

УДК 621.1.016:620.97(075.8)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Е. А. Антипов, кандидат технических наук, старший преподаватель

Л. В. Мартынюк, инженер

Я. С. Воронцов, студент магистратуры

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

E-mail: ievgeniy_antypov@ukr.net

Аннотация. *Приведены основы энергетической и экономической оптимизации энергетических систем с применением традиционных и возобновляемых источников энергии, дано определение эксергоэкономического фактора. Сформулированная задача оптимизации представляет собой многоэкстремальную задачу дискретного нелинейного программирования, усложненную ограничениями. Установлено, что объективной функцией (в денежных единицах) на стадии проекта есть расход, который предполагает использование рыночных цен на получаемые от системы продукты, и может быть минимизирован (доход максимизирован) исключительно техническим совершенствованием системы. В задаче минимизации стоимости энергетической системы задействованы: термодинамика, проектирование и производство, экономика. Показано, что каждая составляющая имеет собственные методы формирования приведенных величин и представлена соответствующими моделями. К тому же, при переходе к неоднородным линейным системам изложенный метод поиска оптимального варианта практически полностью сохраняется. Следовательно, метод динамического программирования, не позволяющий это сделать, заменен методом ветвей и границ. Как итог, определены значения фактора оптимизации и выполнен их эксергоэкономический анализ, указан оптимальный вариант системы энергоснабжения потребителя от энергии возобновляемых источников.*

Ключевые слова: *оптимизация энергетических систем, эксергоэкономический фактор, возобновляемые источники энергии, удельная стоимость топлива, эксергетические потери*

Актуальность. *Ограниченность традиционных топливно-энергетических ресурсов (газообразного, жидкого и твердого топлива), постоянный рост цен на них, а также негативное влияние продуктов их сгорания на окружающую среду,*

свидетельствуют о необходимости более рационального их использования, которое может быть достигнуто как за счет использования современного энергосберегающего оборудования, так и путем создания систем энергообеспечения потребителей с использованием возобновляемых источников энергии.

Анализ последних исследований и публикаций. Учитывая широкое разнообразие оборудования установок возобновляемой энергетики (ветрогенераторы, фотоэлектрические батареи, солнечные коллекторы, аккумуляторы и т.д.), можно разработать множество энергетических систем [1, 2], различных по комбинации первичных источников энергии. Однако, малая плотность потока возобновляемой энергии и невозможность регулирования режимов ее поступления не позволяют ориентировать развитие энергетики исключительно на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Поэтому, наиболее экономически эффективными представляются варианты совместного применения традиционных энергетических ресурсов и ВИЭ в составе одной системы для получения тепловой и электрической энергии.

Цель исследования – решить задачу энергетической и экономической оптимизации системы энергообеспечения коммунально-бытового потребителя при использовании возобновляемых источников энергии.

Материалы и методы исследования. Приведем основы эксергоэкономической оптимизации и сформулируем понятие эксергии.

Эксергия – это максимально возможная полезная работа (работоспособность), произведенная некоторым веществом, которое по химическому составу отличается от окружающей среды ($\mu \neq \mu_0$), находится при давлении и температуре, отличных от аналогичных характеристик окружающей среды ($p \neq p_0$) и ($T \neq T_0$), если данное рабочее вещество обратимо перевести из начального состояния (μ , p и T) в конечное, находящееся в равновесии с окружающей средой (μ_0 , p_0 и T_0) [1].

Удельная физическая эксергия потока рабочего вещества определяется по уравнению:

$$e = h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0). \quad (1)$$

Понятие эксергии как максимальной работоспособности удобно использовать при рассмотрении степени совершенства различных процессов с точки зрения превращения энергии. Если процесс протекает полностью обратимо, то получаемая суммарная работоспособность вещества (это же относится и к механической работе) должна быть равна затрачиваемой работоспособности. При наличии необратимости уменьшение работоспособности и является потерей энергии.

Эксергоэкономическую оценку целесообразно проводить на уровне компонентов систем [3–6].

Эксергоэкономика обладает специфической терминологией. Под *переменными* принято подразумевать величины, которые могут быть изменены с целью оптимизации. Чаще в виде переменных выступают термодинамические величины.

Под *топливом* подразумевается любой поток, входящий в компонент. Особый случай представляет компонент, в котором топливом компонента является топливо для всей системы.

Выходящие из компонента потоки могут (в общем случае) представлять:
продукт – поток, который направляется из рассматриваемого компонента к последующему, для которого он будет являться топливом;

деструкцию эксергии, в компоненте ассоциируется с капитальными и эксплуатационными затратами, связанными с размерами компонента;

потери эксергии, которые наблюдаются при рассмотрении условий взаимодействия компонента с окружающей средой.

Сформулированная задача оптимизации представляет собой многоэкстремальную задачу дискретного нелинейного программирования,

усложненную ограничениями.

Объективная функция (в денежных единицах) на стадии проекта есть расход

$$J_p = \sum c_F \cdot F + \sum c_Z \cdot Z + c_R, \quad (2)$$

или чистая стоимостная функция (доход)

$$J = \sum c_F \cdot F + \sum c_Z \cdot Z - \sum c_P \cdot P + c_R, \quad (3)$$

где c_p – удельная стоимость топлива; c_2 – дисконтированные капитальные затраты от Z ; c_p – удельная стоимость продукта; P – получаемый продукт (результат); c_e – постоянная стоимость остатка, как функция от совершенства проекта. Когда предпроектная стадия переходит в проектную, c_E может стать переменной для сравнения с другими решениями, не зависящими от проекта.

Уравнение (2) предполагает использование рыночных цен на получаемые от системы продукты, а объективная функция может быть минимизирована (доход максимизирован) исключительно техническим совершенствованием системы.

В задаче минимизации стоимости энергетической системы задействованы, по крайней мере, три составляющие: термодинамика (F, P), проектирование и производство (Z), экономика (c_F, c_P, c_Z). Каждая составляющая имеет собственные методы формирования приведенных величин, следовательно, должна быть представлена соответствующими моделями.

В общем случае термоэкономический критерий оптимальности имеет вид:

$$Z_p = \left[\frac{C_n - P_n}{K_n - e_k} \right], \quad (4)$$

где C_n, P_n – удельная цена и годовое потребление эксергии из внешних источников; K_n – годовые капитальные и другие, связанные с ними затраты в n -м элементе; e_k – годовой расход эксергии для получения k -го продукта.

Алгоритм оптимального синтеза однородных систем.

(I) Для данного p -этапа ($p = 1, 2, \dots, k$) рассчитать термоэкономические затраты $Z^{(p)}_{i_p}$ и выбрать элемент i_p отвечающий

$$Z^{(p)}_{i_p} = \min (Z^{(p)}_{i_p}),$$

(II) При переходе к этапу $(p + 1)$ развивать вариант, отвечающий $Z^{(p)}_{min}$.

(III) При достижении обрабатываемым потоком требуемых значений (этап $p = k$) рассчитать оптимальное значение термозкономических затрат в системе

$$Z_r^{min} = \sum_{m=1}^k Z_{\Sigma}^{(m)}. \quad (5)$$

При переходе к неоднородным линейным системам изложенный метод поиска оптимального варианта практически полностью сохраняется.

Следовательно, метод динамического программирования, не позволяющий это сделать, должен быть заменен методом ветвей и границ.

Алгоритм оптимального синтеза неоднородных систем.

(I) Для данного p -этапа ($p = 1, 2, \dots, k$), необходимо рассчитать термозкономические затраты $Z_{\Sigma}^{(p)}$ – сумму термозкономических затрат для данного и $(p - 1)$ предыдущих «оптимальных» вариантов.

(II) Выбрать элемент i_p , отвечающий $Z_{\Sigma}^{(p)min} = \min (Z_{\Sigma}^{(p)})$.

(III) Сравнить значения $Z_{\Sigma}^{(p)min}$ с аналогичными величинами предыдущих этапов ($p = (p - 1), (p - 2), \dots, 1$) и развивать вариант, для которого

$$Z_{\Sigma}^{min} = \min (Z_{\Sigma}^{(l)min}), l = 1, 2, \dots, p. \quad (6)$$

Экономическая модель функционирования в процессе эксплуатации системы определяется совместным решением системы ниже приведенных уравнений.

Удельная стоимость положительного эффекта системы, д.е./кВт

$$Z = Z_{кан} + Z_{топл} + Z_{ом}, \quad (7)$$

где $Z_{кан}$ – капитальные затраты системы, д.е./кВт; $Z_{топл}$ – затраты на начальную энергию (топлива или электроэнергию) для функционирования системы, д.е./кВт; $Z_{ом}$ – стоимость эксплуатации и обслуживания, д.е./кВт.

Критерии эксергоэкономического анализа:

– цена эксергии топлива

$$C_{эк} = \frac{Z_{топл}}{Q_{эк}}, \quad (8)$$

– цена эксергии продукта

$$C_{D,k} = \frac{c_{F,k}}{f_k}; \quad (9)$$

– стоимость, связанная с деструкцией эксергии

$$C_{D,k} = c_{F,k} \cdot E_{D,k}; \quad (10)$$

– стоимость, связанная с потерями эксергии

$$C_{L,k} = c_{F,k} \cdot E_{L,k}; \quad (11)$$

– стоимость капитальных инвестиций Z_k^{CI} ;

– стоимость эксплуатации и обслуживания Z_k^{OM} ;

– сумма двух последних слагаемых Z_k

$$Z_k = Z_k^{CI} + Z_k^{OM}; \quad (12)$$

– относительное различие цен

$$r_k = \frac{c_{D,k} - c_{L,k}}{c_{F,k}} = \frac{c_{D,k}}{c_{F,k}} - \frac{c_{L,k}}{c_{F,k}}; \quad (13)$$

– эксергоэкономический фактор

$$f_k = \frac{c_{F,k}}{Z_k}; \quad (14)$$

где Z_k^{69} – стоимость выработанной энергии системой

$$Z_k^{69} = Q \cdot C_e \cdot \eta, \quad (15)$$

где Q – количество выработанной энергии; C_e – стоимость единицы энергии; η – коэффициент полезного действия преобразователя.

Значения $c_{F,k}$ зависят от относительного положения k -го компонента в системе и его взаимосвязи с предшествующим и последующим компонентами. При этом, равенство произведения $c_{F,k}(E_{D,k} + E_{L,k})$ можно принять равным 10 % от $Z_{топл}$ отдельно для каждого варианта. Таким образом, эксергоэкономический фактор запишем

$$f_k = \frac{Z_k^{69}}{Z_k + 0,1 Z_{топл}}. \quad (16)$$

Далее выполним анализ общих положений использования возобновляемых источников энергии, которые достаточно хорошо освещены в [7, 8].

Результаты исследования и их обсуждение. Используя приведенную методику, а также формулы (6) – (16), проводим расчет величины

эксергоэкономического фактора для основных видов систем энергообеспечения потребителей от возобновляемых источников, к примеру, мощностью 20 кВт.

Стоимость системы энергообеспечения Z на основе ВИЭ будет равна [8]:

- для гелиосистемы:

$$Z = 609052,12 \text{ (грн);}$$

- для ФЭП:

$$Z = 701893,8 \text{ (грн);}$$

- для ветровой системы:

$$Z = 1577812,95 \text{ (грн);}$$

- для теплонасосной системы:

$$Z = 163174 \text{ (грн).}$$

Стоимость выработанной энергии системой (с учетом коэффициента полезного действия η) составит:

- для гелиосистемы (при $\eta = 0,55$):

$$Z^{6e} = 43380,79 \text{ (грн/год);}$$

- для ФЭП (при $\eta = 0,15$):

$$Z^{6e} = 145316,17 \text{ (грн/год);}$$

- для ветровой системы (при $\eta = 0,2$):

$$Z^{6e} = 116429,6 \text{ (грн/год);}$$

- для теплонасосной системы (при $\eta = 4,0$):

$$Z^{6e} = 68796 \text{ (грн/год).}$$

Эксергоэкономический фактор:

- для гелиосистемы:

$$f_{гс} = 0,071;$$

- для ФЭП:

$$f_{фэп} = 0,207;$$

- для ветровой системы:

$$f_{вс} = 0,074;$$

- для теплонасосной системы:

$$f_{\text{ТНС}} = 0,42.$$

Однако, принимая во внимание тот факт, что генерация энергии возобновляемых источников носит стохастический характер, необходимо предусмотреть возможность энергообеспечение потребителей от резервного источника энергии, например от электрического котла, в пропорции – 60:40.

С учетом изложенного, стоимость системы энергообеспечения от ТЭНового электрокотла Z будет равна:

$$Z = 75796 \text{ (грн.)}$$

Отсюда, эксергоэкономический фактор по сравнению с:

- гелиосистемой:

$$f_{\text{ГС}} = 0,109;$$

- ФЭП:

$$f_{\text{ФЭП}} = 0,32;$$

- ветровой системой:

$$f_{\text{ВС}} = 0,119;$$

- теплонасосной системой:

$$f_{\text{ТНС}} = 0,521.$$

Поэтому наиболее эффективными системами энергообеспечения от энергии возобновляемых источников являются фотоэлектрическая и теплонасосная, эксергоэкономический фактор которых, по сравнению с использованием электрической энергии, соответственно равен 0,32 и 0,521 у.е.

Выводы и перспективы. Рассмотрение общих принципов эксергоэкономической оптимизации энергетических систем на основе ВИЭ и сопоставление их с традиционными источниками энергии позволяет констатировать следующее:

1. В настоящее время в небольших автономных энергокомплексах экономически наиболее эффективными представляются варианты совместного применения традиционных энергетических ресурсов и ВИЭ.

2. Объективная функция (в денежных единицах) на стадии проекта есть расход, который предполагает использование рыночных цен на получаемые от системы продукты, и может быть минимизирован (доход максимизирован) исключительно техническим совершенствованием системы.

3. В задаче минимизации стоимости энергетической системы задействованы: термодинамика, проектирование и производство, экономика, каждая из которых имеет собственные методы формирования приведенных величин и представлена соответствующими моделями.

4. При переходе к неоднородным линейным системам изложенный метод поиска оптимального варианта практически полностью сохраняется.

5. Наиболее эффективными системами энергообеспечения от энергии возобновляемых источников являются фотоэлектрическая и теплонасосная, эксергоэкономический фактор которых, по сравнению с использованием электрической энергии, соответственно равен 0,32 и 0,521 у.е.

Список использованных источников

1. Денисова А. Е. Комбинированные системы теплоснабжения на базе солнечных установок [Текст] / А. Е. Денисова, А. С. Мазуренко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 6. – С. 14–19.

2. Горобець В. Г. Застосування сонячних енергетичних установок та акумуляторів теплоти в системах теплотабезпечення теплиць [Текст] / В. Г. Горобець, Є. О. Антипов // Науковий вісник НУБіП України. – К.: ВЦ НУБіП України, 2014. – Вип. 194, ч. 2. – С. 100–107.

3. Долинский А. А. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие [Текст] / А. А. Долинский, В. М. Бродянский. – К.: Наукова думка, 1991. – 360 с.

4. Degan A. Thermal design and optimization [Текст] / A. Degan, G. Tsatsaronis, M. Moran. – New-York: Willey, 1996. – 530 p.

5. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы [Текст] / Дж.

Тсатсаронис: пер. с англ. Т. В. Морозюк. – Одесса: Студия «Неоциант», 2002. – 152 с.

6. Долинский А. А. Оптимизация энергетических систем [Текст] / А. А. Долинский, Б. Х. Драганов. – К.: ЦП «Компринт», 2015. – 56 с.

7. Шишкин Н. Д. Малые энергоэкономические комплексы с возобновляемыми источниками энергии [Текст] / Н. Д. Шишкин. – М.: Готика, 2000. – 236 с.

8. Атмосфера. Готовые технические решения. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.atmosfera.ua/resheniya-2/>

References

1. Basok, B. I., Nakorchevskiy, A. I., Belyayeva, T. G., Chalayev, D. M., Nedbaylo, A. N., Golub, I. S. (2006). Eksperimental'nyy modul' geliogeotermal'noy ustanovki dlya teplosnabzheniya [Experimental module of a heliohetermal installation for heat supply]. *Industrial heat engineering*, 1, 69–78.

2. Denisova, A. E., Mazurenko, A. S. (2002). Kombinirovannyye sistemy teplosnabzheniya na baze solnechnykh ustanovok [Combined heat supply systems based on solar installations]. *Ecotechnologies and Resource Saving*, 6, 14–19.

3. Gorobets, V. G., Antypov, I. O. (2014). Zastosuvannya sonyachnykh enerhetychnykh ustanovok ta akumulyatoriv teploty v systemakh teplozabezpechennya teplyts [Application of solar power plants and heat accumulators in heating systems of greenhouses]. *Scientific Journal NUBiP Ukraine*, 194 (2), 100–107.

4. Degan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. (1996). [Thermal design and optimization]. New-York: Willey, 530.

5. Tsatsaronis, J. (2002). Vzaimodeystviye termodinamiki i ekonomiki dlya minimizatsii stoimosti energopreobrazuyushchey sistemy [Interaction of thermodynamics and economics to minimize the cost of an energy-transforming system]. Odessa: Studio "Neotsiant", 152.

6. Dolinsky, A. A. Draganov, B. H. (2015). Optimizatsiya energeticheskikh sistem [Optimization of energy systems]. Kyiv: "Komprint", 56.

7. Shishkin, N. D. (2000). Malyye energoekonomicheskiye kompleksy s vozobnovlyayemyimi istochnikami energii [Small energy-economic complexes with renewable energy sources]. Moscow: Gothic, 236.

8. The atmosphere. Ready-made technical solutions. Available at : <https://www.atmosfera.ua/resheniya-2/>

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ПОНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Є. О. Антипов, Л. В. Мартинюк, Я. С. Воронцов

Анотація. *Наведені основи енергетичної та економічної оптимізації енергетичних систем із застосуванням традиційних і поновлюваних джерел*

енергії, дано визначення ексергоекономічного фактора. Сформульована задача оптимізації є багатоекстремальною задачею дискретного нелінійного програмування, ускладнену обмеженнями. Встановлено, що об'єктивна функція (в грошових одиницях) на стадії проекту є витрата, яка передбачає використання ринкових цін на одержувані від системи продукти, і може бути мінімізована (дохід максимізований) виключно технічним вдосконаленням системи. У задачі мінімізації вартості енергетичної системи задіяні термодинаміка, проектування і виробництво, економіка. Показано, що кожна складова має власні методи формування наведених величин і представлена відповідними моделями. До того ж, при переході до неоднорідних лінійних систем викладений метод пошуку оптимального варіанта практично повністю зберігається. Отже, метод динамічного програмування, який не дозволяв цього зробити, замінений методом гілок і меж. Як підсумок, визначені значення фактора оптимізації та виконано його ексергоекономічний аналіз, визначений оптимальний варіант системи енергопостачання споживача від енергії поновлюваних джерел.

Ключові слова: оптимізація енергетичних систем, ексергоекономічний фактор, поновлювані джерела енергії, питома вартість палива, ексергетичні втрати

ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ENERGY SYSTEMS BASED ON RENEWABLE SOURCES OF ENERGY

I. Antypov, L. Martynyuk, J. Vorontsov

Abstract. The foundations of energy and economic optimization of energy systems with the use of traditional and renewable energy sources are given, the exergoeconomic factor is defined. The formulated optimization problem is a multi-extremal discrete nonlinear programming problem, complicated by constraints. It is established that the objective function (in monetary units) at the project stage is an expense that involves the use of market prices for products received from the system, and can be minimized (revenue is maximized) by purely technical improvement of the system. In the task of minimizing the cost of the energy system involved: thermodynamics, design and production, the economy. It is shown that each component has its own methods of forming the reduced values and is represented by the corresponding models. In addition, in the transition to heterogeneous linear systems, the method of searching for the optimal variant is almost completely preserved. Therefore, the method of dynamic programming, which does not allow this, is replaced by the method of branches and boundaries. As a result, the values of the optimization factor were determined and their exergoeconomic analysis was performed, the optimal version of the energy supply system of the consumer from renewable energy sources was indicated.

Key words: optimization of energy systems, exergoeconomic factor, renewable energy sources, unit cost of fuel, exergy losses