

УДК 697.3

Г.А. Баласанян, канд. техн. наук, доц.,
А.С. Мазуренко, д-р техн. наук, проф.,
Одес. нац. политехн. ун-т

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Г.А. Баласанян, А.С. Мазуренко. Оптимізація параметрів теплової схеми інтегрованої системи енергоспоживання. Запропоновано інтегровану систему енергоспоживання, яка забезпечує ефективне використання когенераційної установки на базі газопоршневого двигуна і теплового насосу, викладено методику оптимізації техніко-економічних параметрів теплової схеми на основі ексергоекономічного аналізу. Отримано залежності для оцінки термодинамічної і економічної ефективності основних компонентів системи.

G.A. Balasanian, A.S. Mazurenko. Optimization of the parameters of an integrated power grid thermal scheme. An integrated power grid system that provides effective using of co-generation plant based on a gas-piston engine and a heat pump is proposed. The methodology for technical-economic parametric optimization of the thermal scheme based on exergoeconomic analysis is defined. The relations for an estimation of thermodynamic and economic efficiency of the basic components of a system are obtained.

Для когенерационных установок на базе газопоршневых двигателей (ГДГ) отношение генерируемой электроэнергии к утилизируемому теплу находится в диапазоне 1:1,5...1:2,0, что примерно соответствует соотношению потребления электроэнергии и тепла на горячее водоснабжение (ГВС) коммунально-бытовыми потребителями. Эффективная эксплуатация таких установок возможна при согласовании графиков тепловой и электрической нагрузок потребителя [1, 2].

В отопительный период потребление тепла возрастает в 3...4 раза, а соотношение электрической мощности к тепловой достигает 1:4...1:6, что более характерно для генераторов на базе газотурбинных двигателей. Однако, экономические преимущества газотурбинных установок (ГТУ) по сравнению с ГДГ сказываются при единичной мощности свыше 5...10 МВт [3], поэтому автономные коммунально-бытовые потребители с нагрузками 0,2...1,0 МВт, как правило, дополнительно оборудуются отопительными водогрейными котлами, что в значительной степени снижает эффективность когенерации в зимний период.

Для обеспечения эффективности когенерационной установки на базе ГДГ в течение всего года предлагается автономная интегрированная система энергоснабжения с тепловым насосом (ТН) компрессорного типа (рис. 1). На привод компрессора расходуется до 50 % мощности (электрической или механической), генерируемой ГДГ. При коэффициенте преобразования ТН, равном 2...4, достигается необходимое соотношение электрической и тепловой мощности потребителя в отопительный период.

Рассматриваемая система включает значительное количество энергопреобразующих элементов, поэтому ее эффективность определяется не только технико-экономическими параметрами ГДГ, но во многом зависит от технико-экономических характеристик каждого элемента тепловой схемы [4].

Рассмотрим методику оптимизации параметров тепловой схемы интегрированной системы энергоснабжения, основанной на эксергоэкономическом анализе. Оптимизация параметров приведенной тепловой схемы выполняется с целью минимизации суммарной стоимости продуктов, вырабатываемых системой (электроэнергии, тепла на ГВС и отопления), с учетом капитальных затрат на создание системы и эксплуатационных издержек.

Эксергоэкономический метод, положенный в основу анализа и оптимизации представленной схемы, объединяет эксергетический и экономический анализ и позволяет проанализировать режимы работы энергопреобразующей системы с точки зрения стоимости [5].

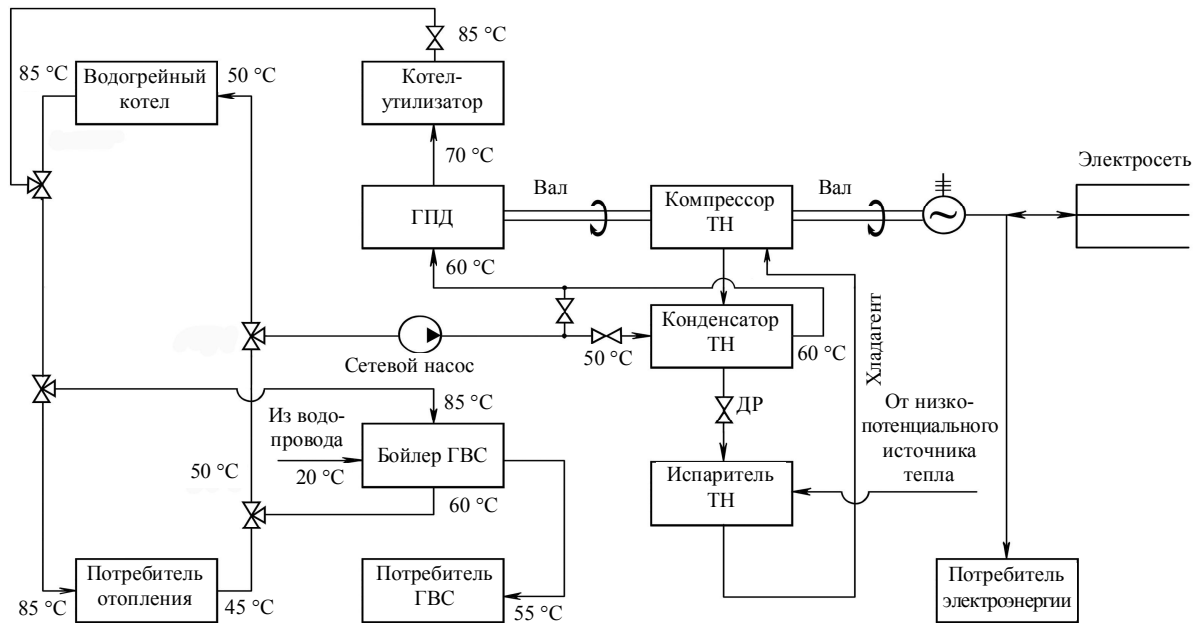


Рис. 1. Тепловая схема интегрированной системы энергоснабжения на базе газопоршневого двигателя-генератора и теплового насоса

Суть метода заключается в разбивке системы на отдельные энергопреобразующие компоненты, для каждого из которых можно записать уравнение баланса стоимости, которое показывает, что сумма стоимостей, связанных с процессом транспорта эксергии, равна сумме стоимостей всех видов эксергии плюс соответствующая стоимость капитальных затрат и расходов на обслуживание [6]

$$\sum_e C_{e,k} + C_{w,k} = \epsilon_{q,k} + \sum_i C_{i,k} + Z_k,$$

где $C_{e,k}$, $C_{i,k}$ — соответственно входная и выходная стоимости потоков эксергии в k -м компоненте;

$C_{w,k}$ — стоимость потока эксергии, связанная с затратой работы в компоненте;

$C_{q,k}$ — стоимость потока эксергии, связанная с выводом тепла из компонента;

Z_k — стоимость капитальных затрат и расходов на обслуживание k -го компонента.

Для каждого компонента системы вводится понятие “топливо” (любое уменьшение эксергии потока между входом и выходом) и “продукта” (любое увеличение эксергии потока между входом и выходом), а также вспомогательные уравнения стоимости, характеризующие взаимосвязь между компонентами.

Балансы стоимости для всех компонентов и вспомогательные уравнения стоимости образуют систему линейных уравнений, в результате решения которой определяется стоимость каждого материального и энергетического потока в системе. На схеме (рис. 2) представлены только те компоненты, в которых происходит преобразование энергии, каждый поток пронумерован и его индекс используется в уравнениях стоимости.

Система включает следующие уравнения:

— уравнение баланса стоимости газопоршневого двигателя-генератора (ГДГ)

$$C_1 + Z_{ГДГ} = C_2 + C_5 - C_4 + N_{эл} \cdot C_w + N_{компр} \cdot C_w,$$

где C_w — стоимость одного кВтч электроэнергии, грн/кВтч;

$N_{эл}$ — электрическая мощность ГДГ, кВт;

$N_{\text{компр}}$ — мощность на привод компрессора ТН, кВт;

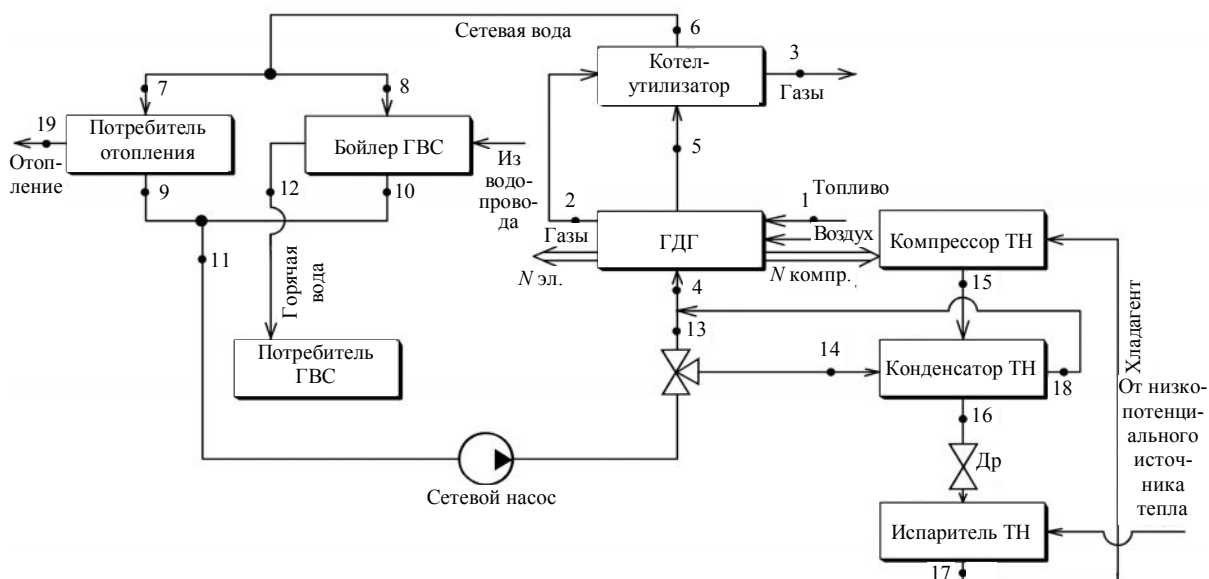


Рис. 2. Схема потоков эксергии интегрированной системы энергоснабжения

— уравнение баланса стоимости котла-утилизатора

$$C_2 - C_3 + Z_{\text{КУ}} = C_6 - C_5,$$

— уравнение баланса стоимости бойлера горячего водоснабжения (ГВС)

$$C_{12} = C_8 - C_{10} + Z_{\text{Б}},$$

— уравнение баланса стоимости системы отопления

$$C_{19} = C_7 - C_9 + Z_{\text{ОТ}},$$

— уравнение баланса стоимости компрессора ТН

$$C_{15} - C_{17} = N_{\text{компр}} \cdot C_w + Z_{\text{ТН}},$$

— уравнение баланса стоимости конденсатора ТН

$$C_{15} - C_{16} = C_{18} - C_{14},$$

— уравнение баланса стоимости испарителя ТН

$$C_{17} - C_{16} = 0,$$

где C_k , $k = \overline{1,19}$ — стоимость соответствующих потоков, грн/ч;

$Z_{\text{ГДГ}}, Z_{\text{КУ}}, Z_{\text{Б}}, Z_{\text{ОТ}}, Z_{\text{ТН}}$ — соответственно стоимость капитальных затрат и расходов на обслуживание ГДГ, котла-утилизатора, бойлера, системы отопления и теплового насоса, грн/ч;

— дополнительные уравнения стоимости

$$\left\{ \begin{array}{l} C_7 = C_6 - C_8, \\ C_{11} = C_9 + C_{10}, \\ C_{13} = C_{11} - C_{14}, \\ C_4 = C_{13} + C_{18}, \\ C_w = \frac{C_2}{E_2}, \\ \frac{C_2}{E_2} = \frac{C_3}{E_3}, \\ \frac{C_5 - C_4}{E_5 - E_4} = C_w, \\ \frac{C_{15}}{E_{15}} = \frac{C_{16}}{E_{16}}, \\ \frac{C_9}{E_9} = \frac{C_7}{E_7}, \\ \frac{C_8}{E_8} = \frac{C_{10}}{E_{10}}, \\ \frac{C_{17} - C_{16}}{E_{17} - E_{16}} = \frac{C_{15} - C_{17}}{E_{15} - E_{17}}, \end{array} \right.$$

где E_m , $m = \overline{2, 18}$ — соответствующие потоки эксэргии, кВт.

Представленная система уравнений дополнена математической моделью, которая устанавливает зависимость технологических параметров в каждой точке системы от капитальных затрат на устранение термодинамической неэффективности оборудования и эксплуатационных издержек системы.

Целевая функция, значение которой минимизируется, равна суммарной стоимости “продукта” системы (электроэнергия, горячая вода и отопление) и определяется как

$$C_{\Sigma} = C_w \cdot N_{\text{эл}} + (C_{10} - C_8) + (C_9 - C_7) \rightarrow \min.$$

Поставленная задача оптимизации является задачей нелинейного программирования, которая решена с использованием электронных таблиц Excel (программа “Поиск решения”).

Исходные данные для решения задачи:

— номинальная электрическая мощность ГДГ — $N_{\text{ном}} = 800$ кВт;

— электрическая нагрузка системы — $N_{\text{эл}} = 400$ кВт;

— тепловая нагрузка по ГВС — $N_{\text{ГВС}} = 600$ кВт;

— тепловая нагрузка по отоплению — $N_{\text{отопл}} = 1800$ кВт;

— цена топлива — $\Pi_{\text{газа}} = 0,34$ грн/м³;

— низшая теплота сгорания газа — $Q_p^H = 32$ МДж/м³;

— температура окружающей среды — $t_{\text{ос}} = 15^\circ\text{C}$;

— коэффициент избытка воздуха — $\alpha = 1,5$.

Результаты расчета эксэргии потоков, стоимости потоков эксэргии, других технологических параметров в каждой точке тепловой схемы энергопреобразующей системы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры тепловой схемы энергопередающих систем

№ точки на рис. 2	Наименование потока	Массовый расход, кг/с	Температура, °С	Эксергия потока, кВт	Стоимость единицы эксергии, грн/кВтч	Стоимость потока, грн/ч
1	Топливо	0,062	15	2623	0,047	124,2
	Воздух	1,360	15	0	0	0,00
2	Продукты сгорания после ГДГ	1,42	617	454,4	0,089	40,2
3	Продукты сгорания после КУ	1,42	167	48,7	0,089	4,3
4	Сетевая вода перед ГДГ	12	72	273,9	0,276	75,5
5	Сетевая вода после ГДГ	12	87,3	423,1	0,21	88,7
6	Сетевая вода после КУ	12	101,3	589,0	0,215	126,5
7	Сетевая вода на отопление	8,7	101,3	428,4	0,215	92,0
8	Сетевая вода на бойлер	3,3	101,3	160,7	0,215	34,5
9	Сетевая вода после отопления	8,7	52,1	92,3	0,215	19,8
10	Сетевая вода после бойлера	3,3	57,6	44,1	0,215	9,5
11	Сетевая вода — смесь после отопления и бойлера	12	53,6	136,0	0,215	29,3
	Водопроводная вода	3,58	15	0	0	0,00
12	Горячая вода на ГВС	3,58	55	43,3	0,664	28,7
	Электрическая мощность, кВт	-	-	400	0,089	35,4
	Мощность на привод компрессора, кВт	-	-	400	0,089	35,4
13	Сетевая вода на ГДГ (за вычетом расхода на конденсатор)	0	53,6	0	0	0
14	Сетевая вода на конденсатор	12	53,6	134,9	0,22	29,3
15	Хладагент после компрессора	-	-	1329	0,047	61,8
16	Хладагент после конденсатора	-	-	400	0,047	18,6
17	Хладагент после испарителя	-	-	928,6	0,022	20,4
18	Сетевая вода после конденсатора	12	72	273,0	0,28	75,2
19	Отопление	-	-	-	-	77,3

Технико-экономические показатели системы:

- электрический КПД — 0,305;
- коэффициент преобразования ТН — 2,32;
- коэффициент использования топлива (с учетом ТН) — 1,07;
- себестоимость электроэнергии — 8,86 коп/кВтч;
- себестоимость тепла на ГВС — 4,78 коп/кВтч;
- себестоимость тепла на отопление — 4,4 коп/кВтч.

Термодинамическая эффективность каждого компонента и системы в целом была оценена по следующим критериям:

- Абсолютная деструкция эксергии для k -го компонента

$$E_{D,k} = E_{F,k} - E_{P,k},$$

где $E_{F,k}$ — эксергия “топлива” k -го компонента;

$E_{P,k}$ — эксергия “продукта” k -го компонента;

- Эксергетическая эффективность k -го компонента

$$\varepsilon_k = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k}};$$

— Эксергоэкономический фактор для k -го компонента

$$f_k = \frac{Z_k}{Z_k + c_{F,k} \cdot E_{D,k}},$$

где $c_{F,k}$ — стоимость единицы эксэргии “топлива” k -го компонента.

Если значение эксергоэкономического фактора f_k низкое, то необходимо повысить эффективность k -го компонента, увеличив инвестиционные затраты Z_k на него. Если значение f_k высокое, то инвестиционные затраты снижают за счет уменьшения термодинамической эффективности компонента.

Результаты расчета эффективности системы по приведенным критериям приведены в таблице 2.

Показатели эффективности элементов энергопреобразующей системы

Таблица 2

Наименование компонента	Деструкция эксэргии $E_{D,k}$, кВт	Эксергетическая эффективность ε_k	Кап. затраты и обслуживание Z_k , грн/ч	Эксергоэкономический фактор f_k
ГДГ	1220	0,535	23,91	0,339
КУ	239,2	0,410	1,95	0,084
Бойлер	73,3	0,371	3,67	0,189
Отопление	48,2	0,857	7,08	0,406
Конденсатор	790,4	0,149	6,00	0,140
Вся система	2420	0,232	42,62	0,315

Приведенные результаты показывают, что термодинамическая эффективность ε_k каждого компонента и системы в целом достаточно высока, однако значение эксергоэкономического фактора f_k для котла-утилизатора, бойлера и конденсатора значительно ниже, чем для ГДГ, что свидетельствует о необходимости дополнительных инвестиционных затрат в эти компоненты с целью повышения их эксергетической эффективности, в частности, снижения температуры уходящих газов за котлом-утилизатором, снижения температуры сетевой воды за бойлером и конденсатором (повышения коэффициента преобразования ТН).

На рис.3 приведены зависимости, показывающие влияние температуры газов за котлом-утилизатором на эксергоэкономические показатели системы.

Таким образом, предложена интегрированная система энергоснабжения, обеспечивающая эффективное использование когенерационной установки на базе ГДГ и ТН в течение всего года, изложена методика оптимизации технико-экономических параметров тепловой схемы на основе эксергоэкономического анализа, получены зависимости для оценки термодинамической и экономической эффективности основных компонентов системы.

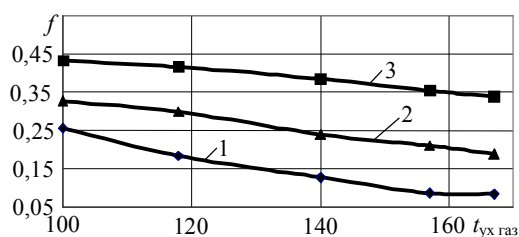


Рис. 3. Зависимость эксергоэкономического фактора от температуры уходящих газов за котлом-утилизатором: 1 — КУ; 2 — ГДГ; 3 — бойлер

Литература

1. Баласанян Г.А. Согласование графиков тепловой и электрической нагрузок для систем когенерации малой мощности / Баласанян Г.А., Мазуренко А.С. // Пром. теплотехника. — 2005. — № 3. — С. 32 — 39.
2. Баласанян Г.А. Использование аккумулирования тепла при согласовании графиков тепловой и электрической нагрузок когенерационных установок / Баласанян Г.А., Мазуренко А.С. // Інтегровані технології та енергозбереження. — 2005. — № 3. — С. 27 — 33.
3. Замоторин Р.В. Малые тепловые электростанции — поршневые или турбинные // Энергетика и промышленность России. — 2004. — № 20. — С. 4 — 8.
4. Баласанян Г.А. Оптимізація параметрів теплової схеми установки когенерації малої потужності на основі ексергоекономічних методів / Баласанян Г.А., Мазуренко А.С. // Тр. Одес. Академії холода. — Одесса, 2005. — Вып. 1. — С. 43 — 48.
5. Bejan A. Thermal Design and Optimization / Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. — New York: J. Wiley, 1996. — 128p.
6. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы. — Одесса: ООО “Студия “Негоциант”, 2002. — 152 с.

Поступила в редакцию 21 ноября 2005 г.
