

Об эффективности ТЭС – ПГУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессорах и подводом теплоты с впрыском насыщенного пара в основную и дополнительную КС из котлов-утилизаторов

Бирюков Б. В., канд. техн. наук, Шапошников В. В., инж.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Дано описание исследуемой схемы ТЭС – ПГУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессорах и подводом теплоты с впрыском насыщенного пара в основную и дополнительную КС из котлов-утилизаторов. Приведены результаты вариантной оптимизации параметров рабочих тел. Для их комплексной оптимизации применен метод математической оптимизации.

Ключевые слова: газотурбинная ТЭС, парогазовая установка, оптимизация параметров, математическое моделирование.

Для снижения себестоимости производимой электроэнергии на ТЭС предлагается устанавливать газотурбинные установки, выполненные на базе ГТУ типа АД-31СТ ОАО “Сатурн – Люлька” (Москва) [1]. С целью определения теплотехнических показателей ТЭС – ПГУ (рис. 1) был выполнен расчет характеристик ПГУ с использованием данных АД-31СТ: массовый расход сжимаемого в воздушном компрессоре воздуха – 61 кг/с, давление сжатого в компрессоре воздуха – 2,1 МПа, внутренний КПД компрессора – 0,87. Полезная мощность ГТУ 20 МВт рас-

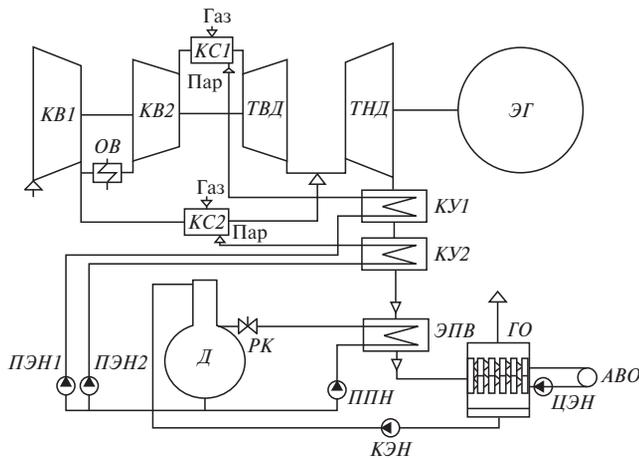


Рис. 1. Схема ТЭС – ПГУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессорах и подводом теплоты с впрыском насыщенного пара из котлов-утилизаторов в основную и дополнительную камеры сгорания:

КВ1 и КВ2 – воздушные компрессоры низкого и высокого давления; ОВ – охладитель воздуха; КС1 и КС2 – основная и дополнительная камеры сгорания; ТВД и ТНД – газовые турбины высокого и низкого давления; КУ1 и КУ2 – паровые котлы-утилизаторы высокого и низкого давления; ЭПВ – экономайзер подпиточной воды; ГО – контактный газоохладитель; АВО – аппарат воздушного охлаждения; ЦЭН, КЭН, ППН – циркуляционный, конденсатный, подпиточный насосы; ПЭН1 и ПЭН2 – питательные насосы высокого и низкого давления; ЭГ – электрогенератор

считана при температуре газов на входе в турбину $T_3 = 1523,15$ К. Принято, что давление газов на выходе турбины $P_4 = 0,103$ МПа, а ее внутренний КПД – 0,8994. Эффективный КПД ТЭС – ГТУ составил 36,5 % [1].

Расчеты по определению КПД ТЭС – ПГУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессорах при разных давлениях газов на входе в турбину показали, что максимальное значение эффективного КПД ПГУ 79,572 % может быть достигнуто при давлении газов на входе в ТВД 2,9 МПа и температуре газов перед ТВД 1523,15 К (см. рис. 1). При этом давление газов перед ТНД $P_{41} = 0,5385$ МПа (рис. 2), а температура $T_{4,1} = 1083,83$ К, электрическая мощность ГТУ $N_{ГТУ} = 88,621$ МВт, расход топлива $B_{ТЭС} = 3,047$ кг/с (см. таблицу). Давление газов перед ТВД изменялось в диапазоне от 2,6 до 3,2 МПа. Коэффициент избытка воздуха после компрессора низкого давления $\alpha = 1,934$.

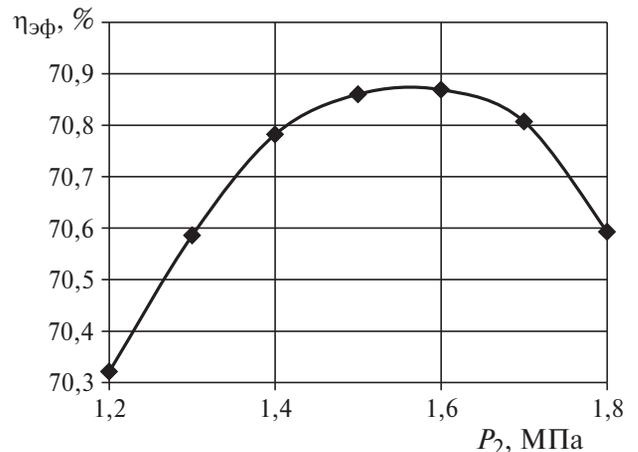


Рис. 2. Зависимость эффективного КПД ТЭС – ПГУ от давления газов на входе в газовую турбину высокого давления

$T_{4,3}$, К	$T_{4,4}$, К	$T_{4,1}$, К	$N_{ГТУ}$, МВт	$Q_{ЭПВ}$, МВт	$Q_{ГО}$, МВт	$B_{ТЭС}$, кг/с	η^3 , %
1523,15	1310,16	1083,83	110,606	4,614	125,376	3,912	77,364
1473,15	1283,34	1083,83	107,936	4,614	119,038	3,809	77,525
1423,15	1256,65	1083,83	105,305	4,614	112,839	3,708	77,704
1373,15	1230,26	1083,83	102,718	4,614	106,774	3,607	77,905
1323,15	1204,18	1083,83	100,175	4,614	100,844	3,508	78,129
1273,15	1178,40	1083,83	97,677	4,614	95,047	3,410	78,377
1223,15	1152,95	1083,83	95,221	4,614	89,388	3,312	78,651
1173,15	1127,83	1083,83	92,811	4,614	83,862	3,216	78,954
1123,15	1103,06	1083,83	90,447	4,614	78,474	3,121	79,286
1083,83	1083,83	1083,83	88,621	4,614	74,332	3,047	79,572

В таблице приведены показатели ПГУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессоре и подводом теплоты с впрыском насыщенного пара в основную КС1 и дополнительную КС2 камеры сгорания из котлов-утилизаторов при различных температурах газов на выходе из дополнительной камеры сгорания КС2 $T_{4.3}$ при $P_2 = 2,9$ МПа, $P_{21} = 0,5385$ МПа, $T_1 = 288,15$ К, $\alpha = 1,934$, $T_3 = 1523,15$ К.

Для проведения комплексной оптимизации параметров рабочих тел в исследуемой ТЭС – ПГУ были созданы граф и математическая модель установки (рис. 3).

Уравнения математической модели ТЭС – ПГУ представлены в виде балансов мощностей:

для окружающей среды

$$N_0 - N_0(\eta_{0-7} + \eta_{0-9} + \eta_{0-10} + \eta_{0-17}) = 0; \quad (1)$$

для котла-утилизатора высокого давления

$$N_2 - N_2(\eta_{2-4} + \eta_{2-9}) = 0; \quad (2)$$

для питательного насоса низкого давления

$$N_3 - N_3\eta_{3-4} = 0; \quad (3)$$

для котла-утилизатора низкого давления

$$N_4 - N_4(\eta_{4-10} + \eta_{4-16}) = 0; \quad (4)$$

для компрессора низкого давления

$$N_7 - N_7(\eta_{7-0} + \eta_{7-8}) = 0; \quad (5)$$

для компрессора высокого давления

$$N_8 - N_8(\eta_{8-9} + \eta_{8-11}) = 0; \quad (6)$$

для камеры сгорания высокого давления

$$N_9 - N_9\eta_{9-11} = 0; \quad (7)$$

для камеры сгорания низкого давления

$$N_{10} - N_{10}\eta_{10-12} = 0; \quad (8)$$

для турбины высокого давления

$$N_{11} - N_{11}(\eta_{11-7} + \eta_{11-8} + \eta_{11-12}) = 0; \quad (9)$$

для турбины низкого давления

$$N_{12} - N_{12}(\eta_{12-2} + \eta_{12-15}) = 0; \quad (10)$$

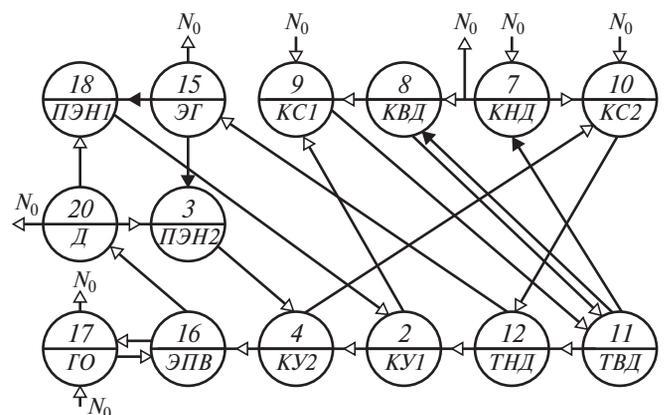


Рис. 3. Граф математической модели ТЭС – ПГУ с двухступенчатым сжатием воздуха и подводом теплоты с впрыском насыщенного пара из котлов-утилизаторов в основную и дополнительную камеры сгорания [2]:

2 – котел-утилизатор высокого давления; 3 – питательный электронасос низкого давления; 4 – котел-утилизатор низкого давления; 7 – воздушный компрессор низкого давления (КНД); 8 – воздушный компрессор высокого давления (КВД); 9 и 10 – камеры сгорания высокого и низкого давления; 11 и 12 – турбины высокого и низкого давления; 15 – электрогенератор ЭГ; 16 – экономайзер питательной воды; 17 – газоохладитель

для электрогенератора

$$N_{15} - N_{15}(\eta_{15-3} + \eta_{15-18}) = 0; \quad (11)$$

для экономайзера питательной воды

$$N_{16} - N_{16}(\eta_{16-17} + \eta_{16-20}) = 0; \quad (12)$$

для газоохладителя

$$N_{17} - N_{17}(\eta_{17-0} + \eta_{17-16}) = 0; \quad (13)$$

для питательного насоса высокого давления

$$N_{18} - N_{18}\eta_{18-2} = 0; \quad (14)$$

для деаэратора

$$N_{20} - N_{20}(\eta_{20-0} + \eta_{20-3} + \eta_{20-18}) = 0. \quad (15)$$

В уравнениях (1) – (15) символами $N_0 - N_{20}$ обозначены потоки мощности элементов графа математической модели ТЭС – ПГУ с двухступенчатым сжатием воздуха и подводом теплоты с впрыском насыщенного пара из котлов-утилизаторов в основную и дополнительную камеры сгорания (см. рис. 1), а символами $\eta_{0-1} - \eta_{20-18}$ — коэффициенты передачи потоков энергии соответствующих элементов графа. Они определяются как отношение передаваемой мощности к мощности элемента графа, принимающего поток энергии.

В результате решения уравнений графа были получены следующие значения коэффициентов передачи потоков энергии:

$$\begin{aligned} \eta_{0-7} &= 0,12268; & \eta_{0-9} &= 0,28562; & \eta_{0-10} &= \\ &= 0,14909; & \eta_{0-17} &= 0,44261; & \eta_{2-4} &= 0,9209; \\ \eta_{2-9} &= 0,0791; & \eta_{3-4} &= 1; & \eta_{4-10} &= 0,07245; \\ \eta_{4-16} &= 0,92755; & \eta_{7-0} &= 0,20647; & \eta_{7-8} &= \\ &= 0,31039; & \eta_{7-10} &= 0,48314; & \eta_{8-9} &= 0,92005; \\ \eta_{8-11} &= 0,07995; & \eta_{9-11} &= 1,0; & \eta_{10-12} &= 1,0; \\ \eta_{11-7} &= 0,22166; & \eta_{11-8} &= 0,12078; & \eta_{11-12} &= \\ &= 0,65756; & \eta_{12-2} &= 0,36318; & \eta_{12-15} &= 0,63682; \\ \eta_{15-0} &= 0,99836; & \eta_{15-3} &= 0,00024; & \eta_{15-18} &= \\ &= 0,0014; & \eta_{16-17} &= 0,919; & \eta_{16-20} &= 0,081; \\ \eta_{17-0} &= 0,9359; & \eta_{17-16} &= 0,0641; & \eta_{18-2} &= 1,0; \\ \eta_{20-0} &= 0,2529; & \eta_{20-3} &= 0,3597; & \eta_{20-18} &= \\ &= 0,3874 \end{aligned}$$

и потоков мощности элементов графа:

$$\begin{aligned} N_0 &= 256192,05; & N_2 &= 52451,45; & N_3 &= 1681; \\ N_4 &= 49983,75; & N_7 &= 55247,4; & N_8 &= 30126,1; \\ N_9 &= 105039,2; & N_{10} &= 68508,35; & N_{11} &= 107447,9; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{12} &= 139161,25; & N_{15} &= 88621; & N_{16} &= 56985; \\ N_{17} &= 165764,8; & N_{18} &= 1911,2; & N_{20} &= 4614. \end{aligned}$$

Подставив полученные значения коэффициентов передачи потоков энергии в матрицу, определили новое значение эффективного КПД для парогазовой ТЭС

$$\eta_{\text{эф}} = \frac{N_{15} \cdot 100}{N_0(\eta_{0-9} + \eta_{0-10})} = 79,575 \%$$

Погрешность вычислений для вариантной и комплексной оптимизации параметров рабочих тел парогазовой ТЭС при оценке КПД составила 0,004 %.

Выводы

1. Увеличение (примерно до 79,6 %) эффективного КПД ТЭС – ПГУ с двухступенчатым сжатием воздуха и подводом теплоты с впрыском насыщенного пара из котлов-утилизаторов в основную и дополнительную КС по сравнению с базовой ТЭС – ГТУ (36,5 %) стало возможным благодаря снижению затрат на сжатие воздуха в компрессоре с промежуточным воздухоохладителем за счет полезного использования теплоты уходящих газов для производства пара в котлах-утилизаторах с последующим впрыском полученного пара в камеры сгорания для увеличения массового расхода рабочего тела в турбине низкого давления, а также вследствие увеличения массового расхода воздуха из компрессора низкого давления, нагреваемого в дополнительной камере сгорания, в турбине низкого давления.

2. Применение математического моделирования с использованием матриц для оптимизации параметров рабочих тел ТЭС – ПГУ с двухступенчатым сжатием воздуха и подводом теплоты с впрыском насыщенного пара из котлов-утилизаторов в основную и дополнительную камеры сгорания высокоэффективно, на что указывает хорошая сходимость значений критерия оптимизации для вариантной и математической оптимизации.

Список литературы

1. **Ольховский Г. Г.** Газотурбинные и парогазовые установки в России. — Теплоэнергетика, 1999, № 1.
2. **Бирюков Б. В.** Об эффективности производства теплоты в отопительных теплоцентралях с паровыми котлами и газовыми турбинами. — Промышленная энергетика, 2009, № 7.

birykov43@bk.ru