

Об эффективности ТЭС – РГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессорах и подводом теплоты в основную и дополнительную камеры сгорания с полезным использованием теплоты уходящих газов для нагрева воздуха

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

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Дано описание исследуемой схемы ТЭС – РГТУ (регенеративной газотурбинной установки) с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессорах и подводом теплоты в основную и дополнительную камеры сгорания. Приведены результаты вариантной оптимизации параметров рабочих тел установки с применением метода математической оптимизации. Определен КПД газотурбинной установки (ГТУ), значения которого совпадают с КПД ГТУ, найденным с помощью вариантных расчетов.

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

С целью снижения себестоимости производимой электроэнергии на ТЭС предлагается устанавливать газотурбинные установки, выполненные на базе агрегата типа АД-31СТ производства ОАО “Сатурн-Люлька” (Москва) [1] (рис. 1).

Для определения теплотехнических показателей ТЭС – РГТУ были рассчитаны характеристики ГТУ с использованием данных о параметрах АД-31СТ: массовый расход сжимаемого в компрессоре воздуха – 61 кг/с, давление сжатого воздуха – 2,1 МПа, внутренний КПД компрессора – 0,87. Полезная

мощность ГТУ (20 МВт) вычислена при температуре газов на входе в турбину $T_3 = 1523,15$ К. Принято, что давление газов на выхлопе турбины $P_4 = 0,103$ МПа, а ее внутренний КПД – 0,8994. Эффективный КПД базовой ТЭС – ГТУ составил 36,5 % [1].

Расчеты по определению КПД ТЭС – РГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессорах при разных давлениях газов на входе в турбину показали (рис. 2), что максимальное значение эффективного КПД ГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха $\eta^{\circ} = 70,869$ % может быть достигнуто при давлении газов на входе в ТВД 1,6 МПа и температуре газов перед ТВД $T_3 = 1523,15$ К. При этом давление газов перед ТНД $P_{4-1} = 0,4$ МПа, а за ТНД $P_4 = 0,103$ МПа. Электрическая мощность ГТУ $N_{ГТУ} = 59,055$ МВт, расход топлива $V_{ТЭЦ} = 2,28$ кг/с. Давление газов перед ТВД P_2 изменялось в диапазоне 1,2 ÷ 1,8 МПа. Температура воздуха T_p после РВП1 и РВП2 принята равной 673,15 К; ко-

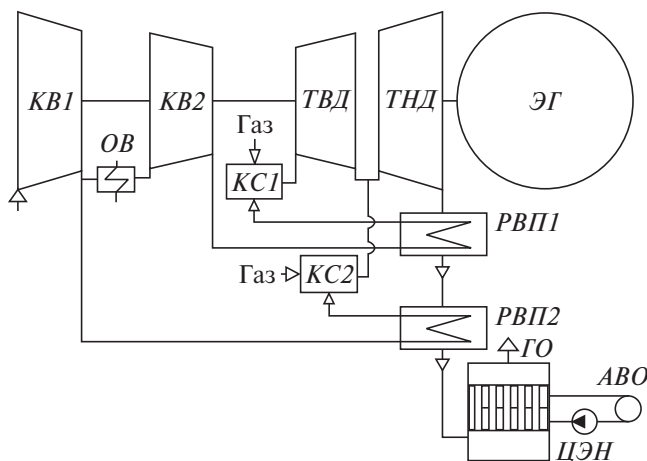


Рис. 1. Схема ТЭС – РГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессорах и подводом теплоты в основную и дополнительную камеры сгорания:

KB1 и KB2 – воздушные компрессоры низкого и высокого давлений; ОВ – охладитель воздуха; КС1 и КС2 – основная и дополнительная камеры сгорания; ТВД и ТНД – газовые турбины высокого и низкого давлений; РВП1 и РВП2 – регенеративные воздухоподогреватели высокого и низкого давлений; ГО – контактный газохладитель; АВО – аппарат воздушного охлаждения; ЦЭН – циркуляционный насос; ЭГ – электрогенератор

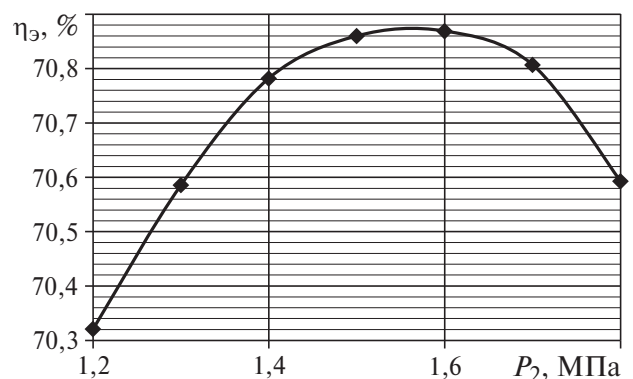


Рис. 2. Зависимость эффективного КПД ТЭС – РГТУ от давления газов на входе в газовую турбину высокого давления

T_{4-3}, K	T_{4-4}, K	$N_{ГТУ}, MВт$	$Q_{p1}, MВт$	$Q_{p2}, MВт$	$Q_r, MВт$	$B, кг/с$	$\eta^э, \%$
1523,15	1321,75	70,519	21,861	18,9104	89,468	2,888	66,817
1473,15	1296,95	68,921	21,861	18,9104	84,808	2,805	67,219
1423,15	1272,45	67,358	21,861	18,9104	80,253	2,724	67,658
1373,15	1248,25	65,816	21,861	18,9104	75,815	2,643	68,126
1323,15	1224,45	64,311	21,861	18,9104	71,479	2,564	68,637
1273,15	1200,95	62,834	21,861	18,9104	67,254	2,485	69,187
1223,15	1177,85	61,388	21,861	18,9104	63,133	2,407	69,783
1173,15	1155,05	59,971	21,861	18,9104	59,122	2,330	70,423
1140,35	1140,35	59,055	21,861	18,9104	56,550	2,280	70,869

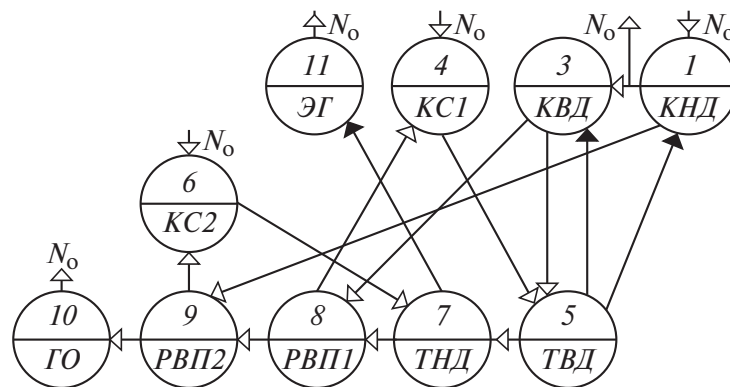


Рис. 3. Граф математической модели ТЭС – РГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха и двухступенчатым подводом теплоты в основную КС1 и дополнительную КС2 камеры сгорания [2]:

1 и 3 – воздушные компрессоры низкого и высокого давления; 4 и 6 – камеры сгорания высокого и низкого давления; 5 и 7 – турбины высокого и низкого давления; 8 и 9 – регенеративные подогреватели высокого и низкого давления; 10 – газоохладитель; 11 – электрогенератор

эффицент избытка воздуха после КНД $\alpha = 1,7802$.

В таблице приведены показатели РГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессоре и двухступенчатым подводом теплоты в основную и дополнительную камеры сгорания при различных температурах газов на выходе из дополнительной камеры сгорания КС2 при $P_2 = 1,6$ МПа, $P_4 = 0,4$ МПа, $T_1 = = 288,15$ К, $\alpha = 1,7802$, $T_3 = 1523,15$ К.

Для комплексной оптимизации параметров рабочих тел в исследуемой ТЭС – РГТУ были созданы граф и математическая модель установки (рис. 3). Уравнения математической модели представлены в виде балансов мощности:

для окружающей среды

$$N_0 - N_0(\eta_{0-1} + \eta_{0-4} + \eta_{0-6}) = 0; \quad (1)$$

для воздушного компрессора низкого давления КНД1:

$$N_1 - N_1(\eta_{1-0} + \eta_{1-3} + \eta_{1-9}) = 0; \quad (2)$$

для воздушного компрессора высокого давления КВД3:

$$N_3 - N_3(\eta_{3-5} + \eta_{3-8}) = 0; \quad (3)$$

для камеры сгорания высокого давления КС1:

$$N_4 - N_4\eta_{4-5} = 0; \quad (4)$$

для турбины высокого давления ТВД:

$$N_5 - N_5(\eta_{5-1} + \eta_{5-3} + \eta_{5-7}) = 0; \quad (5)$$

для камеры сгорания низкого давления КС2:

$$N_6 - N_6\eta_{6-7} = 0; \quad (6)$$

для турбины низкого давления *ТНД*:

$$N_7 - N_7(\eta_{7-8} + \eta_{7-11}) = 0; \quad (7)$$

для регенеративного воздухоподогревателя высокого давления *РВП1*:

$$N_8 - N_8(\eta_{8-4} + \eta_{8-9}) = 0; \quad (8)$$

для регенеративного воздухоподогревателя низкого давления *РВП2*:

$$N_9 - N_9(\eta_{9-6} + \eta_{9-10}) = 0; \quad (9)$$

для газоохладителя *ГО*:

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

для электрогенератора *ЭГ*:

$$N_{11} - N_{11}\eta_{11-0} = 0. \quad (11)$$

В уравнениях (1) – (11) символами от N_0 до N_{11} обозначены потоки мощности элементов графа математической модели ТЭС – РГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха и подводом теплоты в основную *КС1* и дополнительную *КС2* камеры сгорания (см. рис. 3), а символами от η_{0-1} до η_{11-0} — коэффициенты передачи потоков энергии соответствующих элементов графа. Коэффициенты η 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: $\eta_{0-1} = 0,2749$; $\eta_{0-4} = 0,5136$; $\eta_{0-6} = 0,2115$; $\eta_{1-0} = 0,178$; $\eta_{1-3} = 0,3924$; $\eta_{1-9} = 0,4296$; $\eta_{3-5} = 0,0745$; $\eta_{3-8} = 0,9255$; $\eta_{4-5} = 1,0$; $\eta_{5-1} = 0,1732$; $\eta_{5-3} = 0,1026$; $\eta_{5-7} = 0,7242$; $\eta_{6-7} = 1,0$; $\eta_{7-8} = 0,5409$; $\eta_{7-11} = 0,4591$; $\eta_{8-4} = 0,3945$; $\eta_{8-9} = 0,6055$; $\eta_{9-6} = 0,4068$; $\eta_{4-10} = 0,5932$; $\eta_{10-0} = 1,0$; $\eta_{11-0} = 1,0$ и потоков мощности элементов графа: $N_0 = 114934,35$; $N_1 = 48812,3$; $N_3 = 29353,7$; $N_4 = 97190,35$; $N_5 = 99376,5$; $N_6 = 56663,7$; $N_7 = 128628,2$; $N_8 = 96740,8$; $N_9 = 79547,8$; $N_{10} = 47189,9$; $N_{11} = 59055$.

Подставляя полученные значения коэффициентов передачи потоков энергии в матрицу, определяем новое значение эффективного КПД для газотурбинной ТЭС:

$$\eta^{\text{э}} = \frac{N_{11} \cdot 100}{N_0(\eta_{0-4} + \eta_{0-6})} = 70,866.$$

Погрешность вычислений для вариантной и комплексной оптимизации параметров рабочих тел газотурбинной ТЭС составила при оценке КПД 0,003 %.

Выводы

1. Применение рассмотренных ТЭС – РГТУ позволяет производить электроэнергию при высоком КПД (70,866 %). Увеличение эффективного КПД ТЭС – РГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха и подводом теплоты в основную и дополнительную КС по сравнению с эффективным КПД базовой ТЭС – ГТУ (36,5 %) почти в 2 раза стало возможным благодаря снижению затрат на сжатие воздуха в компрессоре с промежуточным воздухоохладителем вследствие полезного использования теплоты уходящих газов для подогрева воздуха в регенеративных подогревателях и за счет увеличения массового расхода рабочего тела в турбину низкого давления из компрессора низкого давления, нагреваемого в дополнительной камере сгорания.

2. Повышение КПД также достигается при снижении температуры газов на выходе из дополнительной камеры сгорания *КС2* благодаря уменьшению потерь с уходящими газами. Оптимум обеспечивается при равенстве температур после *ТВД* и после *КС2*.

3. Применение для оптимизации параметров рабочих тел ТЭС – РГТУ математического моделирования с использованием матриц высокоэффективно, о чем свидетельствует хорошая сходимость значений критерия 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.

shaposhnikov.valentin@gmail.com