

УДК 621.311.22

БАЛАСАНИЯ Г.А.<sup>1</sup>, МОРОЗИЮК Т.В.<sup>2</sup><sup>1</sup>Одесский национальный политехнический университет<sup>2</sup>Морская Академии Щецина (Польша)

## КОНЦЕПЦИЯ ЭКСЕРГИИ В СТРУКТУРНОМ АНАЛИЗЕ СИСТЕМ КОГЕНЕРАЦИИ

У статті розглянуто енергетичний та ексергетичний аналіз систем когенерації на базі двигунів внутрішнього згорання. На підставі результатів ексергетичного аналізу вказано шляхи удосконалення схем систем когенерації.

В статье рассмотрен энергетический и эксергетический анализ систем когенерации на основе двигателя внутреннего сгорания. На основании результатов эксергетического анализа показаны пути совершенствования схем систем когенерации.

In this paper, the energetic and exergetic analyses of cogeneration systems based on an internal-combustion engine are performed. The ways for improving the schematics of such cogeneration systems with the help of exergetic analysis are given.

$E$  – эксергия потока;

$k$  – номер потока эксергии;

$Q$  – теплота;

$T$  – абсолютная температура;

$t$  – относительная температура;

$W$  – механическая работа;

$\eta$  – тепловой КПД термодинамического цикла ДВС;

$\varepsilon$  – коэффициент эксергетической эффективности.

**Индексы нижние:**

$D$  – деструкция;

$F$  – топливо;

$i$  – количество полезных эффектов, произведенных системой;

$k$  – номер элемента системы;

$L$  – потери;

$n$  – количество элементов, входящих в состав системы когенерации;

$P$  – продукт;

ТН – тепловой насос;

$tot$  – общий.

**Индексы верхние:**

$cp$  – среднепланиметрический.

**Сокращения:**

$COP$  – коэффициент преобразования теплового насоса;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

КГС – когенерационная схема;

КПД – коэффициент полезного действия.

### Введение

В последнее десятилетие происходит смена ориентиров в сфере энергетической политики. Традиционное мнение о целесообразности применения централизованных систем электро- и теплоснабжения в густонаселенных районах (города, районные центры) было сформировано на основании того факта, что теплоэлектроцентрали обладали более высокой степенью термодинамического совершенства, чем децентрализованные системы теплоснабжения. Многие годы только величина термодинамической эффективности принималась во внимание при сравнении различных систем

электро- и теплоснабжения, так как экономические тарифы на электроэнергию и теплоту регулировались государством, а экологических тарифов не существовало. Изменение экономической ситуации в Украине, а также ратификация международных экологических актов нашей страной повлекли за собой изменение мировоззрения в области производства и потребления энергии.

Одним из эффективных способов совершенствования системы тепло- и электро-снабжения является создание систем когенерации с максимальным использованием вторичных и возобновляемых источников энергии [1].

### Постановка задачи

Стойкая тенденция повышения цен на энергоносители, а также ужесточающиеся требования экологической безопасности энергопреобразующих систем свидетельствуют о том, что ныне величина термодинамической эффективности уже не может рассматриваться как основной критерий, на основании которого должно быть принято решение о целесообразности применения той или иной системы тепло- и электроснабжения. Стоимость произведенной электроэнергии и теплоты, а также экологические показатели также играют существенную роль [2].

С этих позиций авторы продемонстрируют эволюцию системы когенерации, основанную на использовании двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Подобные системы когенерации широко применяются в мире для производства электроэнергии и теплоты в диапазоне мощностей от нескольких киловатт до десятков мегаватт. Основная проблема при использовании систем когенерации заключается в согласовании графиков потребления и производства электроэнергии и теплоты [1]. Полное согласование этих графиков возможно лишь в исключительных случаях, поэтому рациональным является определение приоритетного режима работы системы когенерации: работа по электрическому или по тепловому графику нагрузок.

### Термодинамический анализ систем когенерации

Термодинамическая схема ДВС изображена на рис.1 (схема ДВС-1) в виде термотрансформатора [3]. Температурный уровень каждого теплового потока указан условно по вертикали.

Энергетический баланс ДВС:

$$Q_1 = W + Q_2 \quad (1)$$

или

$$Q_1 = \frac{Q_2}{1 - \eta}, \quad (2)$$

где  $W$  — механическая работа, произведенная ДВС;  $Q_1$  — теплота, подведенная в цикле;  $Q_2$  —

теплота, отведенная в окружающую среду с выхлопными газами.

Теоретическая величина теплового КПД (ДВС работает по циклу Отто) может быть выражена через среднепланиметрические температуры источников подвода ( $T_1^{cp}$ ) и отвода ( $T_2^{cp}$ ) теплоты

$$\eta_{теор} = \frac{T_1^{cp} - T_2^{cp}}{T_1^{cp}}. \quad (3)$$

Необходимым условием функционирования ДВС является наличие системы охлаждения. Для термодинамического анализа ДВС с системой охлаждения (рис. 1, схема ДВС-2) величина  $Q_2$  должна быть разделена на две части:  $Q_2^1$  — теплота, отводимая с выхлопными газами, и  $Q_2^2$  — теплота, отводимая с помощью системы охлаждения. Для схемы ДВС-2 оба тепловых потока  $Q_2^1$  и  $Q_2^2$  представляют тепловой сброс ДВС. Таким образом, ур.(1) и (2) остаются справедливыми для схемы ДВС-2.

Очевидно, что тепловой поток  $Q_2^2$  может быть использован для целей теплоснабжения (отопления и/или горячего водоснабжения). В этом случае ДВС превращается в систему когенерации — рис. 1, схема КГС-1.

Для этой схемы тепловой КПД

$$\eta = \frac{W + Q_2^2}{Q_1}, \quad (4)$$

однако величина  $\eta$  уже не может быть выражена через соответствующие температуры термодинамического цикла ДВС, что следует из (3).

Обычно  $Q_2^1 > Q_2^2$ , к тому же высокий температурный потенциал  $Q_2^1$  позволяет полезно использовать часть этой теплоты для целей теплоснабжения (рис. 1, схема КГС-2).

В том случае, если система когенерации работает по электрическому графику нагрузок и тепловая нагрузка потребителя превышает теплопроизводительность системы когенерации, то возникающий дефицит теплоты  $\Delta Q$  может быть покрыт следующим образом [1]:

- ◆ при суточных колебаниях величины  $\Delta Q$  путем применения системы аккумулирования теплоты (рис.1, схема КГС-3), а также использованием возобновляемых источников энергии  $Q_1^*$  (рис. 1, схема КГС-4);

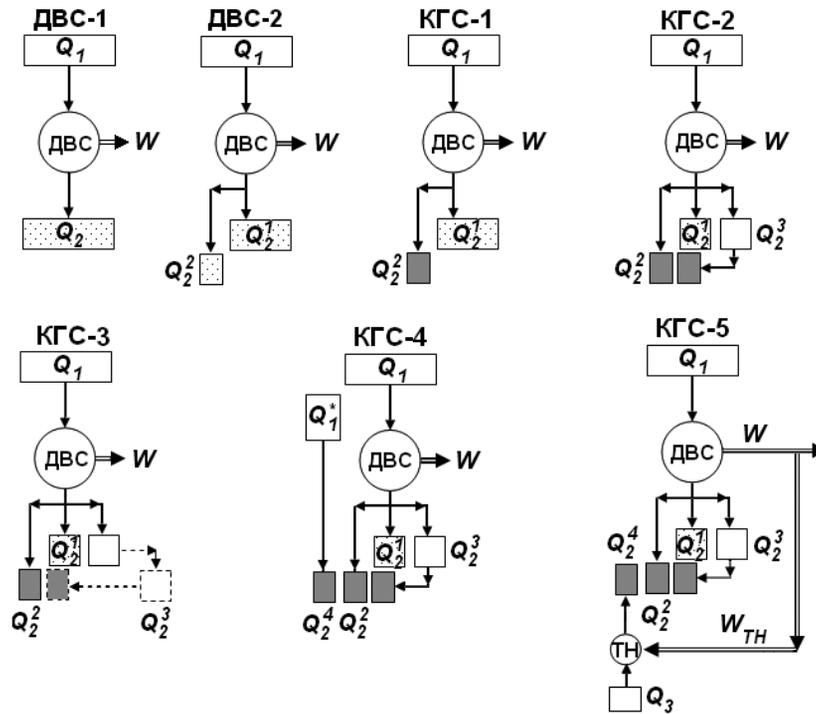


Рис. 1. Термодинамические схемы систем когенерации на базе ДВС.

◆ при сезонных колебаниях величины  $\Delta Q$  рациональным является использование различных типов тепловых насосов [1–3], например, компрессорного (рис. 1, схема КГС-5). Понятно, что в этом случае работа, произведенная системой когенерации, должна оставаться постоянной ( $W = \text{const}$ ), а работа, произведенная ДВС, увеличена на величину работы  $W_{\text{ТН}}$ , потребляемой компрессорным тепловым насосом.

Тепловой КПД для систем когенерации, изображенных на рис. 1, определится:

◆ для схемы КГС-2

$$\eta = \frac{W + Q_2^2 + Q_2^3}{Q_1}; \quad (5)$$

◆ для схемы КГС-3 (5) остается справедливым, так как тепловой поток  $Q_2^3$  производится системой когенерации в течение всего времени эксплуатации, однако в некоторый промежуток времени эта теплота аккумулируется, что дает возможность использовать ее в другой промежуток времени. Очевидно, что при анализе действительной системы аккумулирования теплоты величина  $Q_2^3$ , передаваемая аккумулятору в фазе зарядки аккумулятора, будет выше, чем величина  $Q_2^{3*}$ , полу-

чаемая в фазе разрядки аккумулятора, что связано с тепловыми потерями в аккумуляторе теплоты;

◆ для схемы КГС-4

$$\eta = \frac{W + Q_2^2 + Q_2^3 + Q_2^4}{Q_1 + Q_1^*}; \quad (6)$$

◆ для схемы КГС-5

$$\eta = \frac{W + Q_2^2 + Q_2^3 + Q_2^4}{Q_1}, \quad (7)$$

где величина  $Q_2^4$  обязательно должна быть выражена через произведение работы, затрачиваемой тепловым насосом, и коэффициента преобразования теплового насоса ( $COP_{\text{ТН}}$ ). При этом (7) следует переписать в виде

$$\eta = \frac{W + Q_2^2 + Q_2^3 + W_{\text{ТН}} \cdot COP_{\text{ТН}}}{Q_1}. \quad (8)$$

### Эксергетический анализ систем когенерации

Анализ систем когенерации на базе ДВС исключительно с использованием первого закона

термодинамики не позволяет в полной мере описать совершенство протекающих процессов, а также учесть температурный уровень каждого теплового потока. Использование эксергетического анализа дает возможность осуществить полный и разносторонний анализ системы когенерации.

Напомним, что современный эксергетический анализ оперирует понятиями “эксергия топлива”  $E_F$  и “эксергия продукта”  $E_P$ , определение которых подробно дано в [3,4], взамен устаревших “входящий эксергетический поток” и “выходящий эксергетический поток”. На основании этого эксергетический баланс любой энергопреобразующей системы, в том числе и системы когенерации, имеет вид

$$E_{F,tot} = \sum_i E_P + \sum_n E_{D,k} + E_{L,tot} \quad (9)$$

Деструкция эксергии ( $E_{D,k}$ ) в  $k$ -ом элементе системы когенерации описывает необратимость процесса в этом элементе. Потери эксергии ( $E_{L,tot}$ ) возникают при транспорте теплоты от системы когенерации в окружающую среду.

Эксергетическую эффективность системы когенерации характеризует отношение

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\sum_i E_P}{E_{F,tot}} \quad (10)$$

При проведении эксергетического анализа только один из полезных эффектов системы (один из продуктов) должен оставаться неизменным, другие могут изменяться (в соответствии с энергетическим и эксергетическим балансом). Таким образом, если система когенерации работает по электрическому графику нагрузок, то  $E_{P,W} = \text{const}$ , если система когенерации работает по тепловому графику нагрузок, то  $E_{P,Q} = \text{const}$ .

Для эксергетического анализа изображение систем когенерации в виде термодинамических схем термотрансформаторов (рис. 1) недостаточно, поэтому представим их в виде технологических схем (рис. 2).

Для ДВС (рис.2, схема ДВС-1)

$$E_{F,tot} = E_1 + E_2, E_{P,tot} = E_{P,W} \text{ и } E_{L,tot} = E_3.$$

Для ДВС с системой охлаждения (рис. 2, схема ДВС-2)

$$E_{F,tot} = E_1 + E_2, E_{P,tot} = E_{P,W}, \text{ но } E_{L,tot} = E_3 + (E_5 - E_4).$$

Для схемы КГС-1 (рис. 2)

$$E_{F,tot} = E_1 + E_2, \text{ и } E_{P,tot} = E_{P,W} + (E_5 - E_4),$$

т.к. теплота, отводимая системой охлаждения ДВС, используется для целей теплоснабжения. Потери эксергии в этой схеме определяются как  $E_{L,tot} = E_3$ .

Для схемы КГС-2

$$E_{F,tot} = E_1 + E_2, E_{L,tot} = E_6 (E_6 < E_3) \text{ и } E_{P,tot} = E_{P,W} + (E_5 - E_4) + (E_8 - E_7).$$

Эксергетический анализ схемы КГС-3 по сравнению с анализом схемы КГС-2 должен быть усложнен введением временного фактора, характеризующего фазы разрядки и зарядки аккумулятора теплоты.

Понятно, что для схем КГС-1 и КГС-2  $E_{F,tot} = E_1 + E_2 = \text{const}$  и  $E_{P,W} = \text{const}$ . Повышение эксергетической эффективности системы КГС-1 по сравнению с ДВС-2 происходит за счет увеличения  $E_{P,tot}$  путем введения слагаемого  $E_{P,Q} = E_8 - E_7$ .

Эксергетический анализ схемы КГС-4 показывает, что

$$E_{P,tot} = E_{P,W} + (E_5 - E_4) + (E_8 - E_7) + (E_{10} - E_9).$$

Таким образом, для увеличения эксергии продукта системы когенерации на  $(E_{10} - E_9)$  величина  $E_{F,tot}$  должна быть повышена за счет использования дополнительного “топливного” источника и составит  $E_{F,tot} = (E_1 + E_2) + (E_{12} - E_{11})$ .

Схема КГС-4 обладает более высоким эксергетическим КПД по сравнению со схемой КГС-2 только в том случае, если прирост эксергии “продукта”  $(E_{10} - E_9)$  оказывается более существенным, чем прирост эксергии “топлива”  $(E_{12} - E_{11})$ .

Для реализации схемы КГС-5 (рис. 1) необходимо увеличить расход “топлива”, поскольку величина  $E_{P,tot} = E_{P,W}$  остается неизменной, однако

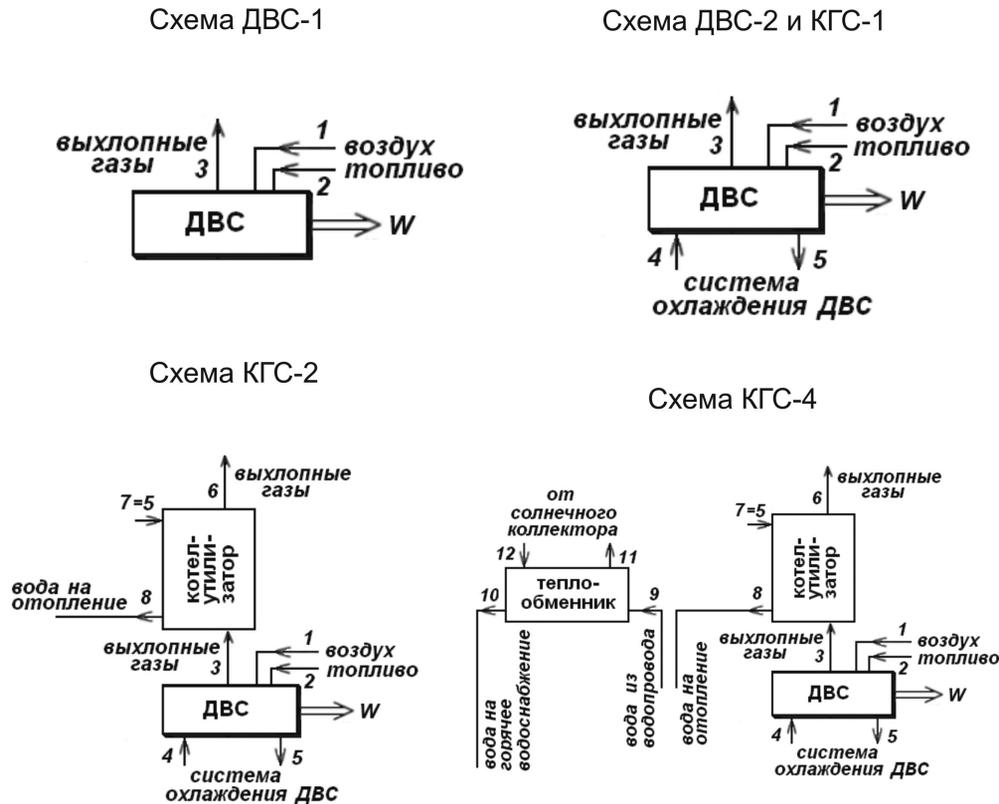


Рис. 2. Технологические схемы систем когенерации на базе ДВС.

абсолютное количество механической работы, производимой ДВС, увеличивается на  $W_{\text{ТН}}$ , что представляет “топливо” для теплового насоса. Эксергетическому анализу КГС с включением тепловых насосов должна быть посвящена отдельная публикация.

### Результаты эксергетического анализа

В таблице приведены некоторые величины эксергетического анализа рассмотренных систем когенерации (рис. 2), позволяющие продемонстрировать результаты анализа в численном виде. Следующий температурный режим был принят для выполнения расчетов:

- природный газ (топливо) и воздух на входе в ДВС –  $t_1 = t_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- сгорание топлива –  $1725 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- выхлопные газы на выходе из ДВС –  $t_3 = 615 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- выхлопные газы после котла-утилизатора –  $t_6 = 165 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- вода на входе в систему охлаждения ДВС –  $t_4 = 72 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- вода на выходе из системы охлаждения ДВС –  $t_5 = 87 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- вода на входе в котел-утилизатор –  $t_7 = t_5 = 87 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- вода на выходе из котла-утилизатора –  $t_8 = 101 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- вода на входе в теплообменник –  $t_9 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- вода на выходе из теплообменника –  $t_{10} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Выводы

1. Сравнительный эксергетический анализ демонстрирует преимущества систем когенерации со сложными схемными решениями, позволяющими дополнительно использовать нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.

2. Эксергетический анализ показывает лишь перспективы создания сложных систем когенерации, окончательный ответ должен быть получен на основании комплексных видов анализа, где наравне с энергетическими показателями будут также использованы стоимостные и экологические показатели [1–3].

Таблица

Эксергия потоков, кВт	Схема			
	ДВС-2	КГС-1	КГС-2	КГС-4
Топливо (природный газ)	2623	2623	2623	2623
Воздух	0	0	0	0
Выхлопной газ после ДВС	454	454	454	454
Выхлопной газ после котла-утилизатора	-	49	49	49
Вода на входе в систему охлаждения ДВС	274	274	274	274
Вода на выходе из системы охлаждения ДВС	423	423	423	423
Вода на входе в котел-утилизатор	-	-	423	423
Вода на выходе из котла-утилизатора	-	-	589	589
Вода на входе в теплообменник	-	-	-	0
Вода на выходе из теплообменника	-	-	-	93
Электрическая мощность	800	800	800	800
Теплота, подводимая к теплообменнику ( $E_{12} - E_{11}$ )	-	-	-	140
Система когенерации в целом:				
• «топливо» ( $E_{F,tot}$ )	2623	2623	2623	2763
• «продукт» ( $E_{P,tot}$ )	800	949	1115	1208
• потери эксергии ( $E_{L,tot}$ )	603	49	49	49
Эксергетический КПД системы когенерации ( $\varepsilon_{tot}$ ), %	30,5	36,2	42,5	43,7

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баласанян Г.А. Эффективність перспективних інтегрованих систем енергозабезпечення на базі установок когенерації малої потужності (теоретичні основи, аналіз, оптимізація): Дис...докт. техн. наук: 05.14.06. – ОНПУ, Одесса, 2007. – 334 с.

2. Долинский А.А., Драганов Б.Х., Морозюк Т.В. Альтернативное теплоснабжение на базе тепло-

вых насосов: критерии оценки // Пром. теплотехника. – 2007. – № 6. – С. 67–71.

3. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса: Студия “Негоциант”, 2006. – 712 с.

4. Тсатсаронис Д. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Под ред. и пер. с англ. Т.В. Морозюк. – Одесса: Студия “Негоциант”, 2002. – 152 с.

Получено 14.04.2008 г.