

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 620.9:627.3

### Показатель термодинамической (энергетической) эффективности систем когенерации и его определение

В.С. Степанов<sup>a</sup>, К.В. Суслов<sup>b</sup>, Т.В. Сокольникова<sup>c</sup>

Иркутский государственный технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

<sup>a</sup>stepanov@istu.edu, <sup>b</sup>souslov@istu.edu, <sup>c</sup>stvz@list.ru

Статья поступила 11.01.2013 принята 24.04.2013

*Системы комбинированного производства электрической и тепловой энергии широко используются в современных энергетических системах. Тем не менее, до сих пор нет решения ряда конкретных проблем, которые возникают в связи с комбинированной выработкой нескольких энергетических продуктов из одного и того же ресурса (топлива). В статье рассматривается вопрос о получении оценки термодинамической эффективности когенерационных систем на основе объективного распределения затрат (включая расходы на топливо) на продукты, производимые в таких системах. Предполагается, что эти проблемы решаются на основе энергетического баланса ТЭЦ. Энергетический баланс опирается на 1-й и 2-й законы термодинамики и позволяет учитывать все потоки энергии, включая энергию (эксергию) получаемых продуктов. Это дает возможность осуществить распределение затрат на производство отдельных продуктов в соответствии с величиной их эксергии. На примере паротурбинной ТЭЦ показан порядок определения значений энергетической эффективности (эксергетического КПД) как для всего предприятия в целом, так и для производств отдельных продуктов.*

**Ключевые слова:** когенерация, эксергия, анергия, материальный и энергетический баланс, энергоэффективность.

### The index of the thermodynamic (energy) efficiency of cogeneration systems and its definition

V.S. Stepanov<sup>a</sup>, K.V. Suslov<sup>b</sup>, T.V. Sokolnikova<sup>c</sup>

National Research Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov st., Irkutsk, Russia

<sup>a</sup>stepanov@istu.edu, <sup>b</sup>souslov@istu.edu, <sup>c</sup>stvz@list.ru

Received 11.01.2013, accepted 24.04.2013

*Systems for combined production of electricity and heat have been widely used in modern energy systems since long ago. However, there is still no solution to a number of specific problems that arise in relation to combined generation of several energy products from one and the same resource (fuel). The paper considers the issue of obtaining an objective estimate of thermodynamic efficiency of cogeneration systems in terms of an index that allows one to take into account different quality of the products to be obtained, as well as the issue of searching for a method to objectively distribute the expenditures (including fuel expenditures) among the products generated in such systems. It is suggested that these problems be solved on the basis of energy balance of the cogeneration plant. The energy balance rests on the first and second laws of thermodynamics and makes it possible to take account of all energy flows, including the energy of the products to be produced. This allows one to determine the value of exergy efficiency of the plant and allocate the fuel consumed among the products. A specific steam-turbine cogeneration plant is used to show the procedure of solving these problems and determining the values of energy efficiency (exergy efficiency) index of the entire plant and each product individually.*

**Keywords:** cogeneration, exergy, anergy, material and energy balance, energy efficiency.

В настоящее время во всех развитых странах идет процесс пересмотра концепции строительства электро-энергетической системы (ЭЭС) будущего, которая получила название «интеллектуальная энергосистема», или Smart Grid. Концепция создания интеллектуальной энергосистемы предусматривает достижение следующих целей [1]:

• предоставление потребителям возможности автоматизированного управления своим электропотреблением;

• обеспечение процесса самовосстановления энергосистемы в случае возникновения аварийных ситуаций;

• широкое вовлечение генераторов, использующих нетрадиционные и возобновляемые виды энергии (распределенная генерация);

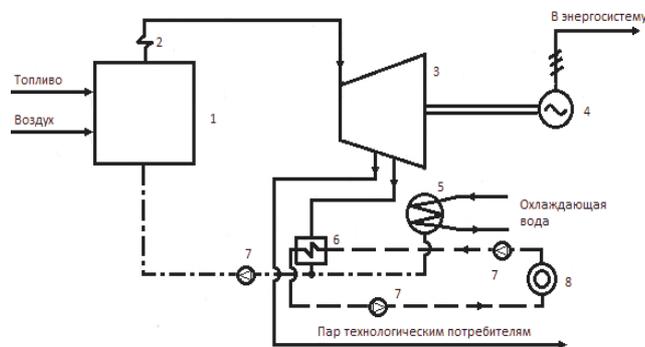
• повышение качества электроэнергии, поставляемой потребителям, и надежности их электроснабжения.

Концепция Smart Grid использует ряд новых понятий, в частности, такое понятие, как «виртуальная элек-

тростанция» [2, 3]. Под виртуальной электростанцией понимается объединение распределенных генераторов, потребителей с управляемой нагрузкой, а также различного рода накопителей энергии. Структура виртуальной электростанции определяется путем поиска оптимального решения в интеграции традиционных и распределенных источников генерации. При оптимизации структуры виртуальной электростанции обычно рассматриваются варианты, в которых в качестве традиционных источников генерации, как правило, принято рассматривать установки когенерации (мультигенерации). И это вполне объяснимо, поскольку комбинированное производство нескольких видов энергетической продукции в таких установках имеет ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с раздельными способами ее получения. Когенерация позволяет существенно уменьшить расход топлива на производство тепловой и электрической энергии, а, следовательно, снизить их себестоимость. Снижение расхода топлива, приводит также к значительному сокращению вредных выбросов в окружающую среду (теплоты, оксидов серы и азота и др.).

Специфические особенности систем когенерации (мультигенерации) требуют нестандартных подходов и методов их анализа, которые должны быть использованы, в частности, при оптимизации структуры виртуальной электростанции. Поиск оптимальной структуры обычно осуществляется с использованием целого ряда критериев (термодинамического, экономического, экологического и др.), которые для комбинированных установок должны определяться иначе, чем для традиционных монопродуктовых объектов. О специфике определения некоторых показателей систем когенерации (тригенерации) речь и пойдет ниже на примере ТЭЦ.

Системы когенерации могут строиться на основе паротурбинных или газотурбинных установок, двигателей внутреннего или внешнего сгорания (ДВС). Наибольшее распространение получили системы, осуществляющие комбинированное производство электрической и тепловой энергии на основе паровых турбин разных конструкций, которые в России называют теплоэлектроцентралями (ТЭЦ). Принципиальная схема паротурбинной ТЭЦ с турбинами, имеющими производственный и теплотехнический отборы, приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема и основное оборудование ТЭЦ: 1 – парогенератор; 2 – пароперегреватель; 3 – паровая турбина; 4 – электрический генератор; 5 – конденсатор; 6 – подогреватель сетевой воды; 7 – насосы; 8 – потребители тепла

При анализе преимуществ систем когенерации (тригенерации) важную роль играют используемые для

оценки их эффективности показатели и методы их определения. Использование для этих целей известного показателя – энергетический КПД для таких систем является некорректным, поскольку в этом случае приходится суммировать виды энергии неодинакового качества. Под термином «качество» понимается способность разных форм энергии преобразовываться в работу.

В соответствии со вторым началом термодинамики используемые формы по этому показателю являются неравноценными. Их можно разделить на три группы:

- неограниченно превратимые в работу  $I_1$  (механическая – кинетическая и потенциальная, все виды электрической энергии);
- ограниченно превратимые в работу  $I_2$  (химическая, тепловая при температуре выше температуры окружающей среды,  $T > T_0$ );
- непревратимые в работу формы энергии  $I_3$  (энергия систем с давлением, равным давлению окружающей среды,  $P = P_0$ ; теплота с температурой, равной температуре окружающей среды,  $T = T_0$ ).

Поэтому недопустимо определять КПД ТЭЦ или любой другой когенерационной системы по выражению:

$$\eta_{кэу} = \frac{W_{отп} + Q_{отп}}{B_m \times Q_u^p}, \quad (1)$$

где  $W_{отп}$  – количество электроэнергии, отпущенной потребителю за определенный период времени;  $Q_{отп}$  – количество теплоты, отпущенной потребителю за тот же период времени;  $B_m$  – количество израсходованного за этот период топлива;  $Q_u^p$  – низшая теплота его сгорания.

Решение поставленной задачи стало возможным после того как югославский ученый З. Рант [4, 5] ввел новые понятия «эксергия» и «анергия» и предложил все формы энергии представлять в виде суммы работоспособной части  $E$  (эксергия) и части, не способной совершать работу, – (анергия), т. е.  $I_j = E_j + B_j$ .

В таком случае формы энергии, относимые к первой группе, можно представлять как  $I_1 \approx E_1$ ; относимые ко второй группе – как  $I_2 = E_2 + B_2$ , а относимые к третьей группе – как  $I_3 \approx B_3$ . Тогда суммирование форм энергии, включенных в разные группы, можно производить, складывая раздельно указанные составляющие. Эксергия тепла, полученного в системе когенерации, определяется путем умножения его количества на коэффициент:

$$\tau_e = \frac{T_1 - T_0}{T_1}, \text{ т. е. } E_q = Q_i \frac{T_1 - T_0}{T_1}, \quad (2)$$

где  $T_1$  – температура полученного тепла,  $K$ ;  $T_0$  – температура окружающей среды,  $K$ .

Тогда показатель энергоэффективности любой когенерационной системы, эксергетический КПД  $\eta_{экс}$  можно определять по выражению:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{W_{\text{эл}} + E_q}{B_m \times Q_n^p}, \quad (3)$$

где  $E_q$  – эксергия теплоты, отпущенной за рассматриваемый период времени  $Q_{\text{отп}}$ .

В соответствии с (2) теплота при разной температуре имеет работоспособную часть, не одинаковую по величине. В таблице 1 показано, как изменяется ценность теплоты с возрастанием ее температуры при постоянстве температуры теплоприемника (окружающая среда с параметрами  $P_0 = 101,325$  кПа,  $T_0 = 293,15$  К).

Таблица 1

Изменение работоспособности (ценности) теплоты с изменением ее температуры

$t_l, ^\circ\text{C}$	50	100	200	300	400	500	600
$T_l, \text{K}$	323,15	373,15	473,15	573,15	673,15	773,15	873,15
$\tau_e, \text{о.е.}$	0,093	0,214	0,381	0,489	0,565	0,621	0,664

Продолжение таблицы 1

$t_l, ^\circ\text{C}$	700	800	900	1000	1100	1200	1300
$T_l, \text{K}$	923,15	1073,15	1173,15	1273,15	1373,15	1473,15	1573,15
$\tau_e, \text{о.е.}$	0,699	0,727	0,750	0,770	0,787	0,801	0,814

Анализ таблицы 1 позволяет сделать вывод о том, что ТЭЦ, отпускающая потребителям, помимо электроэнергии, теплоту при разных параметрах ( $p$  и  $t$ ), т. е. имеющая в своем составе турбины разного типа (Т, ПТ), является, по существу, системой когенерации. В частности, если на ТЭЦ установлены турбины с двумя отборами пара (производственным и теплофикационным), на ней комбинированно производятся три продукта: электрическая энергия, теплота, подаваемая в систему теплоснабжения с горячей водой, и энергия (энтальпия) пара ( $I_n$ ), отпускаемого технологическим потребителям.

КПД ТЭЦ в этом случае должен определяться с учетом неодинаковой работоспособности (ценности) получаемой продукции, т. е.:

$$\eta_{\text{тэц}} = \frac{W_{\text{эл}} + Q_{\text{тс}} \tau_e + I_n \tau_{e(n)}}{B_m \times Q_n^p} \quad (4)$$

Аналогичным образом может быть рассчитана эксергия холода, выработанного системой тригенерации.

По определению, эксергия – это максимальная работа, которая может быть получена в результате обратимого процесса взаимодействия технической системы и окружающей среды. Когда температура технической системы ниже температуры окружающей среды,  $T_c < T_0$ , при их взаимодействии источником теплоты является окружающая среда. Она передает теплоту с температурой  $T_0$  в количестве  $Q_0$  технической системе, являющейся в этом случае компенсатором теплоты. Величина эксергии, которая может быть получена в результате их взаимодействия, равна:

$$E_{q0} = Q_0 \frac{T_0 - T_c}{T_0}. \quad (5)$$

Таким образом, при оценке энергоэффективности систем тригенерации, в которых одновременно из одного и того же топлива (первичного ресурса) получают электрическую энергию –  $W_{\text{эл}}$ , теплоту –  $Q_T$  и холод –

$Q_0$ , также можно использовать энергетический КПД, определяемый по формуле:

$$\eta_{\text{экс}}^T = \frac{W_{\text{эл}} + E_{qT} + E_{q0}}{B_m \times Q_n^p} \quad (6)$$

Для определения указанных показателей энергоэффективности конкретной установки когенерации необходимо рассчитать ее энергетический баланс, построенный на основе 1-го и 2-го законов термодинамики, т. е. позволяющий учитывать качество (эксергию) всех энергетических потоков. Далее в качестве примера рассмотрим паротурбинную ТЭЦ с турбиной ПТ-60-90, схема которой приведена на рис. 1. Исходная информация для расчета энергетического баланса дана ниже:

- количество выработанного пара,  $D_0 = 377,93$  т/ч;
- расход топлива (природный газ) котельной,  $B_T = 52,03$  т. т в час;
- КПД котельной,  $\eta_k = 0,86$ ;
- электрическая мощность,  $N_T = 60$  МВт;
- расход технологического пара,  $D_{\text{т}} = 125,28$  т/ч;
- расход пара в конденсатор,  $D_k = 41,18$  т/ч;
- расход сетевой воды,  $G_{\text{св}} = 2340$  т/ч;
- температура прямой сетевой воды  $t_n = 90$  °С.

Приведенные в таблицах 2 и 3 балансы позволяют определить показатель энергоэффективности не только ТЭЦ в целом, но и отдельных ее подразделений. В соответствии с формулой (5) и таблицами 2 и 3 эксергетический КПД ТЭЦ в целом составляет:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{216 + 108,2 + 137,21}{1404,4} = 0,329.$$

Однако для того чтобы определить эффективность производства каждого продукта, производимого системой когенерации (тригенерации), необходимо объективно распределить израсходованное в ней топливо между полученными продуктами.

Таблица 2

Материальный и энергетический <sup>1)</sup> балансы котельного цеха ТЭЦ (в расчете на 1 час)

Котельный цех						
№ п/п	Статья баланса	Масса, т	Энергия, ГДж	Эксергия, ГДж	% по энергии	% по эксергии
1	2	3	4	5	6	7
<b>Приход</b>						
1	Топливо	30,5	1524,9	1404,4	100,0	100,0
2	Воздух организованный	570,1	0,0	0,0	–	–
3	Присосы воздуха	134,57	0,0	0,0	–	–
	<i>Итого:</i>	735,25	1524,9	1404,4	100	100
<b>Расход</b>						
1	Пар на турбину	(377,93)	1311,42	658,28	86	46,87
2	Потери с отходящими газами	735,25	181,46	52,72	11,9	3,75
3	Потери в окружающую среду	–	7,62	1,4	0,5	0,1
4	Потери от химического недожога	–	24,4	21,0	1,6	1,5
5	Потери эксергии от необратимости процесса горения	–	–	318,8	–	22,7
6	Потери от необратимости теплообмена	–	–	352,2	–	25,08
	<i>Итого:</i>	735,25	1524,9	1404,4	100	100
7	Прочие потери	–	52,68	80,96	3,46	5,76
	<b>Всего</b>	735,25	1524,9	1404,4	100,0	100,0

<sup>1)</sup> Энергетический баланс, учитывающий работоспособность (эксергию) потоков энергии.

<sup>\*)</sup> Обозначена полезная (целевая) энергия объекта.

Таблица 3

Материальный и энергетический <sup>1)</sup> балансы турбинного цеха ТЭЦ (в расчете на 1 час)

Турбинный цех						
№ п/п	Статья баланса	Масса, т	Энергия, ГДж	Эксергия, ГДж	% по энергии	% по эксергии
	2	3	4	5	6	7
<b>Приход</b>						
1	Острый пар на турбину	(377,93)	1311,42	658,28	86,0	46,87
<b>Расход</b>						
1	Отпущенная электроэнергия <sup>*)</sup>	–	216,0	216,0	14,16	15,38
2	Теплоэнергия в СТС <sup>*)</sup>	–	391,88	108,2	25,7	7,7
3	Энергия технологического пара <sup>*)</sup>	–	370,83	137,21	24,32	9,77
4	Расход на собственные нужды	–	101,4	45,63	6,65	3,25
5	Потери в турбине	–	34,88	17,2	2,29	1,22
6	Потери в электрогенераторе	–	20,8	20,8	1,36	1,48
7	Потери в конденсаторе	–	122,95	32,28	8,06	2,31
8	Прочие потери	–	52,68	80,96	3,46	5,76
	<i>Итого</i>		1311,42	658,28	86,00	46,87
	<b>Всего</b>	735,25	1524,9	1404,4	100,0	100,0

<sup>2)</sup> Энергетический баланс, учитывающий работоспособность (эксергию) потоков энергии.

<sup>\*)</sup> Обозначена полезная (целевая) энергия объекта.

К сожалению, необходимо отметить, что до сих пор нет единого научно обоснованного метода распределения не только топлива, но и всех других затрат комбинированного производства. Нами предлагается расход топлива распределять в соответствии с долей эксергии каждого продукта в суммарной величине эксергии всех полезных продуктов комбинированного производства.

В нашем случае расход топлива на  $i$ -ый продукт будет определяться по выражению:

$$B_i = \left( E_i / \sum_{i=1}^n E_i \right) \times B_{\text{ком}} .$$

В соответствии с данными энергобаланса, приведенного в таблицах 2 и 3, получаем следующее распределение израсходованного в котельной ТЭЦ топлива на производство продукции:

$$\text{электроэнергии} - B_3 = 52,03 \frac{216}{461,41} = 24,36 \text{ т у. т.}$$

(657,441 ГДж);

$$\text{технического пара} - B_n = 52,03 \frac{137,21}{461,41} = 15,47 \text{ т у. т.}$$

(417,63 ГДж);

тепла в систему теплоснабжения –

$$B_q = 52,03 \frac{108,2}{461,41} = 12,2 \text{ т у. т. (329,33 ГДж).}$$

Распределение топлива между продуктами, полученными в объекте когенерации (тригенерации), позволяет оценить энергоэффективность производства каждого продукта:

– производство электрической энергии

$$\eta_{\text{экс}}^3 = \frac{216}{1404,4} = 0,154;$$

– производство технологического пара

$$\eta_{\text{экс}}^n = \frac{137,21}{1404,4} = 0,098;$$

– производство теплоты для СТС

$$\eta_{\text{экс}}^q = \frac{108,2}{1404,4} = 0,077 .$$

Коэффициенты, найденные для распределения топлива, могут, как это обычно принято, использоваться и для распределения иных затрат (эксплуатационных расходов ТЭЦ), учитываемых при калькуляции себестоимости получаемых в комбинированном производстве продуктов.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. При формировании интеллектуальных энергосистем (Smart Grid) целесообразно использовать современные методы исследования энергоэффективности объектов, включаемых в эти системы. Важнейшими из них являются так называемые объекты комбинированного производства двух и более продуктов (системы

когенерации, или мультигенерации). Наиболее пригодным методом анализа подобных систем является метод, использующий новые понятия «эксергия» и «анергия», позволяющий учитывать неодинаковое качество разных форм энергии.

2. Удобным инструментом исследования систем когенерации (мультигенерации) является энергетический баланс объекта, построенный на основе 1-го и 2-го законов термодинамики, который позволяет учитывать работоспособность (эксергию) каждого потока энергии. Такой баланс дает возможность использовать эксергетический метод распределения суммарных затрат топлива ТЭЦ на производство каждого вида ее продукции. Это, в конечном счете, позволяет более объективно оценивать термодинамическую эффективность получения этой продукции в системах когенерации (мультигенерации).

### Литература

1. Buchholz B.M., Styczynski Z.A. New Tasks Greate New Solutions for Communication in Distribution Systems // Proceeding of IEEE PES General Meeting, 2006. Montreal, Canada.
2. Buhholz B.M. Smart Grids Power Systems of the future // Proceeding of the international CRIS Workshop on Distributed and Renewable Power Generation. 16-19.09.2008. Magdeburg.
3. Возобновляемые источники энергии: Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / под ред. З.А. Стычинского, Н.И. Воропая. Магдебург; Иркутск: Ун-т Отто-фон-Герике, 2010. 211 с.
4. Rant Z. Exergue, ein nevus Wort fur "Technische Arbeitsfohigkeit" // Eorsch.Ing.Wes. 1956. Bd.22, № 1. S. 36-37.
5. Rant Z. Vrednost in obracunavanjeenergije (Der wert und die Verrechnung von Energien) // Strojnicki Vestnik 1955. № 1. С. 4-7.
6. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Эффективность использования энергии. Новосибирск: Наука, 1994. 257 с.
7. Степанов В.С., Старикова Н.В. Эксергетический анализ термодинамической эффективности теплоэлектроцентрали и ее подсистем // Вестн. ИрГТУ. 2012. № 3 (62) С. 95-101.
8. Старикова Н.В. Разработка методов и показателей для термодинамического анализа системы теплоснабжения как единого комплекса: автореферат дис. ...канд. техн. наук. Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2012. 24 с.

### References

1. Buchholz B.M., Styczynski Z.A. New Tasks Greate New Solutions for Communication in Distribution Systems // Proceeding of IEEE PES General Meeting 2006. Montreal, Canada.
2. Buhholz B.M., Smart Grids Power Systems of the future // Proceeding of the international CRIS Workshop on Distributed and Renewable Power Generation. 16 - 19.09.2008. Magdeburg .
3. Renewable power sources: Theoretical fundamentals, technologies, specifications , economy / Pod red. Z.A. Stychinskogo i N.I. Voropaya. Magdeburg. Irkutsk: Universitet Otto- fon Gerike, 2010. 211 s.
4. Rant Z. Exergue, ein nevus Wort fur "Technische Arbeitsfohigkeit" // Eorsch.Ing.Wes . 1956. Bd. 22, № 1. S. 36-37.
5. Rant Z. Vrednost in obracunavanjeenergije (Der wert und die Verbrech - nung von Energien) // Strojnicki Vestnik 1, № 1, 1955. S. 4-7.
6. Stepanov V.S., Stepanova T.B. Power usage effectiveness. Novosibirsk: Nauka, 1994. 257 s.
7. Stepanov V.S., Starikova N.V. Exergy analysis of thermodynamic efficiency of a heating plant and its subsystems. // Vestn. IrGTU, 2012. № 3 ( 62). S. 95-101.
8. Starikova N.V. Development of methods and parameters for thermodynamic analysis of a heat supply system as a single complex: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk. Ulan-Ude: VSGUTU, 2012. 24 s.