

УДК.621.327;534

В.А. Андрійчук, канд. фіз.-мат. наук,
І.А. Зеленков, канд. техн. наук**АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ РУХОМИМ ОПРОМІНЮВАЛЬНИМ ПРИСТРОЄМ
З КРУГОСИМЕТРИЧНИМ СВІТЛОВИМ РОЗПОДІЛОМ
ДЛЯ СВІТЛОКУЛЬТУРИ РОСЛИН**

Розглянуто алгоритм керування опромінювальним пристроєм змінного опромінення з круглосиметричним світловим розподілом, в основу якого покладено умову однакової енергії опромінення одиниці площі різних ділянок опромінювальної поверхні. Проведено розрахунки для опромінювального пристрою на базі світильника ЖСП-04 з лампою ДНаТ400 та обертально-коливним рухом опромінювача.

Вирощування рослин у замкнутому екологічному середовищі є енергоємним процесом, в якому на освітлення припадає основна частина енерговитрат. Забезпечення оптимального світлового режиму в технологічному процесі є одним з напрямків енергоощадності у сільському господарстві і здешевлення продукції овочівництва закритого ґрунту.

Підвищення енергетичної ефективності опромінювальних пристроїв (ОП) можна досягнути підбором високоефективних джерел випромінювання з максимально сприятливим спектральним складом та переходом до змінного опромінення посівної ділянки з урахуванням кінетики як процесів фотосинтезу, так і росту та розвитку рослин [1–3].

Підбір джерел світла проводився на основі аналізу біологічної цінності їх випромінювання, яка визначалася за чистим приростом урожайності та екологічності продукції, двома методами.

1. Оцінка ефективності джерел випромінювання (ДВ) у системі фотосинтезних величин, в основу яких покладено фотосинтезний потік або фітопотік [4–7]:

$$\Phi_{\text{фс}} = \int_{380}^{720} \varphi(\lambda) V_{\text{фс}}(\lambda) d\lambda,$$

де $\varphi(\lambda)$ – спектральна щільність потоку випромінювання; $V_{\text{фс}}(\lambda)$ – відносна спектральна фотосинтезна ефективність випромінювання.

Виходячи з закону про квантову еквівалентність поглинутого оптичного випромінювання фотосинтезними пігментами, відносна спектральна фотосинтезна ефективність була визначена зі спектра поглинання «середнього» зеленого листка [4; 5]. За цією характеристикою була проведена оцінка ефективності ДВ для світлокультури рослин [6; 7].

2. При оцінці ефективності ДВ за інтегральним потоком випромінювання, який потрапляє у видиму область спектра і називається потоком фотосинтезно активної радіації (ФАР), зелений листок рослини замінюється неселективним приймачем, спектральна чутливість якого зображається П-подібною функцією [4; 5; 6; 8].

Для спрощення порівняльної оцінки ефективності різних ДВ обмежимося областю ФАР і розіб'ємо їхній складний спектр на три квазімонохроматичні випромінювання, які відповідають трьом спектральним ділянкам [9]:

$$\Delta\lambda_1 = 380\text{--}500 \text{ нм};$$

$$\Delta\lambda_2 = 500\text{--}600 \text{ нм};$$

$$\Delta\lambda_3 = 600\text{--}720 \text{ нм}.$$

Відносний спектральний розподіл випромінювання оцінюватимемо відношенням середніх енергій випромінювання у вибраних ділянках спектра до енергії випромінювання ФАР:

$$\bar{S}_i = \Phi_i / \Phi_e.$$

$$\Phi_V = \Phi_e \sum_{i=1}^3 \bar{S}_i V(\lambda_i) = \Phi_e [\bar{S}_1 V(\lambda_1) + \bar{S}_2 V(\lambda_2) + \bar{S}_3 V(\lambda_3)];$$

$$\Phi_e = \Phi_e \sum_{i=1}^3 \bar{S}_i = \Phi_e (\bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \bar{S}_3);$$

$$\Phi_\phi = \Phi_e \sum_{i=1}^3 \bar{S}_i K_\phi(\lambda_i) = \Phi_e [\bar{S}_1 K_\phi(\lambda_1) + \bar{S}_2 K_\phi(\lambda_2) + \bar{S}_3 K_\phi(\lambda_3)];$$

де Φ_V – світловий потік; Φ_e – потік ФАР; Φ_ϕ – фотосинтезний потік; $V(\lambda_i)$ – відносна спектральна чутливість середнього ока:

$$V(\lambda_1)=0,020; V(\lambda_2)=1,000; V(\lambda_3)=0,015;$$

$$\lambda_1=435 \text{ нм}; \lambda_2=555 \text{ нм}; \lambda_3=675 \text{ нм};$$

λ_i – умовні характерні довжини хвиль, важливі для основних процесів у рослинах; $K_\phi(\lambda_i)$ – функція спектральної фотосинтезної ефективності випромінювання:

$$K_\phi(\lambda_1)=0,6; K_\phi(\lambda_2)=0,4; K_\phi(\lambda_3)=1,0.$$

Результати експериментальних досліджень і розрахунку енергетичних η_e і фотосинтезних η_ϕ ККД основних різноспектральних ДВ, що використовуються у світлокультурі рослин, подані в таблиці [7; 10].

Параметри фотобіологічної цінності джерел випромінювання

Тип джерела випромінювання	\bar{S}_1 , %	\bar{S}_2 , %	\bar{S}_3 , %	Потік			η_e , %	η_ϕ , %
				Світловий Φ_V , клм	Повний Φ_e , Вт	Фотосинтезний Φ_ϕ , Вт		
ДРЛФ400, Hg	19	48	33	16	48	31	12	8
ДРВ750, W, Hg	18	44	38	18	59	37	8	5
ЛОР1000, Li, In	43	14	43	24	220	160	22	16
ДРФ1000, Na, Tl, In	30	55	15	60	160	82	16	8
ДРФ1000, Na, Sc	33	50	17	72	205	110	20	11
ДНаТ400, Na	9	64	27	45	101	56	25	14
ДРИ400-5, Na, Sc	33	50	17	36	103	56	25	14
ДРИ1000-5, Na, Sc	33	50	17	103	296	160	29	16
ДРИ2000-6, Na, Sc	33	50	17	200	575	311	29	16
М4-6000, Na, Sc	33	50	17	540	1550	840	26	14
ДРТИ1000-1, In	100	-	-	2	150	83	15	8
ДРТИ1000-2, Tl	-	100	-	95	140	53	14	5
ДРИ400, Li, Sc	29	38	33	24	90	59	22	15
ДРОТ12000, Sn	42	33	25	120	513	289	25	14
ДРИ2000-1, Dy, Ho	34	33	33	170	720	457	36	23
ДКсТ В6000, Хе	37	35	28	220	890	570	15	9
КГ220-2000-4, W, Br	20	30	50	44	207	165	10	8
ЛФ40-2, Hg	30	35	35	1,6	65	4	16	10
ЛФ150, Hg	20	17	63	5	40	30	27	20

Підбір високоефективних джерел випромінювання дозволяє досягнути економічного ефекту до 30–40 %. Значно більші можливості з погляду енергоощадності передбачає другий напрямок удосконалення опромінювальних пристроїв – використання змінного опромінювання.

Було проведено попередні випробування трьох типів конструкцій ОП:

– пристроїв з обертанням опромінювача або його відбивного елемента навколо вертикальної осі [11];

- пристроїв зі зміщеним центром ваги та прецесійним рухом опромінювача [12];
- компактні рухомі ОП зі зворотно-поступальним рухом опромінювача.

При розробці алгоритму керування даними пристроями виходили з того, що рослина акумулює світлову енергію, яку потім разом із CO_2 перетворює в органічні речовини. У зв'язку з цим енергетичною основою даного процесу є потрапляння однакової енергії випромінювання на одиницю площі у будь-якій частині ділянки посіву.

Для опромінювальних пристроїв зі зворотно-поступальним рухом опромінювача, які створюють однакове опромінення по всій ширині площі, немає необхідності змінювати час світлової експозиції на різних ділянках руху опромінювача.

Для ОП з обертальним, обертально-коливним та прецесійним рухами опромінювача спостерігається висока нерівномірність опромінення, що вимагає внесення корекції світлової експозиції різних ділянок посіву.

Будемо виходити з того, що напрям потоку випромінювання таких ОП визначається кутами повороту опромінювача в меридіанній та екваторіальній площинах [13; 14]. Використовуючи дискретний електропривід, алгоритм керування їх роботою зводитимемо до задавання різних часових інтервалів опромінення в різних точках траєкторії руху опромінювача. Для цього проведемо розрахунок опромінення вибраної ділянки посіву. Нехай маємо ОП з круглосиметричним світловим розподілом, заданим аналітично. При розрахунку опромінення будемо користуватися точковим методом та математичною моделлю, запропонованою в роботі [13].

Рівняння опромінення вибраної ділянки поверхні запишемо через скалярний добуток векторів:

$$E_c = \frac{I(\beta) \cdot (\mathbf{AC} \cdot (-\mathbf{N}))}{|\mathbf{AC}|^3},$$

де \mathbf{A} – точка розташування світлого елемента ОП; \mathbf{C} – точка світлового поля; \mathbf{N} – вектор нормалі до опромінювальної поверхні.

Світловий розподіл опромінювача зобразимо у вигляді степеневого ряду:

$$I(\beta) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n A_i \beta^i; & 0 \leq \beta \leq \beta_{\text{гр}}; \\ 0 & \beta > \beta_{\text{гр}}, \end{cases}$$

де β – кут між вибраним напрямком і оптичною віссю опромінювача; A_i – коефіцієнти степеневого ряду; $\beta_{\text{гр}}$ – граничний кут відхилення променя, вище якого $I(\beta) = 0$.

Дещо спростимо задачу і розглянемо випадок, коли опромінювач здійснює лише коливний рух. Необхідною і достатньою умовою, покладеною в основу алгоритму, є забезпечення потрапляння однакової світлової енергії на різні ділянки опромінювальної площадки.

Розіб'ємо опромінювальну площадку на k однакових ділянок і позначимо їх Δ_j , де $j = 1 \dots k$. Нехай опромінювач, розташований на висоті h , спрямовує потік випромінювання під кутом q_2 до вертикалі і здійснює коливний рух у сегменті $2q_2$. Розіб'ємо його на p елементарних кутів δ :

$$\delta = \frac{2q_2}{p}.$$

Для розрахунку опромінення будемо виходити з того, що замінимо p кутових положень опромінювача на p однакових опромінювачів, розташованих у точці \mathbf{A} з різним часом дії. Враховуючи закон накладання світлових полів від кожного з опромінювачів, запишемо вираз для енергії опромінення кожної ділянки Δ_j :

$$W_j = \sum_{i=1}^p t_i E_{ij} = \sum_{i=1}^p t_i \frac{I(\beta) \cdot (\mathbf{AC} \cdot (-\mathbf{N}))_j}{|\mathbf{AC}_j|^3},$$

де t_i – час дії i -го опромінювача.

Невідомими параметрами залишаються t_i . Будемо вважати, що $W_j = \text{const} = W_0$, або беремо її за одиницю. Тоді для однозначного визначення t_i нам необхідно мати систему p рівнянь з p невідомими, тобто на опромінювальній площі потрібно вибрати стільки ділянок, на скільки елементарних кутів розбито кутовий сегмент, в якому відбувається коливання опромінювача ($k = p$). Тобто система рівнянь буде мати такий вигляд:

$$W_0 = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^p t_i \frac{I(\beta) \cdot (\text{AC} \cdot (-N))_j}{|\text{AC}_j|^3} = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^p t_i E_{ij}. \quad (1)$$

Маючи числові значення E_{ij} від p опромінювачів дана система перетворюється в систему p лінійних рівнянь з невідомими t_i , яку вже можна розв'язати, використовуючи як аналітичні, так і числові методи. Єдина умова, яка ставиться до розв'язків даної системи, – щоб вони завжди були додатні.

Якщо опромінювач поряд з коливним рухом здійснює ще й обертання навколо вертикальної осі, то для розрахунку середнього опромінення вибраної ділянки посіву поступаємо аналогічно і розбиваємо кут повороту 2π на r елементарних кутів. Замінюємо цей опромінювач на $n = p+r$ таких же опромінювачів, світловий потік яких спрямуємо в напрямку кутів розбиття в меридіанній та екваторіальній площинах. Енергія випромінювання, яка потрапляє на кожну ділянку розбиття опромінювальної площі, має вигляд системи (1), але число рівнянь у ній зростає до n :

$$W_0 = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n t_i \frac{I(\beta) \cdot (\text{AC} \cdot (-N))_j}{|\text{AC}_j|^3} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n t_i E_{ij}. \quad (2)$$

Розв'язавши таку систему лінійних рівнянь, отримаємо значення t_i для кожної посівної ділянки.

Перехід до траєкторії руху опромінювача, яка визначається кутами його повороту в меридіанній та екваторіальній площинах, можна виконати через відповідні тригонометричні функції при заданих його координатах та координатах вибраної опромінювальної ділянки. У результаті алгоритм керування роботою ОП зведеться до задавання обчислених часових інтервалів t_i в певних точках траєкторії. Це можна реалізувати через систему керування дискретним електроприводом ОП.

Для прикладу розглянемо круглосиметричний опромінювач світильника ЖСП-04 з лампою ДНаТ400, світловий розподіл якого заданий у вигляді степеневого ряду (1) [6]. Розташуємо його на висоті $h = 3$ м у центрі опромінювальної площадки розмірами: $l_x = 6,4$ м, $l_y = 6,4$ м. Нехай він виконує обертально-коливний рух в екваторіальній та меридіанній площинах відповідно.

Енергія опромінення ФАР одиниці площі посівної ділянки – $W_0 = 20$ Дж.

Розіб'ємо площу опромінення на елементарні квадратні ділянки розміром $\Delta = 0,4$ м.

Розрахунки траєкторії руху опромінювача та експозиції опромінення в окремих її точках проводилися на ЕОМ згідно з розробленою програмою, в основу якої покладено знаходження розв'язків системи лінійних рівнянь (2).

Для кутів повороту опромінювача в екваторіальній площині q_1 , що дорівнюють 0, 90, 180, 270, 360 град., кут нахилу опромінювача до вертикалі в меридіанній площині $q_2 = 61,09$ град., час опромінення у відповідних точках траєкторії $\tau = 6$ с.

На рис. 1 і 2 подані криві однакового рівня опромінення та розподіл опромінення ФАР уздовж лінії, яка проходить через середину вибраної ділянки паралельно до осі ОХ. На осях відкладено кількість елементів розбиття опромінювальної площі.

В основу запропонованої методики розрахунку алгоритму керування ОП змінного опромінення з обертальним, обертально-коливним та прецесійним рухом опромінювача

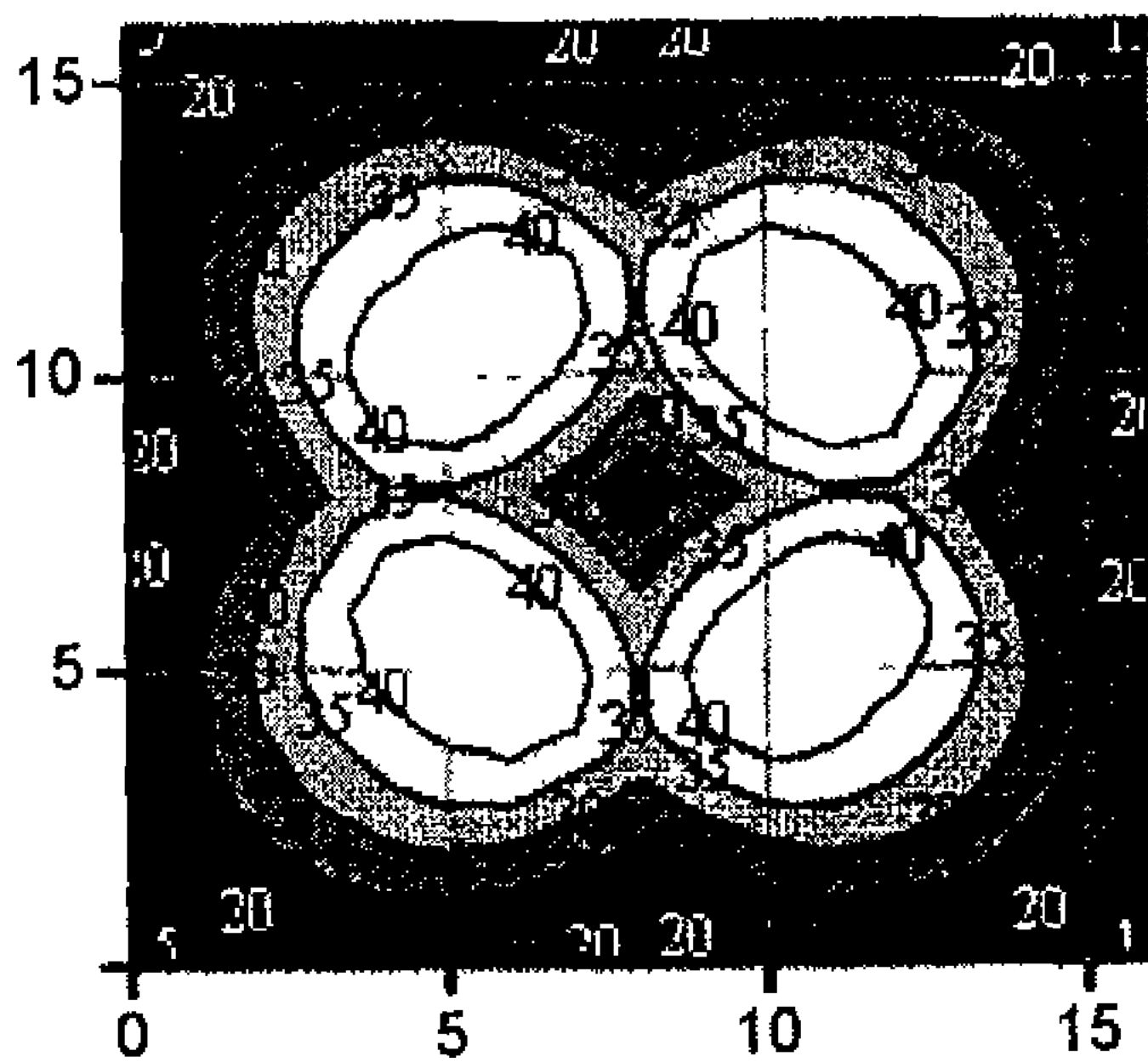


Рис. 1. Криві однакового рівня опромінення ФАР площі $6,4 \times 6,4 \text{ м}^2$

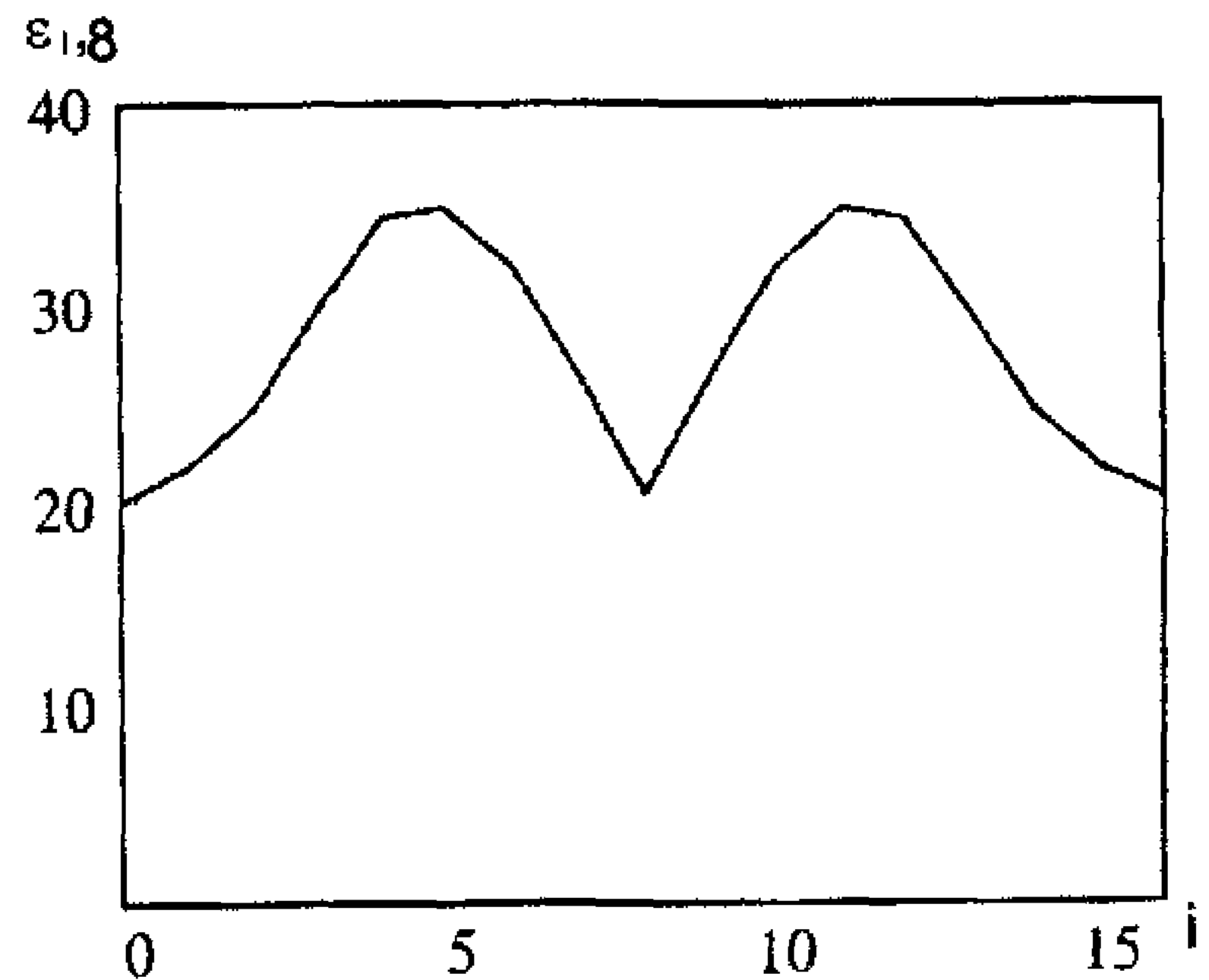


Рис. 2. Розподіл опромінення вздовж лінії, яка проходить через середину площі паралельно до осі ОХ

покладено умову однакової енергії опромінення одиничних площадок на різних ділянках опромінювальної площі. За розробленою програмою обчислено на ЕОМ алгоритм керування та розподіл опромінення ФАР для круглосиметричного опромінювача ЖСП-04 з лампою ДНаТ400 та обертально-коливним рухом.

Список літератури

1. Сарычев Г.С. Облучательные светотехнические установки. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
2. Мошков Б.С. Актиноритмия растений. – М.: ВО Агропромиздат, 1987. – 272 с.
3. Андрійчук В.А. Энергоэкономные опромінення рослин закритого ґрунту//Матеріали 2-й Междунар. конф. по управлению использованием энергии, Львов, 3-6 июня 1997 г. – Тасіс. – С. 2-9; 2-14.
4. Свентицкий И.И., Мудрик В.И. Основные принципы фитофотометрии. – Пушино, 1980. Препринт/ИЦБИ АН СССР; № 48.
5. Вассерман А.Л., Квасин Г.Н., Мальшев В.В. Об оценке эффективности действия источников излучения на растения // Светотехника. – 1986. – №7. – С.14-16.
6. Андрійчук В.А., Дворницький В.М., Костик Л.М. Автоматизований метод визначення фотосинтезного потоку та коефіцієнта корисної дії джерел випромінювання // Вісн. Терноп. приладобудівного ін-ту. – 1996. – № 2. – С. 116-121.
7. Андрійчук В.А., Костик Л.М. Оптимізація джерел випромінювання опромінюючих установок для рослинництва закритого ґрунту // Вісн. держ. ун-ту «Львівська політехніка». Спец. вип. «Проблеми економії електроенергії». – 1998. – С.81-84.
8. Хазанов В.С. О фотометрической оценке излучения // Светотехника. – 1978. – №5. – С.24-26.
9. ОСТ 46 140-83. Излучение оптическое. Оценка фотосинтезной эффективности. Термины и определения.
10. Вассерман А.Л., Квасин Г.Н., Мальшев В.В. Об оценке эффективности действия источников излучения на растения // Светотехника. – 1986. – №7. – С 14-16.
11. Пат. України 5A01G9/28. Установка для переривчастого опромінення рослин / В.А. Андрійчук, Л.М. Костик, В.В. Лазарюк. – № 20056А; Опубл. 25.12.97 // Бюл. №6.
12. Пат. України 7A01G9/20, A01G9/26. Установка змінного опромінення рослин /В.А. Андрійчук, С.В. Воркун. – № 36563А; Опубл. 16.04.01 // Бюл. №3.
13. Андрійчук В. А., Герій Я. М., Чубатий Ю. О. Світлотехнічний розрахунок опромінювальної установки з прещесуючим рухом опромінювачів // Вісн. Терноп. держ. техн. ун-ту ім. І. Пулюя. – 2000. – Т. 5, №1. – С. 85-91.
14. Андрійчук В.А., Герій Я.М. Розрахунок опроміненості площини довільної орієнтації від опромінювача з некруглосиметричним світловим розподілом// Вісн. Терноп. держ. техн. ун-ту ім. І.Пулюя. –2001. – Т.6, №2. – С. 78-88.

Стаття надійшла до редакції 20.03.02.