

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИЙНОГО И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕСТ ЛОКАЛИЗАЦИИ СУБЪЕКТИВНЫХ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Д.т.н., профессор Боровков В. М.¹, асп. Скулкин С. В.¹ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

АННОТАЦИЯ. Представлен обзор термодинамических методов анализа электрических станций. Предложен вариант разбивки суммы эксергетических потерь на номинальные, объективные и субъективные. На основе этой разбивки введен режимный коэффициент термодинамического совершенства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энтропийный метод, эксергетический метод, эксергетические потери, коэффициент термодинамического совершенства.

В свете недавних событий на Саяно-Шушенской ГЭС [1], в научной публицистике появились упоминания об аварийном состоянии оборудования на многих других объектах энергетики, вызванном как физическим старением оборудования, так и человеческим фактором. Сейчас в энергетике остро обозначилась необходимость создания таких методов контроля состояния оборудования, которые без останова и разборки действующего оборудования станции позволяли бы определить потребность в капитальном ремонте и техническом обслуживании.

На сегодняшний день существует множество методов учета показателей энергетических установок. Среди них есть методы как экономические (в том числе метод ОРГРЭС), служащие для технико-экономической оценки эффективности, для расчетов по тарификации тепловой и электрической энергии, так и термодинамические, предназначенные для оценки термодинамической эффективности энергоустановки в целом и отдельных ее узлов в частности. Экономические методы, в силу их специфической направленности, не имеют инструментов для оценки термодинамического качества цикла выработки электрической и тепловой энергии. Более того, они не имеют под собой научно обоснованной теоретической основы. Под термодинамическими будем понимать методы, учитывающие все следствия второго закона термодинамики. Таковыми являются энтропийный метод, разработанный Д. П. Гохштейном [2; 3] и эксергетический метод, предложенный В. М. Бродяжским [4; 5]. Кратко рассмотрим основные показатели энтропийного и эксергетического методов и возможности их применения для выявления проблемных узлов электрической станции.

Энтропийный метод

Основным показателем метода является коэффициент эксергетической потери – отношение величины эксергетической потери данного узла к

эксергии введенного в узел тепла:

$$\Omega = \frac{\Pi}{\Phi_{вх}}, \quad (1)$$

где Π – сумма эксергетических потерь произвольного узла,

$\Phi_{вх}$ – вводимая в узел превратимая энергия.

Для произвольного узла сумма эксергетических потерь, вызванных необратимостью протекающих в нем процессов, вычисляется:

$$\Pi = T_0 \left(\sum_1^n G_i^y \times S_i^y - \sum_1^m G_i^b \times S_i^b \right) + Q_0, \quad (2)$$

где G_i^b ; S_i^b – соответственно расход в единицу времени i -го потока и его энтропия на входе в узел, а G_i^y ; S_i^y – соответственно расход в единицу времени и энтропия i -го потока на выходе из узла.

Поскольку энтропия обладает свойством аддитивности, коэффициенты эксергетических потерь можно складывать между собой, получая при этом коэффициенты эксергетических потерь групп узлов или всей энергетической установки в целом. Кроме того, коэффициент эксергетической потери связан с удельным перерасходом топлива b_n :

$$b_n = \frac{1}{Q_n^p} \cdot \frac{\Omega}{\eta_c} \quad (3)$$

Вычисление КПД ТЭЦ по методу вычитания эксергетических потерь представляет собой составление обратного баланса эксергии: из единицы (вся организованная энергия) вычитаем сумму коэффициентов эксергетических потерь всех узлов в составе ТЭЦ.

Эксергетический метод

Эксергетический метод для анализа совершенства энергетической установки и ее отдельных

¹ 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

узлов использует эксергетический КПД. Эксергетический КПД равен отношению эксергии, отведенной из установки (узла) к эксергии, подведенной к установке (узлу). В общем случае выражение эксергетического КПД для цикла имеет вид:

$$\eta_{ex}^u = \frac{W''}{W'} = \frac{L}{Q_1 - T_0 \int_0^{Q_1} \frac{dQ}{T_1}}, \quad (4)$$

где L – работа реального цикла,
 dQ – элементарное тепло, поглощенное рабочим телом,

T_1 – мгновенная температура источника, доставляющего тепло Q_1 .

Для каждого отдельного узла выражение (4) может принимать различный вид, в зависимости от вида эксергии на входе в узел и на выходе из узла.

Величина, обратная η_{ex}^u , называется удельной затратой эксергии и характеризует отношение подведенной эксергии к отведенной.

Эксергетический КПД характеризует степень отклонения термодинамического качества реального процесса от идеального. Но для локализации дефектов более эффективно сравнение фактического реального процесса с реальным процессом, проходящим в полностью исправном узле.

Коэффициент термодинамического совершенства

Эксергетический КПД и коэффициент эксергетической потери непосредственно не характеризуют степень отклонения термодинамического качества узла от нормативных значений. Рассмотрим возможность применения в качестве ключевого параметра для анализа термодинамического совершенства установки так называемый коэффициент термодинамического совершенства η_c – отношение значения превратимой энергии на выходе из установки к ее значению на входе в установку.

Зная коэффициент эксергетической потери i -го узла Ω_i и/или эксергетический КПД i -го узла η_i , можно выразить коэффициент термодинамического совершенства:

$$\eta_c = \frac{\Phi_{ex} - \sum \Pi_i}{\Phi_{ex}} = 1 - \Omega. \quad (5)$$

$$\eta_c = 1 - \sum \frac{E_{in}(1 - \eta_i)}{E_n}, \quad (6)$$

где E_{in} – эксергия, подведенная к узлу;
 E_n – значение эксергии на входе в установку.

Как видно из выражения (6), для всей установки η_i равен η_{ex}^u .

Воспользуемся разбивкой эксергетических потерь электростанции, предложенной Н.Д. Захаровым [3].

Эксергетические потери на электростанции в общем случае можно представить в виде суммы номинальных потерь, объективных и субъективных отклонений. Номинальные эксергетические потери заложены в агрегат заводом-изготовителем или организацией, проводившей испытания его работы по истечении определенного срока эксплуатации. Объективные отклонения вызываются изменением температуры циркуляционной воды, температуры холодного воздуха, $\cos \varphi$, переменной марки топлива и прочим несоответствием начальных условий данного испытания с эталонным испытанием энергоустановки. Сумму номинальных и объективных потерь можно принять в качестве эталонной для исправной энергоустановки.

Причинами субъективных отклонений могут быть загрязнение или повреждение лопаточного аппарата, уплотнений турбин; загрязнение и подсос воздуха в конденсаторы турбин; повреждение регенеративных подогревателей; загрязнение и подсос воздуха в котлах; недостатки топочного режима (по отдельным составляющим тепловых потерь котла); изменение параметров пара; повышенный расход электроэнергии на собственные нужды по различным элементам; потери воды, пара и другие причины.

При вводе новой энергоустановки или ранее действовавшей после технического осмотра и капитального ремонта полученный коэффициент термодинамического совершенства можно представить в виде:

$$\eta_c^{режс} = 1 - (\sum \Omega_{ном} + \sum \Omega_{об}), \quad (7)$$

где $\sum \Omega_{ном}$; $\sum \Omega_{об}$ – соответственно суммы абсолютных коэффициентов номинальных и объективных эксергетических потерь.

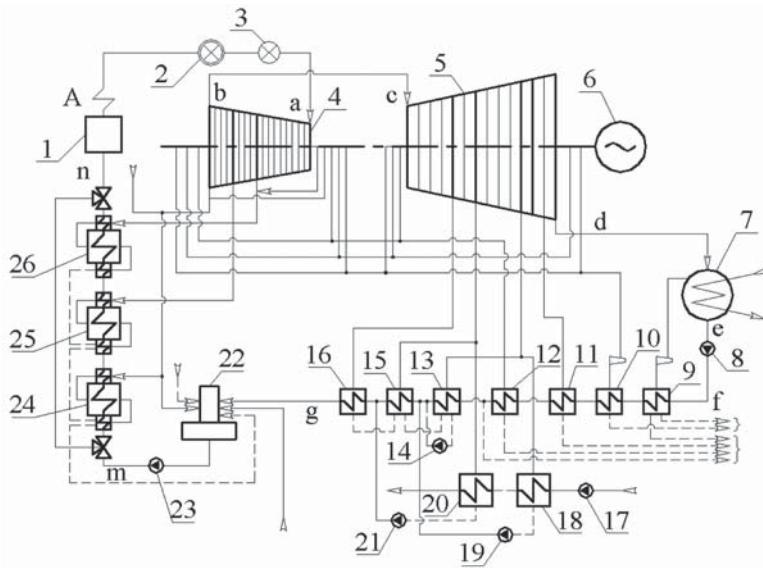
Коэффициент (7) представляет собой максимально возможный на данном оборудовании и в данном режиме работы коэффициент термодинамического совершенства. Назовем его режимным коэффициентом термодинамического совершенства.

При последующем проведении анализа режимный коэффициент термодинамического совершенства будет иметь вид:

$$\eta_c = 1 - (\sum \Omega_{ном} + \sum \Omega_{об} + \sum \Omega_{суб}), \quad (8)$$

где $\sum \Omega_{суб}$ – сумма абсолютных коэффициентов субъективных эксергетических потерь.

Для примера составим при помощи энтропийного и эксергетического методов баланс эксер-



1 – барабанный котёл Ep-500-13,8-560 КТ; 2 – стопорный клапан; 3 – регулирующие клапаны; 4 – цилиндр высокого давления; 5 – цилиндр низкого давления; 6 – генератор переменного тока ТВФ-110-2ЕУЗ; 7 – конденсатор; 8 – конденсатный насос; 9 – холодильник эжектора; 10 – холодильник эжектора уплотнений; 11, 13, 15, 16 – подогреватели низкого давления; 12 – охладитель пара уплотнений с эжектором; 14 – сливной насос; 17 – сетевой насос; 18 – сетевой горизонтальный подогреватель нижнего отбора; 19, 21 – конденсатные насосы теплофикационной установки; 20 – сетевой горизонтальный подогреватель верхнего отбора; 22 – деаэрактор; 23 – питательный электронасос; 24, 25, 26 – подогреватели высокого давления.

Рис. 1. Тепловая схема паросиловой установки с турбиной ПТ-80/100-130/13

Табл. 1. Параметры состояния рабочего тела в точках тепловой схемы ПСУ

Параметр	Состояние рабочего тела в точке									
	A	a	b	c	d	e	f	g	m	n
p , бар	128	125,5	13	12,9	0,04	0,04	15,25	5,884	135	130
t , °C	555	550	267	265	85	28	28	145	163	254
h , кДж/кг	3487	3476	2971	2966	2660	117,4	118,8	610,8	696,1	1105
S , кДж/кг·°C	6,634	6,629	6,862	6,857	8,796	0,409	0,409	1,791	1,957	2,809

Табл. 2. Параметры состояния рабочего тела в отборах (подогревателях) ПСУ

Параметр	Регенеративные отборы						
	7	6	5	4	3	2	1
h_v , кДж/кг	1080,6	937,0	778,5	576,8	374,9	279,0	132,0
p_v , бар	132,0	133,2	134,5	7,22	8,56	9,90	12,57
$p_{от}$, бар	45,7	26,7	13,0	4,1	0,89	0,36	0,06
$p_{под}$, бар	42,0	24,6	12,0	3,8	0,82	0,33	-
t , °C	421	352	267	169	150	113	94
h , кДж/кг	3260,5	3132,4	2973,9	2796,3	2777,9	2709,8	2676,5
S , кДж/кг·°C	6,817	6,858	6,903	7,054	7,709	7,958	8,655
h_k , кДж/кг	1101,6	958,0	798,5	596,8	394,4	298,5	-
S_k , кДж/кг·°C	2,823	2,547	2,216	1,758	1,241	0,971	-
α_i	0,0706	0,0795	0,0376	0,0684	0,0234	0,0355	-

гии паросиловой установки (ПСУ) с турбиной ПТ-80/100-130/13 ЛМЗ, установленной на ТЭЦ-2 г. Йошкар-Олы и вычислим коэффициент термодинамического совершенства. Схема ПСУ представлена на рис.1; исходные данные для расчета приведены в табл.1 и 2. Вычислим значение η_c .

Как видно из табл. 3, значения коэффициента $\eta_c = 30,59\%$, вычисленные энтропийным и эксергетическим методами, совпадают.

Данная величина была получена при устойчивой работе в конденсационном режиме на турбоагрегате, прошедшем капитальный ремонт, поэтому принята в качестве эталонной $\eta_c^{реж}$. При следующей диагностике сравнение эталонного $\eta_c^{реж}$, с заново полученным η_c для ПСУ в целом позволит оценить, нужен ли более подробный анализ. Если изменения существенны, то сравнение $\eta_c^{реж}$ с η_c для каждого узла установки в отдельности выявит места локализации субъективных эксергетических потерь. На момент написания данной статьи величины допустимых и критических отклонений не определены, их разработка и обоснование являются целью будущих исследований.

Именно узлы, являющиеся местами локализации субъективных эксергетических потерь, могут вызвать аварийную ситуацию, а поэтому в первую очередь подлежат техническому осмотру и ремонту. А при своевременной диагностике оборудования, капитальный ремонт потребует гораздо меньших средств, чем устранение последствий аварии, и, несомненно, улучшит показатели электростанции в целом.

Выводы

Энтропийный и эксергетический методы термодинамического анализа сами по себе не решают задачу выявления мест локализации субъективных эксергетических потерь. Однако, они позволяют оценить потребность в техническом осмотре и капитальном ремонте

Табл. 3. Сводная таблица показателей эксергетического баланса ПСУ

Процесс	Энтропийный метод			Эксергетический метод	
	Эксергетическая потеря, П, кДж/кг топлива	Ω , %	b_{ni} , МКГ/Дж	Изменение эксергии, кДж/кг топлива	Эксергетический КПД, η_{ex} , %
Передача части химической энергии топлива окружающей среде	2051,6	7,00	7,80	15306,0	52,22
Горение и передача тепла воде	11951,1	40,78	45,46	-	-
Протекание пара от котла к турбине	106,4	0,36	0,40	-106,4	99,6
Расширение в паровой турбине	1686,2	5,75	6,41	-13214,0	71,16
Конденсация водяного пара	1972,8	6,73	7,50	-1972,8	0,00
Регенеративный теплообмен:	1732,0	5,91	6,59	-	51,33
охлаждаемая сторона	-	-	-	-3374,5	-
нагреваемая сторона	-	-	-	3262,4	-
Сжатие воды в насосе №23	12,4	0,04	0,05	7,2	82,10
Переход внутренней работы турбины в механическую энергию	418,0	1,43	1,59	-	-
Переход механич. энергии в электр. на клеммах генератора	413,8	1,41	1,57	-	-
Итого	20344,4	69,41	77,39	-	-
Работа на клеммах генератора электрического тока	8964,6	-	34,10	-	-
Коэффициент термодинамич. совершенства	-	30,59	-	-	30,59

путем сравнения реальных коэффициентов термодинамического совершенства с предложенными эталонными значениями. В качестве эталонного значения предложен режимный коэффициент термодинамического совершенства $\eta_c^{реж}$. Энтропийный и эксергетический методы могут быть применены в комплексе во избежание ошибок при расчёте реальных коэффициентов термодинамического совершенства.

Литература

1. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17.08.2009 г. в филиале ОАО «РусГидро» – Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного»
2. Гохштейн Д.П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок, М.: «Энергия», 1969. – 368 с., илл.
3. Гохштейн Д.П., Верховкер Г.П. Анализ тепловых схем атомных электростанций. Киев, издательское объединение «Вища школа», 1977. – 240 с., илл.
4. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: «Энергия», 1973. – 296 с., илл.
5. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.