

УДК 621.311

М. Н. Чепурной, к. т. н. доц.; Н. В. Резидент, к. т. н.; И. Н. Дымнич**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ И
ЭКОНОМИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ИХ ЗАГРУЗКИ**

Приведены метод расчетов и построения энергетических характеристик турбогенераторов. Проанализированы эффективность совместной работы энергоблоков, имеющих различные тепловые характеристики.

Ключевые слова: паровая турбина, тепловая характеристика, условное топливо, удельный расход условного топлива, энергоблок.

Введение

Основу энергетики составляют тепловые электрические станции (ТЭС), использующие органическое топливо. Потребление топлива можно уменьшить не только за счет применения новейших технологий в энергетике [1] (активный метод повышения эффективности), но и за счет рациональных режимов эксплуатации существующего оборудования (режимный метод). В процессе эксплуатации нескольких параллельно работающих турбогенераторов всегда возникает задача наиболее эффективного распределения нагрузки между ними. Эта задача решается при помощи энергетических характеристик. Энергетическими характеристиками называют зависимости удельных расходов пара, теплоты, условного топлива, коэффициентов полезного действия от электрических нагрузок турбогенератора. Действительные энергетические характеристики строят по результатам эксплуатационных испытаний. При этом нужно иметь в виду, что маневрирование нагрузкой ограничивается как минимальной, так и максимальной мощностью оборудования. В процессе эксплуатации необходимо бороться за каждую сотую долю процента уменьшения расхода теплоты на производство единицы (1 МВт час) электроэнергии. Для того, чтобы эксплуатационный персонал мог осуществлять экономичные режимы, нужно иметь необходимый нормативный материал.

Учитывая вышеизложенное, ставилась задача на конкретных примерах проанализировать совместную работу турбогенераторов, имеющих различные энергетические характеристики, и выявить наиболее эффективные режимы их работы.

Основные результаты

В качестве примеров выбрана конденсационная паровая турбина К-100-90 с электрогенератором и параметрами пара: начальное давление 8,8 МПа; начальная температура 530 °С; конечное давление 4 кПа. Максимальная и минимальная мощности на зажимах электрогенератора составляют 110 и 30 МВт соответственно. Из [2] выбраны текущие значения расхода пара на турбину и температур питательной воды в зависимости от электрической нагрузки электрогенератора N , которые сведены в табл. 1. Эти данные являются основными для вычислений энергетических характеристик.

Удельный расход пара на турбину, кг/(кВт час)

$$d = D / N, \quad (1)$$

где N имеет размерность МВт, а расход пара D – т/час.

Удельный расход теплоты, затрачиваемый на генерацию пара в парогенераторе для турбоустановок без промежуточного перегрева пара, кДж/кг

$$q_{nz} = [(h_0 - h'_{ng}) + \alpha \cdot (h'_o - h'_{ng})], \quad (2)$$

где h_0 , h'_{ng} и h'_o – энтальпия перегретого пара, питательной и продувочной воды из барабана парогенератора соответственно; d – доля непрерывной продувки, которая выбирается в диапазоне 0,02 – 0,03.

Удельная теплота, расходуемая на турбогенератор (энергоблок), МВт/(кВт час)

$$q = d \cdot q_{nz}. \quad (3)$$

Общая тепловая мощность, расходуемая на турбогенератор (ТГ), МВт

$$Q = D \cdot q_{nz} / 3,6 \cdot 10^{-3}. \quad (4)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) турбогенератора (брутто)

$$\eta = N / Q = 3,6 / q. \quad (5)$$

Удельный расход условного топлива, кг/(кВт час)

$$b = 0,123 / \eta. \quad (6)$$

Общий расход условного топлива на энергоблок, кг/с

$$B = b_y \cdot 3,6 / N. \quad (7)$$

На основании приведенных формул рассчитаны текущие значения энергетических характеристик, которые сведены в табл. 1, а графическая интерпретация характеристик показана на рис. 1 и рис. 2.

Таблица 1

Текущие значения энергетических характеристик

Нагрузка электрогенератора, МВт	Показатели						
	D_I , т/час	t_{ng} , °C	d_I , кг/(кВт·час)	Q_I , МВт	η_I	b_I , кг/(кВт·час)	B_I , кг/с
110	400	225	3,63	280	0,393	0,313	9,563
100	366	220	3,66	260	0,384	0,320	8,91
80	296	207	3,71	220	0,363	0,338	7,532
60	238	191	3,96	180	0,333	0,369	6,156
40	180	175	4,51	140	0,286	0,430	4,78
30	155	166	5,16	120	0,25	0,492	4,12

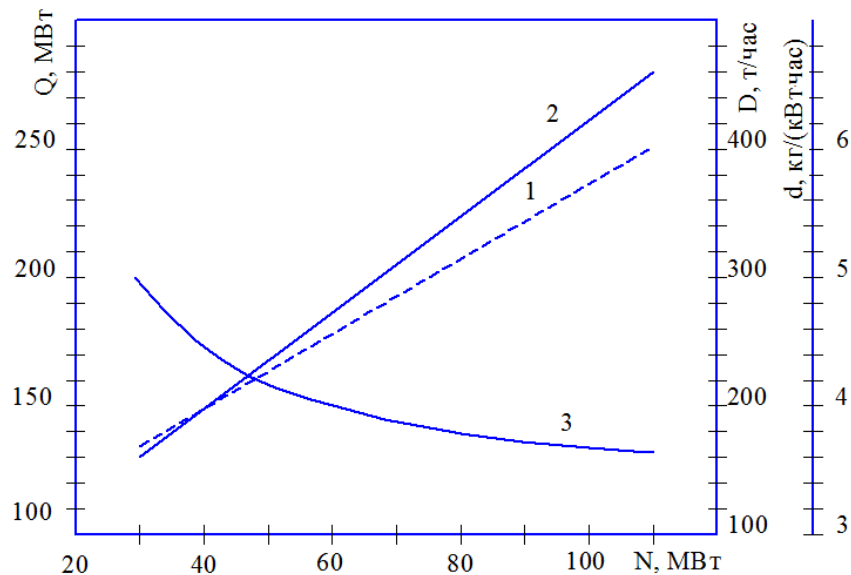


Рис. 1. Характеристики турбогенератора: 1 – расходная характеристика $D = f(N)$; 2 – тепловая характеристика $Q_I = f(N)$; 3 – характеристика удельного расхода пара $d_I = f(N)$

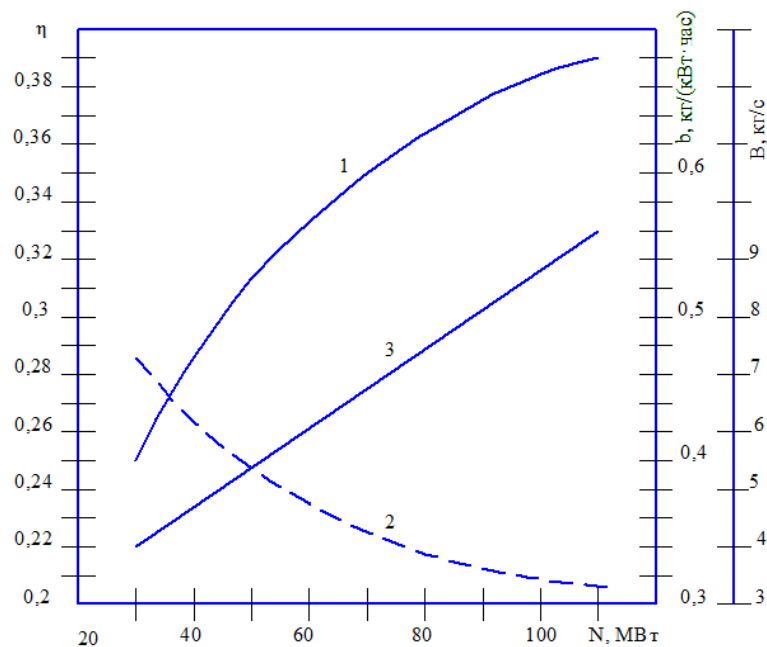


Рис. 2. Характеристики турбогенератора: 1 – $\eta_I = f(N)$; 2 – $b_I = f(N)$; 3 – $B_I = f(N)$

Из приведенных рисунков видно, что тепловая $Q_I = f(N)$ и расходные $D = f(N)$, $B = f(D)$ характеристики – линейные. Для данного энергоблока их уравнения:

$$D_1 = 63,125 + 3,0625 \cdot N; \Delta D / \Delta N = 3,0625 \text{ т}/(\text{МВт} \cdot \text{час}); \quad (8)$$

$$Q_1 = 60 + 2 \cdot N; \Delta Q / \Delta N = 2 \text{ МВт}/\text{МВт}; \quad (9)$$

$$B_1 = 2,05 + 0,0685 \cdot N; \Delta B / \Delta N = 0,0685 \text{ кг}/\text{МВт}. \quad (10)$$

Первое слагаемое в уравнении характеристики представляет величину, которая расходуется на холостой ход турбогенератора, т. е. при условии $N = 0$. Вторые слагаемые в уравнениях характеристик представляют собой относительные приращения величин на

единицу электрической мощности турбогенератора, т. е. $\Delta D/\Delta N$, $\Delta Q/\Delta N$, $\Delta B/\Delta N$.

Основной (определяющей) характеристикой следует считать тепловую характеристику $Q = f(N)$ (см. (4) – (7)). Она представляет собой приращение суммарных тепловых потерь, поскольку именно суммарные, а не отдельные потери, определяют эффективность работы турбогенератора (ТГ). Относительный прирост суммарных тепловых потерь, как увидим далее, может быть надежным критерием экономичного перераспределения нагрузки между отдельными ТГ, работающими параллельно. Несложно проследить также идентичный характер зависимостей $d = f(N)$ и $b = f_i(N)$, а также обратный им характер изменения КПД турбогенератора.

Из практики эксплуатации известно, что даже однотипные ТГ имеют хоть и похожие, но неодинаковые характеристики. Пусть второй турбогенератор на ТЭС К-100-90 имеет тепловую характеристику, которая представлена в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Данные основных характеристик второго турбогенератора

Нагрузка электрогенератора, МВт	Показатели						
	D_2 , т/час	$t_{нв}$, °C	d_2 , кг/(кВт·час)	Q_2 , МВт	η_2	b_2 , кг/(кВт·час)	B_2 , кг/с
30	133	0,225	0,546	4,555	30	133	0,225
40	150	0,266	0,462	5,137	40	150	0,266
60	188	0,319	0,385	6,423	60	188	0,319
80	225	0,355	0,346	7,687	80	225	0,355
100	262	0,381	0,322	8,951	100	262	0,381
110	280	0,393	0,313	9,563	110	280	0,393

Из сравнения данных, приведенных в табл. 1 и табл. 2, видно, что второй турбогенератор К-100-90 работает с более низким КПД, чем первый. Уравнениями линейных характеристик являются:

$$Q = 78 + 1,8375 \cdot N; \Delta Q/\Delta N = 1,8375 \text{ МВт/МВт}; \quad (11)$$

$$B = 2,678 + 0,0626 \cdot N; \Delta B/\Delta N = 0,0626 \text{ кг/МВт}. \quad (12)$$

Сравнивая (9) и (10), несложно обнаружить, что второй энергоблок имеет меньший относительный прирост теплоты.

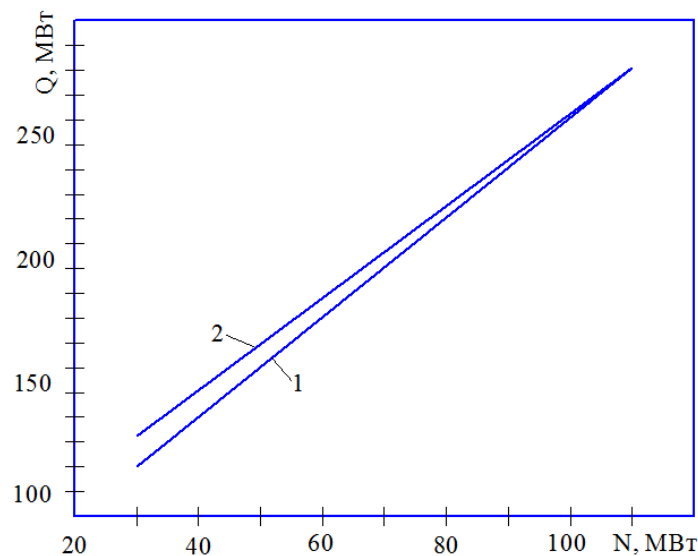


Рис. 3. Тепловые характеристики первого (1) и второго (2) турбогенераторов

Пусть суммарная нагрузка ТЭС составляет 140 МВт. Казалось бы, вполне логично на максимальную мощность загружать турбогенератор с большими значениями КПД. Попробуем разгрузить первый ТГ и догрузить второй турбогенератор. Основные показатели отдельных турбогенераторов и ТЭС при этом условии приведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели совместной работы турбогенераторов на ТЭС

N_1 , МВт	Q_1 , МВт	η	B , кг/с	N_1 , МВт	Q_2 , МВт	η_2	B_2 , кг/с	$N_{ТЭС}$, МВт	$Q_{ТЭС}$, МВт	$\eta_{ТЭС}$	$B_{ТЭС}$, кг/с
110	280	0,393	9,563	30	133	0,225	4,555	140	413	0,339	14,118
100	260	0,384	8,9	40	150	0,266	5,137	140	410	0,341	14,037
80	220	0,363	7,53	60	188	0,319	6,423	140	408	0,343	13,95
60	180	0,333	6,156	80	225	0,355	7,687	140	405	0,346	13,84
40	140	0,286	4,78	100	262	0,3816	8,95	140	402	0,348	13,73
30	120	0,25	4,1	110	280	0,393	9,563	140	400	0,35	13,63

При помощи данных табл. 3 можно определить наиболее эффективные режимы работы ТЭС при любом распределении нагрузки между энергоблоками. Приведенные данные свидетельствуют о том, что передача нагрузки от энергоблока с большими значениями КПД на энергоблок с меньшими значениями КПД при определенных условиях повышает эффективность работы ТЭС, что наглядно проиллюстрировано на рис. 4.

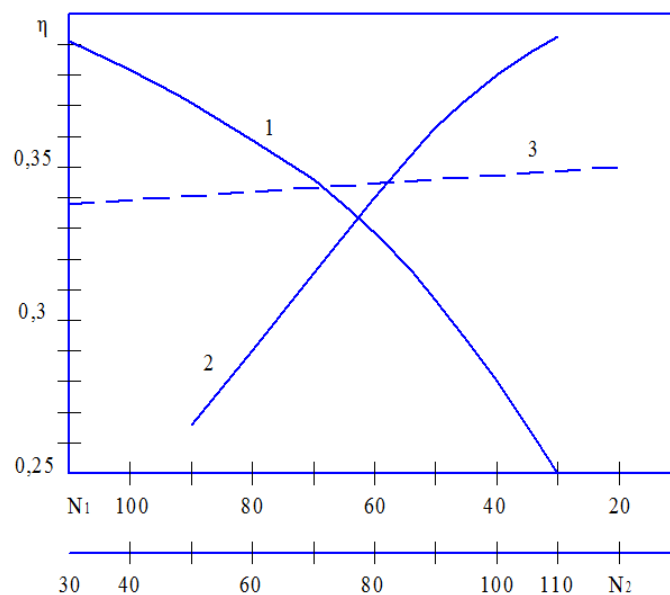


Рис. 4. Значения коэффициентов полезного действия: 1 – первого энергоблока; 2 – второго энергоблока; 3 – ТЭС

Это возможно лишь тогда, когда тепловая характеристика турбогенератора с меньшими значениями КПД имеет меньший относительный прирост теплоты $\Delta Q/\Delta N$, т. е. меньшие тепловые потери в процессе выработки электроэнергии. Несложно заметить, что при режиме работы ТЭС с $N_1 = 110$ МВт и $N_2 = 30$ МВт расход условного топлива составляет 14,118 кг/с, а в режиме работы ТЭС с $N_1 = 30$ МВт и $N_2 = 110$ МВт – 13,63 кг/с. Таким образом, для ТЭС с $N = 140$ МВт достигается экономия условного топлива, которая равна 1,765 т/час.

Рассмотрим теперь работу ТЭС при условии, что второй энергоблок имеет тепловую характеристику, изображенную на рис. 5, а остальные показатели характеристик приведены в табл. 4.

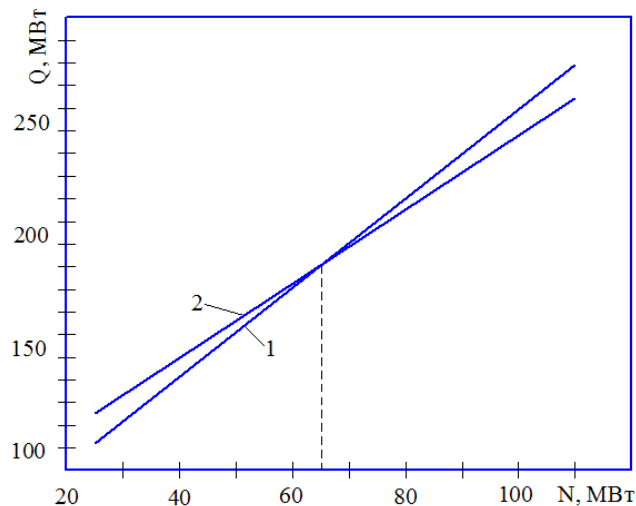


Рис. 5. Тепловые характеристики первого (1) и второго (2) турбогенераторов

Из рис. 5 видно, что равновеликая эффективность работы первого и второго энергоблоков достигается при условии $N_1 = N_2 = 65$ МВт. При этом для $N_2 < 65$ МВт эффективность работы второго турбогенератора меньше, чем первого, а для $N_2 > 65$ МВт – наоборот. Уравнения тепловой и топливной характеристик второго энергоблока имеют вид:

$$Q_2 = 78,57 + 1,714 \cdot N; \Delta Q / \Delta N = 1,714 \text{ МВт} / \text{МВт}; \quad (13)$$

$$B = 2,708 + 0,0583 \cdot N; \Delta B / \Delta N = 0,0583 \text{ кг} / \text{МВт}. \quad (14)$$

Таблица 4

Показатели основных характеристик второго энергоблока

Нагрузка электрогенератора, МВт	Показатели						
	D_2 , т/час	$t_{нв}$, °C	d_2 , кг/(кВт·час)	Q_2 , МВт	η_2	b_2 , кг/(кВт·час)	B_2 , кг/с
30	130	0,23	0,534	4,456	30	130	0,23
40	150	0,266	0,462	5,137	40	150	0,266
60	180	0,333	0,369	6,156	60	180	0,333
65	190	0,342	0,359	6,493	65	190	0,342
80	215	0,372	0,33	7,347	80	215	0,372
100	250	0,4	0,307	8,542	100	250	0,4
110	267	0,412	0,298	9,122	110	267	0,412

Снова обратим внимание на то, что и в этом случае относительный прирост теплоты на втором энергоблоке меньше, чем на первом. Это позволяет ожидать, что передача нагрузки на второй турбогенератор должна повышать эффективность работы ТЭС. Показатели совместной работы энергоблоков на ТЭС сведены в табл. 5.

Таблица 5

Показатели совместной работы турбогенераторов на ТЭС

N_1 , МВт	Q_1 , МВт	η	B , кг/с	N_1 , МВт	Q_2 , МВт	η_2	B_2 , кг/с	N_{TEC} , МВт	Q_{TEC} , МВт	η_{TEC}	B_{TEC} , кг/с
110	280	0,393	9,563	30	130	0,23	4,456	140	410	0,341	14,02
100	260	0,384	8,9	40	150	0,266	5,137	140	410	0,341	14,02
80	220	0,363	7,53	60	180	0,333	6,156	140	400	0,35	13,685
60	180	0,333	6,156	80	215	0,372	7,347	140	395	0,354	13,528
40	140	0,286	4,78	100	250	0,4	8,541	140	390	0,356	13,32
30	120	0,25	4,1	110	267	0,412	9,122	140	387	0,362	13,21

Данные табл. 5 свидетельствуют о том, что до нагрузки 65 МВт эффективнее работает первый энергоблок. Это объясняется тем, что расход теплоты на холостой ход у него меньше, чем у первого. После нагрузки 65 МВт эффективнее работает второй энергоблок, поскольку относительный прирост теплоты у него меньше, чем в первом. Выходит, что при нагрузках до 60 МВт целесообразно в первую очередь загружать первый энергоблок, а при нагрузках более 60 МВт – второй. Следовательно, загрузка второго энергоблока до максимальной мощности обуславливает экономию условного топлива - $\Delta B = 2,916$ т/час.

Выводы

1. Коэффициенты полезного действия и связанные с ними удельные расходы теплоты не могут быть критериями экономического распределения нагрузки между энергоблоками.
2. Тепловая характеристика является основной характеристикой, при помощи которой определяется эффективность работы теплоэнергетических установок.
3. Критерием экономического распределения нагрузки между энергоблоками является относительный прирост теплоты на производство электроэнергии.
4. Для обеспечения экономии топлива следует полностью загружать энергоблоки, имеющие меньший относительный прирост теплоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чепурний М. М. Энергозбережні технології в теплоенергетиці / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. - Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.
2. Теплотехнический справочник : [под ред. В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева]. – М.: Энергия, 1975. – Т. 1. – 744 с.
3. Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции / В. Я. Рыжкин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 456 с.

Чепурной Марк Николаевич - к. т. н., профессор кафедры теплоэнергетики института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Резидент Наталья Владимировна - к. т. н., старший преподаватель института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Дымнич Илона Николаевна - студентка 5 курса института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Винницкий национальный технический университет.