_iPq_i}$  також подамо як суму векторів

$$\overrightarrow{Po_iPq_i} = \overrightarrow{Po_iB} + \overrightarrow{BPq_i}. \quad (6)$$

При цьому

$$|\overrightarrow{SCm}| = |\overrightarrow{SCm}q|; \quad |\overrightarrow{Po_iP_i}| = |\overrightarrow{Po_iPq_i}| \quad (7)$$

як радіуси кіл, якими рухаються центр мас ОП та центри мас кожного з його структурних елементів при переході опромінювача до стійкого стану. Тоді вектор  $\overrightarrow{Po_iB}$  можна записати так:

$$\overrightarrow{Po_iB} = \overrightarrow{Po_iP_i} \cos \zeta. \quad (8)$$

Вектор  $\overrightarrow{BPq_i}$  колінеарний до вектора  $\mathbf{Pp}_i$ , який можна виразити через векторний добуток

$$\mathbf{Pp}_i = \mathbf{vo} \times \overrightarrow{Po_iP_i}. \quad (9)$$

Модуль вектора  $\overrightarrow{BPq_i}$  дорівнює

$$|\overrightarrow{BPq_i}| = |\overrightarrow{Po_iP_i}| \cdot \sin \zeta. \quad (10)$$

Тоді цей вектор можна записати так:

$$\overrightarrow{BPq_i} = |\overrightarrow{Po_iP_i}| \cdot \sin \zeta \cdot \frac{\mathbf{vo} \times \overrightarrow{Po_iP_i}}{|\overrightarrow{Po_iP_i}|} = \mathbf{vo} \times \overrightarrow{Po_iP_i} \cdot \sin \zeta. \quad (11)$$

У результаті перетворень отримаємо кінцевий вираз для вектора, що визначає положення точки  $Pq_i$  після переходу опромінювача до стійкого стану:

$$\overrightarrow{SPq_i} = (\overrightarrow{SP_i} \cdot \mathbf{vo}) \mathbf{vo} + \overrightarrow{Po_iP_i} \cos \zeta + \mathbf{vo} \times \overrightarrow{Po_iP_i} \cdot \sin \zeta. \quad (12)$$

Вираз (12) описує положення будь-якої точки опромінювального пристрою в залежності від кута повороту  $\delta$  рухомого вантажу. Такою точкою, що нас цікавить, є А, яка визначає положення випромінювального тіла опромінювача. Зміна її положення, а також напрямку оптичної осі АІ опромінювача, визначатимуть розміри та рівень опромінення вибраної ділянки.

Для визначення залежності кута нахилу оптичної осі опромінювача  $\zeta$  від кута повороту рухомого вантажу  $\delta$  знов скористаємося скалярним добутком векторів  $\overrightarrow{SCm}$  і  $\overrightarrow{SCm}q$ , з якого отримаємо

$$\zeta = \arccos \frac{SCm(\delta) \cdot SCmq(\delta)}{|SCm(\delta)|^2} \quad (13)$$

Обчислення виконувалися на ПЕОМ за виробленою програмою.

### **Результати обчислень та їх обговорення**

Обчислення кута нахилу опромінювача та положення тіла випромінювання виконувалися для світильників ЖСП-04В з параболоїдним та ЖСП-ВОТ-02 з параболоциліндричним відбивачами і лампами ДнаТ-400. Світловий розподіл круглосиметричного ЖСП-04В задавався експериментальною кривою сили світла  $I = f(\beta)$ , що апроксимувалася аналітичним виразом [11]:

$$I(\beta) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n A_i \cdot \beta^i, & 0 \leq \beta \leq 65^\circ; \\ 0, & \beta > 65^\circ, \end{cases} \quad (14)$$

де  $\beta$  - кут відхилення променя від оптичної осі опромінювача.

Світловий розподіл несиметричного ЖСП-ВОТ-02 задавався двомірною матрицею  $I_{ij}=f(\alpha_i, \varphi_j)$ , яку отримували експериментально на гоніофотометричній установці з постійним кроком зміни кутів в екваторіальній ( $\alpha$ ) та меридіальній ( $\varphi$ ) площинах [13]. На основі отриманої матриці будували фотометричне тіло. Для знаходження значень сили світла для кутів  $\alpha$  і  $\varphi$ , що не збігаються з матричними елементами, використовувався метод інтерполювання многочленом Лагранжа [14].

Для ОП з опромінювачем ЖСП-04В задавались такі параметри: маса відбивача разом з лампою ДнаТ-400  $m_1 = 5$  кг; положення випромінювального тіла відносно осі шарнірного з'єднання  $SA=0,5$ м; маси рухомого і нерухомого вантажів  $m_2 = m_3 = 10$  кг, розташованих на віддалі 0.1 м від шарніра та довжини плеч  $d_2 = d_3 = 0.4$  м; висота підвісу  $h = 3$  м.

Для даного випадку виконані обчислення залежності  $\zeta = f(\delta)$ ,  $SA = f(\delta)$  та розподіл густини потоку випромінювання ФАР на горизонтальній площині розміром  $5 \times 8$  м<sup>2</sup>, посередині якої розташований даний опромінювач.

На рис. 3 подано графік залежності кута нахилу оптичної осі опромінювача  $\zeta$  при повному оберті рухомого вантажу. Вихідне положення вантажів:  $SP_1(0,0,-0.5)$ ;  $SP_2(0.4,0,0)$ ;  $SP_3(-0.4,0, 0)$ . З графіка випливає, що кут нахилу опромінювача зростає від 0 до 70° при зміні  $\delta$  від 0 до  $\pi$ , а після цього знову спадає до нуля при зміні  $\delta$  від  $\pi$  до  $2\pi$ .

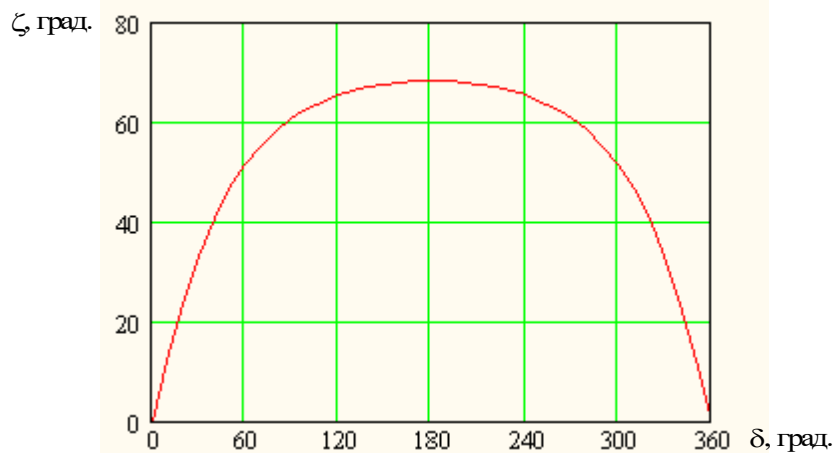


Рис. 3. Залежність кута нахилу оптичної осі  $\zeta$  опромінювача ЖСП-04В з лампою ДнаТ-400 від кута повороту  $\delta$  рухомого вантажу  $P_2$ .

На рис. 4 подано зміну положення точки А, що збігається з точковим джерелом, розташованим в середині відбивного елемента опромінювача при повороті  $m_2$  від 0 до  $2\pi$ . Тут на осях відкладено величину відхилення в (м) даної точки від початкового стану  $(0,0,-0.4)$ .

Аналогічні обчислення виконані для несиметричного опромінювача ЖСП-ВОТ-02 з лампою ДНаТ-400. Ці результати використані при обчисленнях опромінення заданої площі.

Обчислення опромінення вибраної горизонтальної площі виконувалися за методикою приведеною в [11].

Результати розрахунку показані на рис. 5 та рис. 6 у вигляді кривих однакових середніх значень опромінення кожного елемента розбиття за час одного оберту рухомого вантажу.

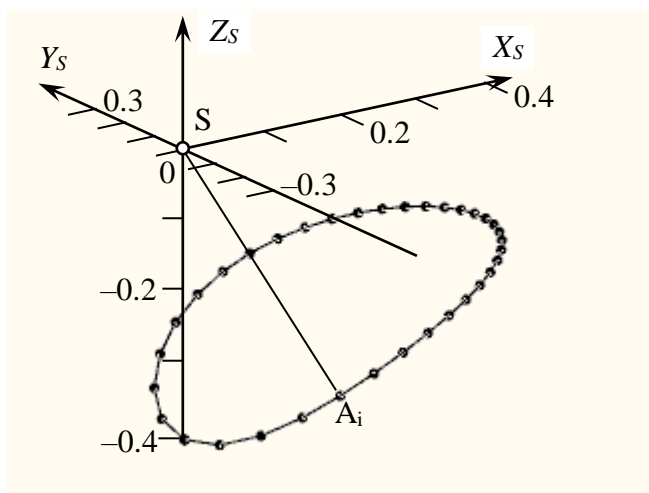


Рис. 4. Зміна положення точкового джерела А опромінювача ЖСП-04В з лампою ДНаТ-400 за один оберт рухомого вантажу.

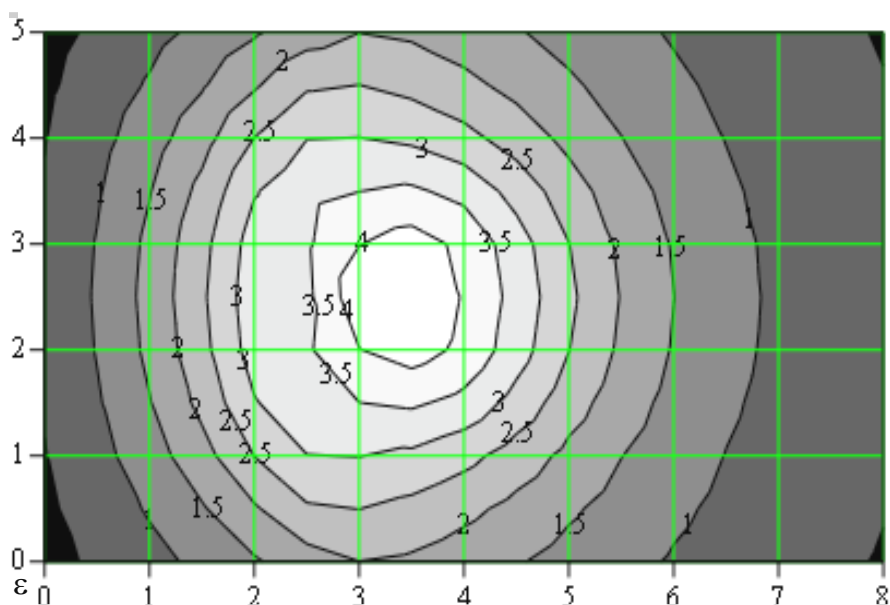


Рис.5. Криві однакових середніх значень опромінення ФАР горизонтальної прямокутної площі  $5 \times 8 \text{ м}^2$  круглосиметричним опромінювачем ЖСП-04В з лампою ДНаТ-400 за один оберт рухомого вантажу

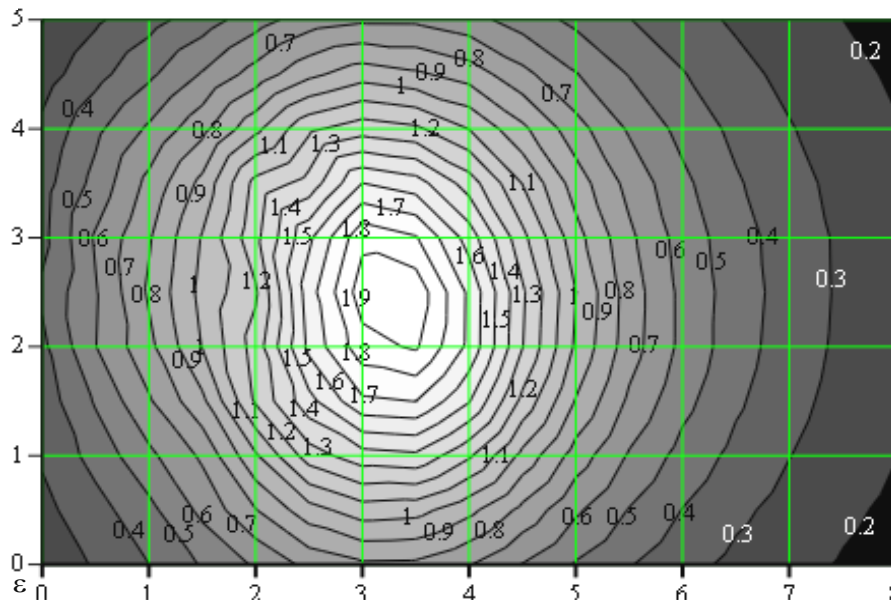


Рис. 6. Криві однакових середніх значень опромінення ФАР горизонтальної прямокутної площі  $5 \times 8 \text{ m}^2$  несиметричним опромінювачем ЖСП-ВОТ-02 з лампою ДНаТ-400 за один оберт рухомого вантажу

З даних рисунків випливає, що розміри опромінювальної поверхні зміщені в бік осі ОХ, а рівень опромінення плавно зменшується від 4 до  $1 \text{ Вт/м}^2$ , для опромінювача ЖСП-04В з лампою ДНаТ-400 і від 1,9 до  $0,3 \text{ Вт/м}^2$  для опромінювача ЖСП-ВОТ-02 з лампою ДНаТ-400.

### **Висновки**

1. Розглянуто конструкцію та вироблено геометричну модель ОП із змінним кутом нахилу опромінювача.
2. Вироблено методику розрахунку кута нахилу оптичної осі опромінювача до вертикалі та положення будь-якого із структурних елементів ОП залежно від кута повороту рухомого вантажу  $\delta$ .
3. Виконано розрахунки та подано графічні залежності кута нахилу оптичної осі опромінювача та положення його випромінювального тіла, а також середні значення однакових рівнів опромінення горизонтальної площі від кута повороту рухомого вантажу для ОП на базі світильника ЖСП-04В та ЖСП-ВОТ-02 з лампою ДНаТ-400.

*The design of the power-saving irradiation device (ID) of the non-continuous irradiation with the precession movement of the irradiator and changing precession angle was suggested. The method of irradiation calculation of the arbitrary surface by the irradiator with round-symmetric and non-symmetric light distribution was analysed. The graphs of the similar irradiation level of the horizontal area by ЖСП-04В and ЖСП-ВОТ-02 irradiators (lamp ДНаТ-400) are presented.*

### **Література**

1. Сарычев Г.С. Облучательные светотехнические установки. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240с.
2. Мошков Б.С. Актиноритмизм растений. – М.: Агропромиздат, 1987. – 271с.
3. Андрійчук В.А. Енергоекономне опромінення рослин закритого ґрунту Матеріали 2-ої міжнародної конференції “Управління енерговикористанням” (Львів, 3-6 червня 1997 р.) Тачис. Вiстро /96/052 с.2-9-2-14. - Львів, 1997.
4. Свеницкий И.И. Оценка фотосинтетической эффективности оптического излучения // Светотехника. - 1972. - № 4. - С. 23–24.
5. Барышев Ю.П., Зархин М.И. Об измерении оптического излучения в вегетационных климатических установках // Светотехника. - 1978. - № 6. - С. 11–12.
6. Хазанов В.С. О фитофотометрической оценке излучения // Светотехника. - 1978. - № 5. - С. 24–26.
7. Андрійчук В.А., Дворницький В.М., Костик Л.М. Оцінка ефективності використання електричної енергії джерелами випромінювання в тепличному господарстві Матеріали 2-ої міжнародної

- конференції “Управління енерговикористанням” (Львів, 3-6 червня 1997 р.) Тасіс. Вiстро /96/052 с.2-14-2-18. - Львів, 1997
8. Шапиро Т.Е. Фотохромный контроль биосинтеза хлорофилла и каротиноидов в этиолированных проростках пшеницы в зависимости от темновой фазы между световыми импульсами // Физ. растений. - 1993. - Т.40, № 2. - С. 204-208.
  9. Данилова М.В., Кашина Т.К. Фотопериодизм, развитие листа и диморфизм тилакоидов хлоропластов *Parilla Osuotoiges.*// Российская академия наук. Физиология растений. -1996 (январь–февраль). - Т.42 - № 1.
  10. Андрійчук В.А., Воркун С.В. Розрахунок кута прецесії опромінюючої установки із зміщеним центром ваги // Комунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник.- К.: Техника. – 2000. - Вып.22. - С.206-210.
  11. Андрійчук В.А. Енергоощадні опромінюючі установки для рослин закритого ґрунту// Вісник Тернопільського державного технічного університету ім.І.Пулюя. - 1999. - Т.4. Число 4. - С.144-147.
  12. Андрійчук В.А., Герій Я.М., Чубатий Ю.О. Світлотехнічний розрахунок опромінювальної установки з прецесуючим рухом опромінювачів // Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулюя. –2000. –Т.5. –№1. –С. 85–91.
  13. Андрійчук В.А., Герій Я.М. Розрахунок опроміненості площини довільної орієнтації від опромінювача з некруглосиметричним світловим розподілом// Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулюя. –2001. – Т.6. –№2. – С. 78–88.
  14. Самарский Р.В. Численные методы. - М.: Наука, 1989. - 432с.

*Одержано 20.08.2001 р.*