

МОДЕЛЮВАННЯ ІНДИКАТОРІВ ТА ІНДЕКСУ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ТЕПЛОХОЛОДОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Запропоновано методику оптимізації параметрів систем теплохолодозабезпечення будівель за показником індексу екологічної безпеки на основі методів математичного моделювання та нелінійного програмування. Вирішено оптимізаційну задачу на прикладі процесу теплохолодозабезпечення окремої житлової будівлі.

Ключові слова: екологічна безпека, система теплохолодозабезпечення, альтернативні джерела енергії, індекс екологічної безпеки, математичне моделювання, оптимізація.

Предложена методика оптимизации параметров систем теплохладоснабжения зданий по показателю индекса экологической безопасности на основе методов математического моделирования и нелинейного программирования. Решена оптимизационная задача на примере процесса теплохладоснабжения отдельного жилого дома.

Ключевые слова: экологическая безопасность системы теплохолодообеспечения, альтернативные источники энергии.

A method of optimizing the parameters of heat-and-cold-supply systems of buildings in terms of environmental safety index based on the methods of mathematical modeling and nonlinear programming was proposed. The optimization task of heat-and-cool-supplying on the example of particular residential building was solved.

Key words: ecological safety, alternative sources of energy.

Проблема, якій присвячена стаття. Перехід на альтернативні джерела енергії – вітрову, сонячну, геотермальну, енергію біомаси – дозволяє, з одного боку, відмовитися від імпорту дорогих енергоносіїв і забезпечити споживачів гнучкими локальними енергетичними установками, а з іншого, що найголовніше – суттєво зменшити забруднення навколишнього середовища. Ефективне впровадження вітрової та сонячної енергії в системи теплохолодозабезпечення будівель неможливо здійснити без визначення оптимальних режимів комбінування цих альтернативних джерел з існуючими традиційними енергоджерелами.

Науковий підхід до розв'язання цієї проблеми, звичайно, вимагає поступового заміщення традиційних енергоносіїв з дотриманням оптимального їх співвідношення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на те, що, використовуючи сприятливі кліматичні умови півдня України, варто було б поживити і розширити встановлення сонячних установок і вітрогенераторів [1].

За наявності науково обґрунтованого системного підходу до вирішення проблем екологічної безпеки [2], розвиненої бази даних щодо методів та засобів оптимізації рівня техногенної небезпеки, спричиненої використанням традиційних енергоресурсів [3], роль

упровадження альтернативних систем енергопостачання, а саме вітрогеліоустановок, у формуванні екологічної безпеки систем теплохолодозабезпечення вимагає подальших досліджень.

У своїх роботах учені досліджують основні принципи моделювання енергопотоків в альтернативних системах гарячого водопостачання, опалення та кондиціонування приміщень, а також методи розрахунків окремих параметрів цих систем [4; 5]. На основі поєднання альтернативних і традиційних енергоресурсів у рамках концепції «*Green buildings*» [6] створено математичні моделі та системи автоматичного управління енергозабезпеченням будівель. Проте, вони дозволяють оцінити лише показники енергоефективності, не даючи оцінки рівня екологічної безпеки систем теплохолодозабезпечення при комплексному використанні в них альтернативних і традиційних джерел енергії. Розроблення цього аспекту проблеми підвищення рівня екологічної безпеки систем теплохолодозабезпечення будівель шляхом оптимального перерозподілу потоків енергії між альтернативними та традиційними джерелами є, безперечно, актуальним і на часі.

У зв'язку з цим, **метою даної статті** є розробка методики оптимізації параметрів систем теплохолодозабезпечення будівель за показником індексу екологічної безпеки та вирішення оптимізаційної

задачі на прикладі системи теплохолодозабезпечення окремої житлової будівлі.

Виклад основного матеріалу. Із метою мінімізації антропогенного впливу на довкілля та підвищення екологічної безпеки систем теплохолодозабезпечення, при моделюванні перерозподілу енергопотоків у

системі слід вирішити оптимізаційну задачу за показником індексу екологічної безпеки системи теплохолодозабезпечення. Виходячи з розробленої математичної моделі [7; 8; 9], цільова функція при оптимізації індексу екологічної безпеки систем теплохолодозабезпечення має вигляд:

$$\begin{aligned}
 & IEB(A, D, V_{AK}) = \\
 & = 1 - \frac{k}{j=1} \sum_{n=1}^n \left(\frac{A \cdot (I_i \cdot \eta_0 - K(T_{BXi} - T_{HCi})) \cdot P_i + C_{ps} \cdot \frac{\rho_n \cdot v_i^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_{ел} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ев} \cdot t_i -}{\left[\sum_{i=1}^n K_n \cdot F_n + r \cdot L \cdot c_n \cdot \rho_n \cdot k \right] \cdot (T_{вн} - T_{нс_i}) \cdot t_i + q_{вм} \cdot F_{нидл} \cdot t_i + N \cdot g_i \cdot c_в \cdot \rho_в \cdot (T_{зв} - T_{x_i}) \cdot (1 + \beta) \cdot t_i} \right. \\
 & \quad - K_{AK} \cdot A_{AK} \cdot \left(\frac{A \cdot (I_i \cdot \eta_0 - K(T_{BXi} - T_{HCi})) \cdot P_i + C_{ps} \cdot \frac{\rho_n \cdot v_i^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_{ел} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ев} \cdot t_i -}{V_{AK} \cdot \rho_m \cdot c_m} \right. \\
 & \quad \left. \left. \frac{\left[\sum_{i=1}^n K_n \cdot F_n + r \cdot L \cdot c_n \cdot \rho_n \cdot k \right] \cdot (T_{вн} - T_{нс_i}) \cdot t_i + q_{вм} \cdot F_{нидл} \cdot t_i + N \cdot g_i \cdot c_в \cdot \rho_в \cdot (T_{зв} - T_{x_i}) \cdot (1 + \beta) \cdot t_i}{V_{AK} \cdot \rho_m \cdot c_m} + T_{xm} - T_{вн} \right) \cdot t_i \right) \times \\
 & \quad \times \frac{\phi_{j-A}}{\phi_{j-T}} \cdot d_j \rightarrow \max
 \end{aligned} \tag{1}$$

де A – площа поверхні геліоколектора, м²; I_i – інтенсивність потоку сонячної радіації, що надходить на поверхню колектора, Вт/м²; η_0 – ефективний оптичний ККД колектора; K – сумарний коефіцієнт тепловтрат геліоколектора, Вт/(м²·°C); $T_{вн}$ – температура всередині приміщення, °C; $T_{нс_i}$ – температура навколишнього середовища протягом досліджуваного i -того проміжку часу, °C; P_i – тривалість сонячного сяння протягом досліджуваного періоду часу, с; C_{pi} – коефіцієнт потужності вітроустановки; D – діаметр вітроколеса, м; ρ_n – густина повітря, кг/м³; v – швидкість вітру, м/с; $\eta_{ел}$ – ККД генератора; $\eta_{мех}$ – ККД трансмісії; $\eta_{ев}$ – ККД електричного водонагрівача; t_i – проміжок часу, с; c_n – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·°C); K_n – коефіцієнти тепловтрат n -ного елемента огорожувальних конструкцій, Вт/(м²·°C); F_n – площа поверхні n -ного елемента огорожувальних конструкцій, м²; °C; r – поправочний коефіцієнт при розрахунку інфільтрації повітря в приміщення; L – об'ємні витрати повітря, що видаляється, не компенсовані приточним повітрям, м³/с·м²; k – коефіцієнт врахування впливу внутрішнього потоку в конструкціях; $q_{вм}$ – сумарні питомі тепловиділення Вт/м²; $F_{нидл}$ – площа підлоги, м²; N – кількість жителів, ос.; g – середні витрати гарячої води на одну людину, л/(люд.·с); $c_в$ – питома ізобарна теплоємність води,

Дж/(кг·°C); $\rho_в$ – густина води, кг/л; $T_{зв}$ – температура води в системі гарячого водопостачання, °C; T_{x_i} – температура холодної води, °C; β – коефіцієнт, що характеризує втрати тепла трубопроводами в системі гарячого водопостачання; T_{xm} – початкова температура теплоносія в акумуляторі, °C; A_{AK} – площа поверхні акумулятора, м²; ϕ_{j-A} , ϕ_{j-T} – коефіцієнти трансформації негативного впливу альтернативної та традиційної систем відповідно; d_j – коефіцієнт вагомості j -того середовища.

Керованими параметрами в даній оптимізаційній задачі є:

- A – площа геліоколекторів;
- D – діаметр вітроустановки;
- V_{AK} – об'єм бака-акумулятора.

У процесі оптимізації індексу екологічної безпеки системи теплохолодозабезпечення будівлі виникають певні умови, що обмежують значення керованих параметрів:

$$\begin{cases} A = \{a | a_0 \leq a \leq a_n\}; \\ D = \{d | d_0 \leq d \leq d_n\}; \\ V_{AK} = \{v | v_0 \leq v \leq v_n\}; \\ T_{AK} \leq 95. \end{cases} \tag{2}$$

Виконані дослідження цільової функції дозволяють обрати метод оптимізації. Оскільки кількість керованих параметрів дорівнює трьом, розв'язується задача багатопараметричної оптимізації. Цільова функція нелінійна. Обмеження керованих параметрів мають як лінійний (A), так і нелінійний вигляд (D, V_{AK}, T_{AK}). Тому виникає задача умовної оптимізації, яка в кібернетиці дістала назву нелінійного програмування.

Враховуючи розглянуті в [10] особливості методів, для оптимізації індексу екологічної безпеки системи теплохолодозабезпечення обрано метод нелінійного програмування, а саме метод штрафних функцій, який дозволяє перетворити задачу з обмеженнями на послідовність задач безумовної оптимізації деяких допоміжних функцій. Допоміжну функцію отримують

$$\begin{aligned}
 & IEB(A, D, V_{AK}) = \\
 & = 1 - \sum_{j=1}^k \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{A \cdot (I_i \cdot \eta_0 - K(T_{BXi} - T_{HCi})) \cdot P_i + C_{ps} \cdot \frac{\rho_n \cdot v_i^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{ev} \cdot t_i - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. \frac{[\sum_{i=1}^n K_n \cdot F_n + r \cdot L \cdot c_n \cdot \rho_n \cdot k] \cdot (T_{вн} - T_{нс_i}) \cdot t_i + q_{вм} \cdot F_{нидл} \cdot t_i + N \cdot g_i \cdot c_{\theta} \cdot \rho_{\theta} \cdot (T_{зв} - T_{x_i}) \cdot (1 + \beta) \cdot t_i}{V_{AK} \cdot \rho_m \cdot c_m} \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - K_{AK} \cdot A_{AK} \cdot \left(\frac{A \cdot (I_i \cdot \eta_0 - K(T_{BXi} - T_{HCi})) \cdot P_i + C_{ps} \cdot \frac{\rho_n \cdot v_i^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{ev} \cdot t_i - \right. \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. \frac{[\sum_{i=1}^n K_n \cdot F_n + r \cdot L \cdot c_n \cdot \rho_n \cdot k] \cdot (T_{вн} - T_{нс_i}) \cdot t_i + q_{вм} \cdot F_{нидл} \cdot t_i + N \cdot g_i \cdot c_{\theta} \cdot \rho_{\theta} \cdot (T_{зв} - T_{x_i}) \cdot (1 + \beta) \cdot t_i}{V_{AK} \cdot \rho_m \cdot c_m} \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \frac{[\sum_{i=1}^n K_n \cdot F_n + r \cdot L \cdot c_n \cdot \rho_n \cdot k] \cdot (T_{вн} - T_{нс_i}) \cdot t_i + q_{вм} \cdot F_{нидл} \cdot t_i + N \cdot g_i \cdot c_{\theta} \cdot \rho_{\theta} \cdot (T_{зв} - T_{x_i}) \cdot (1 + \beta) \cdot t_i}{V_{AK} \cdot \rho_m \cdot c_m} + T_{xm} - T_{вн} \right) \cdot t_i \right. \\
 & \quad \left. \left. \cdot \frac{\phi_{j-A}}{\phi_{j-T}} \cdot d_j \right] \rightarrow \max + a \left(\sum_{i=1}^k (\max(0, g_i(T_{AK}))^2 \right) \right) \rightarrow \max
 \end{aligned}$$

У практичній частині досліджень виконано оптимізацію індексу екологічної безпеки системи теплохолодозабезпечення окремої житлової будівлі в природно-кліматичних умовах міста Миколаїв. Для вирішення оптимізаційної задачі використано програмний пакет *Matlab*.

Оптимізація за показником *IEB* виконувалася в два етапи: I – моделювання перерозподілу енергії між альтернативними та традиційними джерелами в системі в реальних погодних умовах для визначеного періоду часу: 2920 наборів вимірів параметрів навколишнього середовища (температура навколишнього середовища, тривалість сонячного сяяння, швидкість вітру) протягом календарного року (виміри через кожні 3 години); II – оптимізація параметрів системи теплохолодозабезпечення на основі змодельованого перерозподілу енергії з урахуванням змінних параметрів за індексом екологічної безпеки.

Обмеження керованих параметрів визначаються певними умовами:

– за рекомендаціями [1], геліоустановка може займати близько 20 % площі даху. Тобто, виходячи з технічних характеристик будівлі [8], верхня межа

можливої площі геліоколекторів обмежується 21 м², а нижня, виходячи з наявних на ринку колекторів сонячної енергії, – 1 м²;

– з огляду на обмеженість простору в комунальному секторі, діаметр вітроустановки не повинен перевищувати 4 м, оскільки вітроустановки більшого масштабу є незручними для встановлення на дахах будівель. Мінімальний діаметр серед представлених на українському ринку моделей складає 0,5 м;

– оскільки відповідно до архіву фактичної погоди [8], у досліджуваному регіоні хмарна безвітряна погода в даній місцевості недовготривала, тому акумулювати тепло доцільно на 2-3 доби. Виходячи з норм гарячого водоспоживання, об'єм теплового акумулятора для 4 мешканців будівлі доцільно обмежити 1000 л. Мінімальний об'єм серед представлених на українському ринку моделей складає 50 л;

– температура води в теплому акумуляторі обмежується його об'ємом і за технічними характеристикам не може перевищувати 95°C.

Таким чином, для досліджуваної системи теплохолодозабезпечення обмеженнями при розв'язанні оптимізаційної задачі є:

$$\begin{cases} A = \{a | 1 \leq a \leq 21\}; \\ D = \{d | 0,5 \leq d \leq 4\}; \\ V_{AK} = \{v | 50 \leq v \leq 1000\}; \\ T_{AK} \leq 95. \end{cases}$$

Оскільки рішеннями даної оптимізаційної задачі у варіаційному вигляді можуть бути такі значення площі геліоколекторів, діаметру вітроустановки та об'єму бака-акумулятора, які реально не існують на ринку, у практичній частині досліджень враховувалася реально існуюча номенклатура технічних пристроїв (табл. 1).

Таблиця 1

Область значень параметрів оптимізації

Показник		
Площа геліоколекторів, <i>A</i>	Діаметр вітроустановки, <i>D</i>	Об'єм акумулятора, <i>V_{AK}</i>
0,5	0,25	50
1,04	0,5	75
1,57	1,0	100
2,0	1,9	150
2,01	2,0	200
2,5	2,5	300
3,13	2,8	400
4,22	3,0	500
6,26	3,2	750
7,0	3,5	1000
9,4	3,9	
12,5	4,0	
15,0		
15,5		
18,7		
20,0		
21,0		

На рис. 1-3 наведено проміжні результати оптимізації:

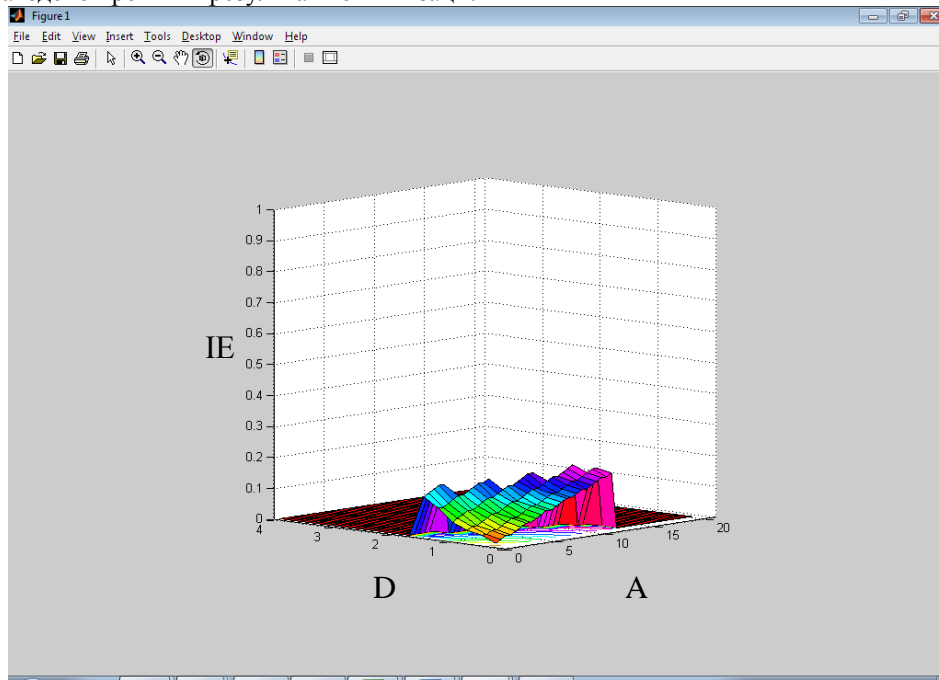


Рис. 1. Проміжний результат оптимізації при $V_{AK} = 50$ л

На рис. 1 можна спостерігати перепади значення ІЕБ, які пояснюються встановленими обмеженнями, зокрема обмеженням температури води в тепловому акумуляторі заданого об'єму. Її зростання спричиняється зростанням показників площі геліоколекторів та діаметру вітроустановки, причому останній параметр має значно більший вплив, оскільки залежність енерговиробництва (Q_{BU}) від діаметру (D) має квадра-

тичний характер, а від швидкості вітру (v) – кубічний. Залежність енерговиробництва геліоколектора ($Q_{СК}$) від його площі (A) та від інтенсивності сонячної радіації (I) має лінійний характер. При перевищенні значення температури в $95^{\circ}C$, зростання параметрів A та D припинялося для заданого об'єму теплового акумулятора й обиралося наступне значення V_{AK} .

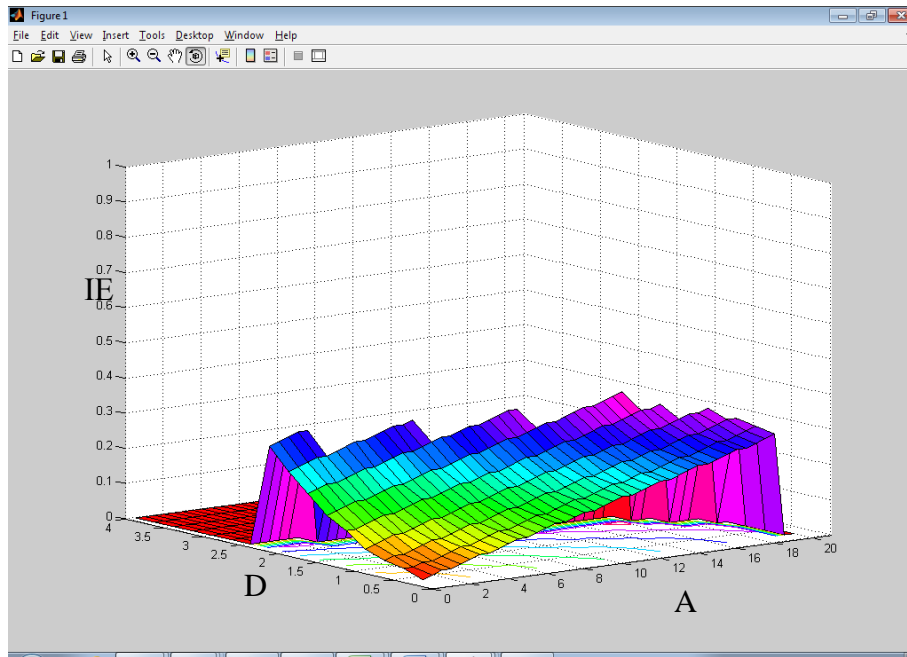


Рис. 2. Проміжний результат оптимізації при $V_{AK} = 200$ л

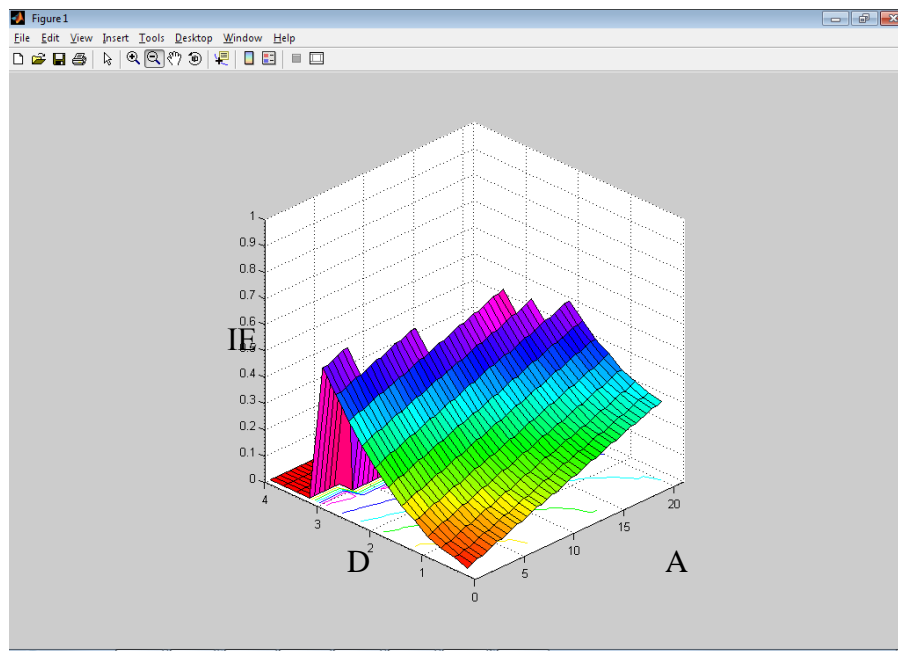


Рис. 3. Проміжний результат оптимізації при $V_{AK} = 500$ л

На рис. 4 наведено результати оптимізації індексу екологічної безпеки змодельованої системи тепло-

лодозабезпечення будівлі для граничного значення об'єму теплового акумулятора.

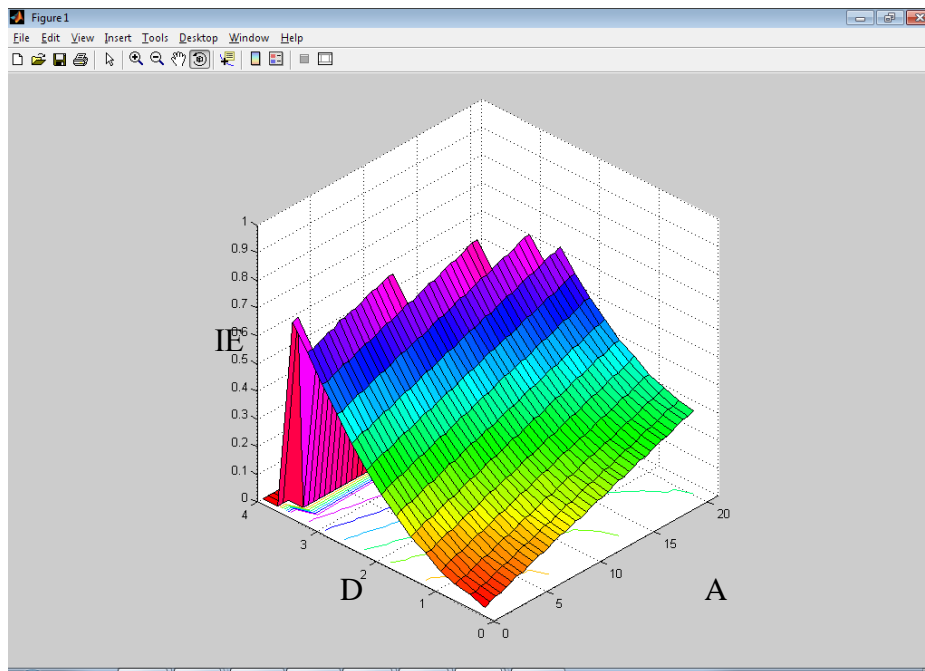


Рис. 4. Оптимізований показник індексу екологічної безпеки при $V_{AK} = 1000$ л

Оптимальне значення індексу екологічної безпеки отримано за таких значень індикаторів та відповідних їм коефіцієнтів вагомості (табл. 2):

Таблиця 2

Результати оптимізації ІЕБ системи теплохолодозабезпечення

Індикатор	Значення	Коефіцієнт вагомості	Значення
$I_{ЗА}$ – індикатор забруднення атмосферного повітря	0,22	$d_{ЗА}$	0,11
$I_{ЗГ}$ – індикатор утворення твердих відходів	0,33	$d_{ЗГ}$	0,11
$I_{ВГ}$ – індикатор відчуження території	0,34	$d_{ВГ}$	0,1
$I_{ЗТ}$ – індикатор теплового забруднення	0,31	$d_{ЗТ}$	0,17
$I_{ЗВ}$ – індикатор забруднення водних ресурсів	0,18	$d_{ЗВ}$	0,17
$I_{ВВ}$ – індикатор незворотного водовикористання	0,25	$d_{ВВ}$	0,17
$I_{ЗР}$ – індикатор радіаційного забруднення	0,27	$d_{ЗР}$	0,17

Узагальнені результати оптимізації наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Результати оптимізації ІЕБ системи теплохолодозабезпечення

Показник	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Індекс екологічної безпеки	ІЕБ	–	0,73
Площа геліоколекторів	A	m^2	15
Діаметр вітроустановки	D	м	3
Об'єм теплового акумулятора	V_{AK}	л	1 000

Висновки: 1. Розроблено математичну модель, яка дозволяє оптимізувати параметри систем теплохолодозабезпечення будівель за показником індексу екологічної безпеки шляхом перерозподілу потоків вітрової і сонячної енергії між підсистемами гарячого водопостачання, опалення, кондиціонування та очистки води з максимальним рівнем заміщення традиційних ресурсів альтернативними та повним використання надлишкової енергії, виробленої альтернативними джерелами.

2. Із метою мінімізації антропогенного впливу на довкілля та підвищення екологічної безпеки систем

теплохолодозабезпечення, при моделюванні перерозподілу енергопотоків у системі виконано оптимізацію за індексом екологічної безпеки на прикладі окремого житлового будинку. Показник *ІЕБ* оптимізовано на рівні 0,73 (за умови, що 1 відповідає ідеальній екологічно безпечній системі) при таких значеннях змінних параметрів: $A = 15 m^2$, $D = 3 m$, $V_{AK} = 1000$ л.

3. Рішення оптимізаційної задачі довело можливість підвищення індексу екологічної безпеки альтернативної системи, порівняно з традиційною на вугільному паливі на 63 %.

ЛІТЕРАТУРА

1. Забарний Г. М. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г. М. Забарний, А. В. Щурчков. – К. : Видавництво Національної академії наук України. Інститут технічної теплофізики, 2002. – 211 с.
2. Fedrizzi R. Intro – What LEED Measures / R. Fedrizzi. – United States Green Building Council, 2010. – 375 p.
3. Качинський А. Б. Екологічна безпека України : системний аналіз перспектив покращення [Електронний ресурс]: монографія / А. Б. Качинський – Режим доступу до монографії : <http://www.niss.gov.ua/book/Kachin/index.htm>.

4. Васько В. П. Управление параметрами электроэнергии автономных ветроэлектрических установок / В. П. Васько // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 1. – С. 53–56.
5. Dirk Mangold. Solar in the city. Active solar heating systems in urban areas // Renewable Energy World. – v4, № 3, 2011. – P. 100–111.
6. Earthship Global Model ; Radically Sustainable Buildings/ [Електронний ресурс]: стаття. – Режим доступу до статті : <http://customs.dp.ua/?tag=green+building#id=N2so9hyNWxc>.
7. Клименко Л. П. Модель енергоефективної системи теплохолодопостачання будівлі за допомогою вітрогеліоустановки з використанням традиційних джерел енергії як компенсуючих / Л. П. Клименко, Н. О. Воскобойнікова // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : збірник наукових праць. – Спеціальний випуск. – К., 2006. – С. 24–29.
8. Воскобойнікова Н. О. Математичне моделювання процесу теплохолодопостачання будівлі при комбінуванні альтернативних та традиційних джерел для кліматичних умов м. Миколаїв / Н. О. Воскобойнікова // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – К., 2007. – С. 111–116.
9. Воскобойнікова Н. О. Урахування трансформації негативного впливу при моделюванні індексу екологічної безпеки систем теплохолодозабезпечення / Н. О. Воскобойнікова // Наукові праці : Науково-методичний журнал. – Т. 191. Вип. 203. Техногенна безпека. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2012. – С. 172–177.
10. Трифонов А. Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения [Електронний ресурс]: монографія. – Режим доступу до монографії : http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/3_4.php.

Рецензенти: **Кутковецький В. Я.**, д.т.н., професор;
Мусієнко М. П., д.т.н., професор.

© Воскобойнікова Н. О., 2013

Дата надходження статті до редколегії 14.05.2013 р.

ВОСКОБОЙНІКОВА Наталія Олександрівна – старший викладач кафедри екології та природокористування ЧДУ імені Петра Могили.

Коло наукових інтересів: екологічна безпека, альтернативні джерела енергії.