

УДК 621.371:330.138

Долинский А.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

К ВОПРОСУ ЭКСЕРГОЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Викладено основи оптимізації енергоспоживаючих систем методом ексергоекономічної концепції. Наведено алгоритми визначення ексергетичних втрат і ексергоекономічної оптимізації.

Изложены основы оптимизации энергопотребляющих систем методом эксергоэкономической концепции. Приведены алгоритмы определения эксергетических потерь и эксергоэкономической оптимизации.

Foundations of the optimization of energy-consuming systems by the method of exergy-economic concept are described. Algorithms of the determination of exergy losses and exergy-economic optimization are presented.

a – амортизационные расходы;

C – стоимость;

E – эксергия;

f – эксергоэкономический фактор;

K – годовые капитальные расходы;

q – коэффициент дисконтирования;

z – затраты;

w – удельное энергопотребление.

Индексы верхние:

CI – инвестиционные;

$fuel$ – топливо;

OM – эксплуатационные;

P – этап.

Индексы нижние:

D – деструкция;

F – топливо (входящие потоки эксергии);

K – число подмножеств;

L – потеря;

\min – минимальный;

n – число элементов системы.

Оптимизация любой энергетической системы означает вариацию структуры и параметров с целью минимизации капитальных и эксплуатационных затрат при соответствующих технических и ресурсных ограничениях, обеспечение защиты окружающей среды, создание условий эксплуатационной надежности и невысокой стоимости ремонта. Этим требованиям в значительной степени отвечает эксергоэкономический метод оптимизации, который получил развитие и признание в последней четверти XX столетия [1–5]. Существенно то, что указанный метод позволяет дать как энергетическую, так и экономическую оценку анализируемых систем в их взаимозависимости.

При общей постановке задача оптимизации решается следующим образом [6].

Рассмотрим энергетическую систему, состоящую из n элементов различных m параметров. Система однородная и расположена линейно.

Задача оптимизации заключается в таком распределении греющих потоков $C = (C_1, C_2, \dots, C_i, C_n)$, чтобы суммарные термоэкономические затраты в системе были минимальными:

$$\sum Z_i = Z_{\Sigma}^{\min}, \quad (1)$$

где Z_i – термоэкономические затраты в i -м компоненте системы.

Рассмотрим множество возможных термоэкономических затрат в системе

$$Z \{Z_{i_p}^{(p)}\} \quad p = 1, 2, \dots, k; i_p = 1, 2, \dots, [n - (p - 1)]. \quad (2)$$

Множество $Z \{Z_{i_p}^{(p)}\}$ можно разбить на k подмножеств. На каждом промежуточном этапе p необходимо выбрать такой поток C_i , для которого

$$Z_{i_p}^{(p)} \in Z_p \{Z_{i_p}^{(p)}\}.$$

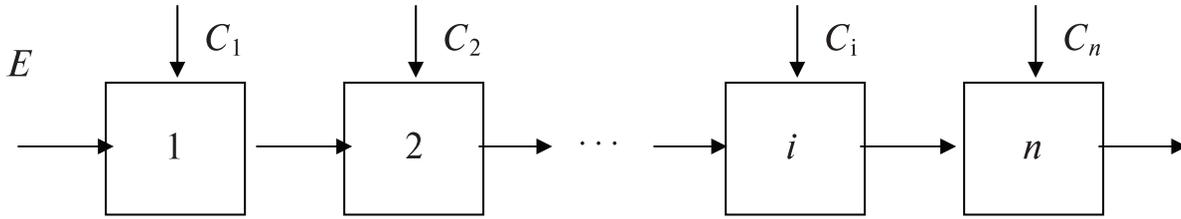


Рис. 1. Линейная энергетическая система.

Для выполнения условия оптимизации следует найти такой путь потоков стоимости

$$\bar{C} = (C_0^{(0)}, C_1^{(1)}, \dots, C_i^{(p)}, \dots, C_{[n-(p-1)]}^{(k)}), \quad (3)$$

для которого

$$Z_{i_p}^{(p)} = Z_{\min}^{(p)}; \quad i_p = 1, 2, \dots, [n-(p-1)], \quad (4)$$

где $Z_{\min}^{(p)}$ – минимальные термоэкономические затраты для этапа p .

Алгоритм Беллмана–Калаба, в основу которого положен анализ матрицы стоимостей, позволяет определить оптимальный вариант решения.

Эксергоэкономика обладает специфической терминологией.

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

Продукт (product) – поток, который направляется из рассматриваемого компонента к последующему, для которого он будет являться топливом.

Деструкция энергии (energy destruction) – дополнительная располагаемая работа (полученная или затраченная) для производства дополнительного эффекта по сравнению с теоретическим.

Потери эксергии (energy losses) – определяются условиями взаимодействия компонента (системы) с окружающей средой.

Эксергоэкономическая оценка проводится на уровне компонентов систем, используя следующие критерии для k -го компонента. Из эксергетического анализа известно:

- ◆ $E_{D,k}$ – абсолютная деструкция эксергии,

$$E_{D,k} = E_{F,k} - E_{P,k} - E_{L,k} \quad (5)$$

- ◆ ε_k – эксергетическая эффективность,

$$\varepsilon_k = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k}} = 1 - \frac{E_{D,k} + E_{L,k}}{E_{F,k}}. \quad (6)$$

- ◆ y_k – относительная деструкция эксергии,

$$y_{D,k} = \frac{E_{D,k}}{E_{F,tot}}. \quad (7)$$

Критерии эксергоэкономического анализа:

- ◆ цена эксергии топлива

$$c_{F,k} = \frac{C_{F,k}}{E_{F,k}}, \quad (8)$$

- ◆ цена эксергии продукта

$$c_{P,k} = \frac{C_{P,k}}{E_{P,k}}, \quad (9)$$

- ◆ стоимость, связанная с деструкцией эксергии:

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

- ◆ стоимость, связанная с потерями эксергии:

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

- ◆ стоимость капитальных инвестиций Z_k^{Cl} ,
- ◆ стоимость эксплуатации и обслуживания Z_k^{OM} ,

- ◆ сумма двух последних слагаемых Z_k :

$$Z_k = Z_k^{Cl} + Z_k^{OM}, \quad (12)$$

- ◆ относительное различие цен

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} + \frac{Z_k}{c_{F,k} E_{P,k}}, \quad (13)$$

- ◆ эксергоэкономический фактор

$$f_k = \frac{Z_k}{Z_k + c_{F,k}(E_{D,k} + E_{L,k})}. \quad (14)$$

Значения $c_{F,k}$ зависят от относительного положения k -го компонента в системе и его взаимосвязи с предшествующим и последующим компонентами.

Когда соответствующие функции цен установлены, цена оптимальной энергетической эффективности $\varepsilon_k^{\text{OPT}}$ для k -го компонента может приближенно определяться как:

$$\varepsilon_k^{\text{OPT}} = \frac{1}{1 + F_k} \quad (15)$$

при

$$F_k = \left(\frac{(\beta + \gamma_k) B_k n_k}{\tau c_{F,k} E_{P,k}^{1-m_k}} \right)^{\frac{1}{n_k+1}}, \quad (16)$$

где β – фактор восстановления капитала; γ_k – коэффициент, учитывающий фиксированную часть эксплуатационных затрат и затрат на обслуживание, зависящих от общих капитальных инвестиций, ассоциированных с k -ым компонентом; B_k , n_k и m_k – постоянные, используемые для определения функций ε_k и $E_{P,k}$; τ – среднее годовое время эксплуатации системы при номинальной производительности.

Эксергоэкономический анализ и оценка указывают и сравнивают реальные источники стоимости в системе (по ур. (10–12)), иллюстрируют процесс формирования стоимости в пределах системы, определяют оптимальную стоимость, по которой произведен каждый поток продукта.

Стоимость эксплуатации энергопреобразующей системы логически определяется как, д.е./кВт,

$$Z \equiv Z^{Cl} + Z^{fuel} + Z^{OM}. \quad (17)$$

Экономическая модель действительной энергопреобразующей системы представляет совместное решение системы уравнений:

◆ капитальные (инвестиционные) затраты системы, д.е./кВт,

$$Z^{Cl} = a a \frac{1}{t_A}; \quad (18)$$

для каждого элемента системы:

$$Z^{Cl} = a_k x_k^n (1+b)^y / N_k; \quad (19)$$

◆ затраты на начальную энергию для функционирования системы, д.е./кВт,

$$Z^{fuel} = w c_F; \quad (20)$$

◆ стоимость эксплуатации и обслуживания, д.е./кВт,

$$Z^{OM} = b \frac{1}{t_A} + d; \quad (21)$$

◆ амортизационные отчисления, д.е./кВт,

$$a = \frac{q^n (1-q)}{q^n - 1} \left(1 + \frac{i+r CP}{100 \cdot 2} \right); \quad (22)$$

◆ коэффициент дисконтирования

$$q^{-1} = \left(1 + \frac{i+t+v}{100} \right)^{-1}; \quad (23)$$

◆ удельное энергопотребление, кДж/(кВт·ч),

$$w = \frac{3600}{\eta}; \quad (24)$$

◆ среднее время работы системы, ч/год,

$$\tau_A = \frac{\text{Годовое производство полезного эффекта}}{\text{Номинальная мощность}}, \quad (25)$$

где c_F – цена топлива (д.е./кДж); a – инвестиционная стоимость (д.е./кВт); b – затраты на ремонт и обслуживание, зависящие от установленной мощности (д.е./кВт); d – затраты на ремонт и обслуживание, зависящие от поколения используемой техники (д.е./кВт); i – банковский процент инвестиционных затрат на создание системы (%/год); r – инфляционный коэффициент (%/год); n – срок службы объекта (год); CP – время создания объекта (год); t_A – годовые налоги (%/год); v – годовая страховка (%/год); x – характеристика k -го элемента; a – цена единицы оборудования; n, y – показатели функций; N – срок эксплуатации.

В общем случае эксергоэкономический критерий оптимизации имеет вид [1]

$$Z_{\Sigma} = \frac{\sum_n C_n E_n + \overline{K}_n}{\sum_k E_k}, \quad (26)$$

где C_n, E_n – стоимость и годовое потребление эксергии из внешних источников; \overline{K}_n – годовые капитальные и связанные с ними затраты в n -м элементе системы; E_k – годовой расход эксергии для получения k -го продукта.

Целью комплексной системы оптимизации является выбор таких значений параметров системы (технологических, конструктивных и пр.), которые обеспечили бы оптимальные или близкие к оптимальному значения критерия эффективности

$$Z_{opt} = \text{extr} \{Z(x_j)\}, \quad (27)$$

$$x_j \in R^n,$$

где R^n – n -мерное действительное векторное пространство.

Одной из существенных проблем, относящихся к термотрансформаторам, является экологическая проблема. Проанализируем экологический аспект в комплексе оптимизации энергопреобразующих систем.

С точки зрения эксергии экологическое влияние – это работа, выполняемая системой над окружающей средой.

Всю эксергию, которая вводится в уже сооруженную систему, принято называть эксергией топлива (не связано с разработкой оборудования).

$$E = \int_0^{\tau} E \exp(-\lambda \tau) d\tau \approx E [1 - \exp(-\lambda \tau_3)] = E(\tau_3) = E(\tau_3) \frac{\tau_\lambda}{\tau_3} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_\lambda}\right) \right], \quad (28)$$

где τ_λ – нормативное время дисконтирования, обратное степени дисконтирования λ ; τ_3 – полный срок службы системы.

В термоэкономике величина λ может изменяться как в сторону уменьшения (истощение естественных ресурсов), так и в сторону увеличения (разведывание новых месторождений).

В термоэкологии изменение величины λ зависит от двух факторов:

λ уменьшается всегда при использовании традиционных и невозобновляемых источников энергии, так как естественные ресурсы, независимо от места их добычи, в целом являются исчерпаемыми;

λ увеличивается при использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Необходимо подчеркнуть, что в настоящее время эксергоэкономический метод широко используется при решении различных оптимизационных задач, в том числе при использовании альтернативных источников, когенерационных установок и других вариантов энергетических систем.

Выводы

Эксергоэкономический метод является эффективным средством оптимизации энергосберегающих систем. Отличительной особенностью этого метода является то, что энергетические и экономические показатели определяются в их взаимозависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M.* Thermal Design and Optimization. – New York: J. Wiley, 1996. – 530 p.
2. *Тсатсаронис Дж.* Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Научн. ред. и пер. с англ. проф. Т. В. Морозюк. – Одесса: Студия “Негоциант”, 2002. – 152 с.
3. *Wu C. and Niculshin V.* Method of thermoecological optimization of energy intensive systems with linear structure on graphs // International Journal of Energy Research. – 2000. – 24. – P. 615–623.
4. *Лозано М.А., Валеро А.* Теория эксергетической стоимости // Энергия. – 1993. – 18, № 9. – Пергамон-Пресс. – С. 939–960.
5. *Драганов Б.Х.* Термоэкономическая оптимизация энергетических систем при эксплуатационном и экологическом режимах их работы // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 2006. – № 2. – С. 8–10.
6. *Niculshin V., Andreev L.* Exergy Efficiency of Complex Systems // Proceedings of International Conference of Ocean Technology and Energy. – OTEC/DOWA, 99, Imari, Japan. – 1999. – P. 161–162.

Получено 12.06.2009 г.