

8. Яковлев Б. В. Эффективность ступенчатого подогрева сетевой воды у современных турбин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1969. – № 5. – С. 49–54.

9. Леонков А. М., Качан А. Д. Выбор расчетных характеристик части низкого давления теплофикационных турбин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ). – 1969. – № 5. – С. 43–48.

10. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Многолетние данные. Белорусская ССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – С. 302.

11. Кендалл М. Дж., Стюарт А. Теория распределений. – М.: Наука, 1966. – 587 с.

12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1977. – С. 832.

13. Россиевский Г. И., Аршакян Д. Т. Влияние климатических условий на показатели, определяющие энергетическую эффективность теплофикации городов // Электрические станции. – 1962. – № 11. – С. 21–25.

14. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика. – М.: Стройиздат, 1983.

Представлена научной секцией
НТС РУП «БелНИПИэнергопром»

Поступила 7.02.2002

УДК 621.165

АППРОКСИМАЦИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЭЦ

Канд. техн. наук, доц. ПАЩЕНКО А. В., инж. ПОПОВА Ю. Б.

Белорусская государственная политехническая академия

При решении задачи межстанционной оптимизации режимов энергосистемы часто используют принцип энергетического эквивалентирования [1, 2], который позволяет отказаться от рассмотрения отдельных агрегатов каждой электростанции, входящей в состав энергосистемы, и определять целую электростанцию как эквивалентный агрегат. В свою очередь, энергетическое эквивалентирование базируется на принципе оптимальности динамического программирования (он также известен как «принцип Беллмана»). Суть этого принципа можно изложить следующим образом: какая бы суммарная мощность (тепловая, электрическая) ни была задана группе агрегатов, она должна быть распределена внутри группы оптимально.

Таким образом, для решения задачи межстанционной оптимизации необходимо, прежде всего, наличие оптимальной эквивалентной характеристики (ОЭХ) каждой станции энергосистемы. Получить такие характеристики можно в результате решений задач внутристанционной оптимизации на интервалах изменения тепловой и электрической нагрузок.

В [3, 4] были предложены методики (на основе метода динамического программирования) и программное обеспечение (ПО), позволяющие решить задачи внутристанционной оптимизации и построения оптимальной эквивалентной характеристики ТЭЦ при работе теплофикационных турбин по электрическому и тепловому графикам. Полученная таким образом

ОЭХ имеет вид таблицы, каждая строка которой выражает зависимость суммарного оптимального расхода теплоты Q_0 на работающие агрегаты от:

- заданных производственной Q_p , теплофикационной Q_t и электрической N нагрузок в случае работы турбин по электрическому графику;
- заданных производственной Q_p и теплофикационной Q_t нагрузок в случае работы турбин по тепловому графику.

Проведем анализ полученной в [4] ОЭХ турбин первой очереди МТЭЦ-3, в состав которой входят следующие турбоустановки:

- ст. № 1 – турбина ПТ-25-90/10;
- ст. № 2 – турбина ПР-25-90/10;
- ст. № 3 – турбина ПТ-25-90/10;
- ст. № 4 – турбина ПТ-25-90/10.

В силу низкой экономичности конденсационной выработки электроэнергии турбины первой очереди должны работать по тепловому графику. Поэтому рассмотрим именно этот случай. Необходимо также добавить, что при работе турбин по тепловому графику конкретным значениям нагрузок производственного и теплофикационного отборов соответствует некоторая электрическая мощность, определяемая минимальным пропуском пара в конденсатор, поэтому ОЭХ представлена в виде двух зависимостей:

- расхода теплоты на группу турбин от нагрузок теплофикационного и производственного отборов;
- суммарной электрической мощности турбин от нагрузок теплофикационного и производственного отборов.

На рис. 1, 2 приведено графическое изображение ОЭХ первой очереди МТЭЦ-3. В качестве параметра здесь выступает производственная нагрузка Q_p .

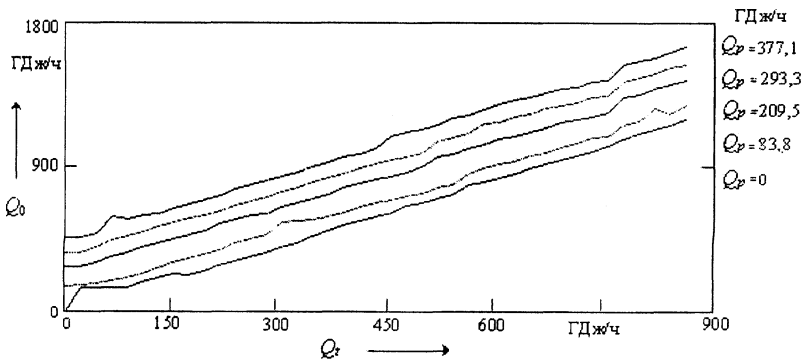


Рис. 1. Зависимость расхода теплоты на группу турбин от нагрузок теплофикационного и фиксированного производственного отборов

Представленные выше графики не являются гладкими из-за смены состава работающего оборудования. Поэтому весьма затруднительно будет провести аппроксимацию ОЭХ для ее дальнейшего использования в системной задаче или для оптимизации режимов работы оборудования ТЭЦ в целом. Для выхода из этой ситуации авторы предлагают кусочно-интервальную аппроксимацию ОЭХ, для построения которой необходимо реализовать следующий алгоритм.

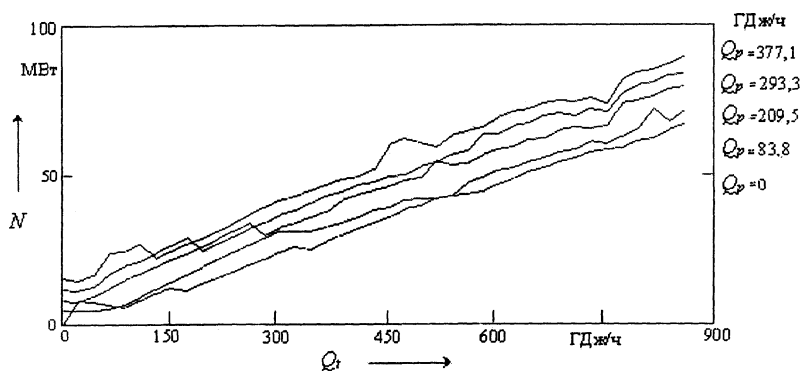


Рис. 2. Зависимость суммарной электрической мощности группы турбин от нагрузок теплофикационного и фиксированного производственного отборов

1. Сузить интервалы производственной и теплофикационной нагрузок от технически возможных (рис. 1, 2) до практически реализуемых. Для первой очереди МТЭЦ-3 такой диапазон производственной нагрузки $Q_p \in [83,8; 377,1]$ ГДж/ч (или $[20; 90]$ Гкал/ч), а теплофикационной нагрузки $Q_t \in [83,8; 628,5]$ ГДж/ч (или $[20; 150]$ Гкал/ч).

2. Выделить оптимальный состав работающего оборудования на этих интервалах. Для первой очереди МТЭЦ-3 графики ОЭХ при некоторых фиксированных значениях Q_p приведены ниже.

Из рис. 3–6 следует, что на интересующих интервалах тепловых нагрузок оптимальной будет первоочередная загрузка турбины ст. № 2, затем последовательное добавление турбин ст. № 1 и 3. Такая последовательность загрузки турбин вполне объяснима. При тепловых нагрузках, которые может обеспечить самая экономичная турбина с противодавлением ст. № 2, в работе, естественно, должна находиться только эта турбоустановка. При дальнейшем увеличении уровня тепловых нагрузок, когда вместе с турбиной ст. № 2 должны работать другие турбоустановки первой очереди, выгодным является использование турбины ст. № 1 как имеющей минимальные потери теплоты в цикле. Этот эффект достигается вследствие работы турбины с существенной (до 90 %) степенью утилизации теплоты отработавшего пара за счет подогрева сырой воды в конденсаторе. Однако эта турбоустановка должна работать с ограниченным расходом свежего пара, что объясняется отсутствием в схеме ее регенерации подогревателя высокого давления (ПВД). Поэтому при дальнейшем увеличении тепловых нагрузок подключается турбина ст. № 3.

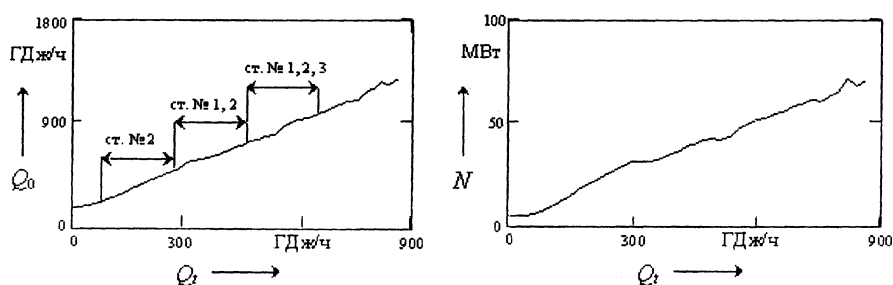


Рис. 3. ОЭХ первой очереди МТЭЦ-3 при $Q_p = 83,8$ ГДж/ч (20 Гкал/ч)

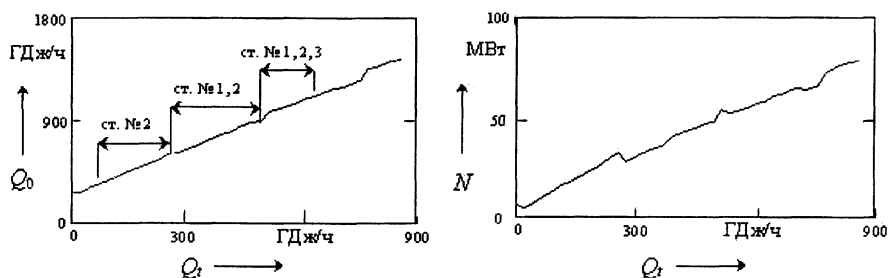


Рис. 4. ОЭХ первой очереди МТЭЦ-3 при $Q_p = 209,5$ ГДж/ч (50 Гкал/ч)

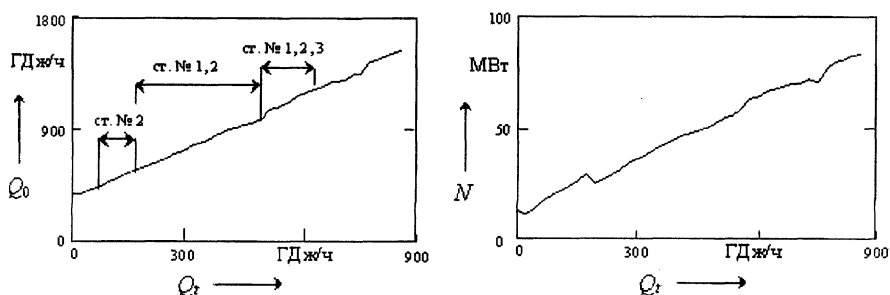


Рис. 5. ОЭХ первой очереди МТЭЦ-3 при $Q_p = 293,3$ ГДж/ч (70 Гкал/ч)

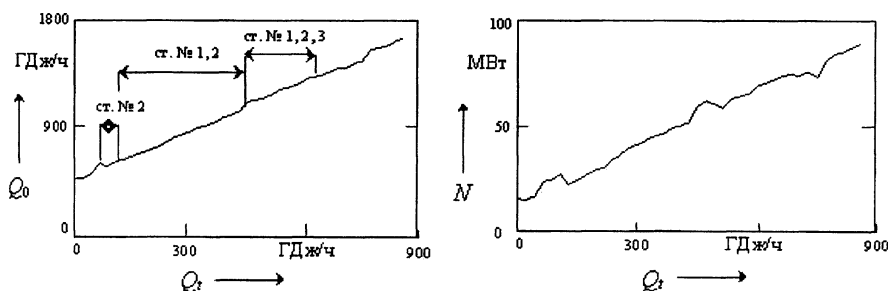


Рис. 6. ОЭХ первой очереди МТЭЦ-3 при $Q_p = 377,1$ ГДж/ч (90 Гкал/ч)

3. Разбить ОЭХ на участки с постоянным составом работающего оборудования. Тогда для ОЭХ первой очереди МТЭЦ-3 первый участок будет совпадать с расходной характеристикой турбины ст. № 2 на интересующем интервале. Второй участок ОЭХ будет соответствовать одновременной работе турбин ст. № 1 и ст. № 2, третий участок ОЭХ – работе турбин ст. № 1, ст. № 2 и ст. № 3. Графические изображения этих участков ОЭХ представляют собой семейство линий с параметром Q_p (ГДж/ч) и приведены на рис. 7–9. По оси абсцисс отложена теплофикационная мощность турбины Q_i (ГДж/ч), а по оси ординат – расход теплоты Q_0 (ГДж/ч) на графиках слева и электрическая мощность турбины N (МВт) на графиках справа. О нумерации внутри графиков будет сказано ниже в п. 4. Графики построены с использованием ППП MathCAD 2000 Pro.

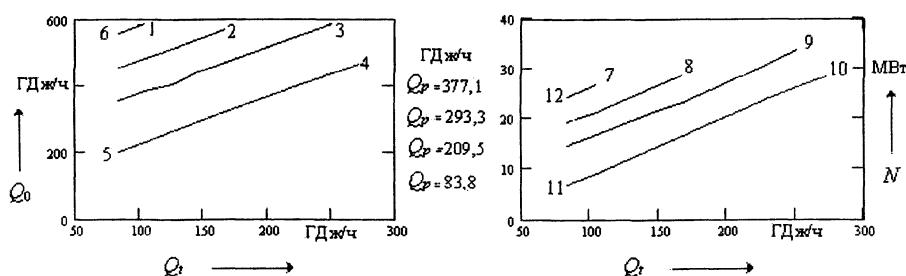


Рис. 7. Участок ОЭХ при работе турбины ст. № 2

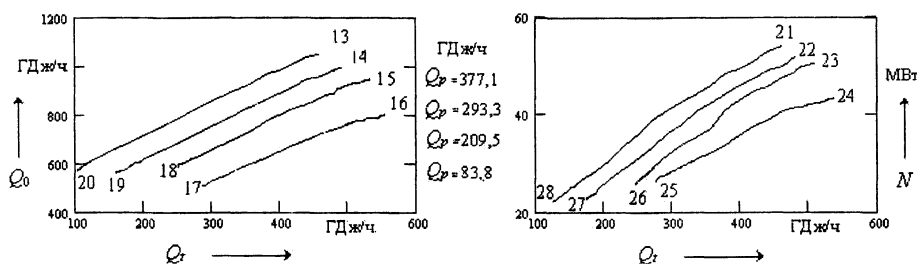


Рис. 8. Участок ОЭХ при одновременной работе турбин ст. № 1 и ст. № 2

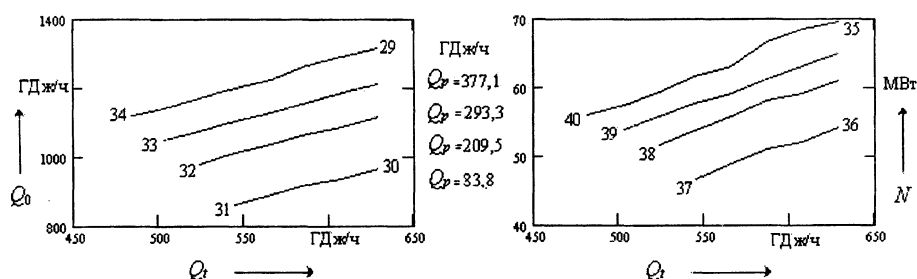


Рис. 9. Участок ОЭХ при одновременной работе турбин ст. № 1, ст. № 2 и ст. № 3

4. Выделить внутри каждого участка ОЭХ поверхности и ограничивающие их линии. Для первого участка ОЭХ первой очереди МТЭЦ-3 можно выделить две поверхности 1–6 и 7–12 (рис. 7). Линии 1–4 и 7–10 являются верхними границами поверхностей и позволяют построить функциональную зависимость $Q_t^{\max 1} = f(Q_p)$ по данным, представленным в табл. 1.

Таблица 1

Номер точки на рис.7	1(7)	2(8)	3(9)	4(10)
Q_p , ГДж/ч	377,1	293,3	209,5	83,8
$Q_t^{\max 1}$, ГДж/ч	104,8	167,66	251,4	272,26

С использованием ППП MathCAD 2000 Pro получена функциональная зависимость вида

$$Q_t^{\max 1}(Q_p) = 120,400 + 2,931Q_p - 0,015Q_p^2 + 1,863 \cdot 10^{-5}Q_p^3.$$

Очевидно, что нижней границей указанных выше поверхностей будет линия $Q_t^{\min 1}(Q_p) = 83,8$ ГДж/ч.

Аналогичным образом можно выделить поверхности 13–20 и 21–28, относящиеся ко второму участку рассматриваемой ОЭХ, и поверхности 29–34 и 35–40, относящиеся к третьему участку ОЭХ. Тогда с помощью аппроксимаций можно получить следующие функциональные зависимости:

$Q_t^{\min 2} = f(Q_p)$ для линии 17–20 (или 25–28) (рис. 8). Можно заметить, что данная линия является переходом от первого участка ко второму, поэтому будет совпадать с $Q_t^{\max 1}(Q_p)$;

$Q_t^{\max 2} = f(Q_p)$ для линии 13–16 (или 21–24) (рис. 8). С использованием ППП MathCAD 2000 Pro получена функциональная зависимость вида

$$Q_t^{\max 2}(Q_p) = 524,050 + 0,086Q_p - 1,171 \cdot 10^{-3}Q_p^2 + 1,324 \cdot 10^{-6}Q_p^3;$$

$Q_t^{\min 3} = f(Q_p)$ для линии 31–34 (или 37–40) (рис. 9). Данная линия является переходом от второго участка к третьему, поэтому будет совпадать с $Q_t^{\max 2}(Q_p)$.

Очевидно, что верхней границей поверхности, относящейся к третьему участку ОЭХ, будет линия $Q_t^{\max 3} = 628,5$ ГДж/ч.

5. Провести аппроксимацию поверхностей каждого участка ОЭХ для получения функциональных зависимостей $Q_0 = f(Q_p, Q_t)$ и $N = f(Q_p, Q_t)$.

С использованием встроенных функций множественной регрессии ППП MathCAD 2000 Pro авторы получили полиномы первой и второй степеней для поверхностей каждого участка ОЭХ первой очереди МТЭЦ-3.

Для первого участка ОЭХ были получены:

полиномы первой степени –

$$Q_0(Q_p, Q_t) = 1,205Q_p + 1,404Q_t - 18,323;$$

$$N(Q_p, Q_t) = 0,059Q_p + 0,115Q_t - 7,651;$$

полиномы второй степени –

$$Q_0(Q_p, Q_t) = -2,619 \cdot 10^{-5}Q_pQ_t + 6,868 \cdot 10^{-5}Q_t^2 + \\ + 1,387Q_t - 15,310 + 1,180Q_p + 7,275 \cdot 10^{-5}Q_p^2;$$

$$N(Q_p, Q_t) = -2,119 \cdot 10^{-5}Q_pQ_t + 1,237 \cdot 10^{-5}Q_t^2 + \\ + 0,114Q_t - 7,756 + 0,060Q_p + 2,582 \cdot 10^{-6}Q_p^2.$$

Для сравнения в табл. 2 приведены некоторые значения расхода теплоты Q_0 (ГДж/ч) и электрической мощности N (МВт), полученные из исходной ОЭХ и в результате аппроксимации полиномами первой и второй степеней.

Таблица 2

Пара (Q_p, Q_t) , ГДж/ч	(83,8; 83,8)	(83,8; 209,5)	(209,5; 83,8)	(293,3; 167,6)	(377,1; 83,8)
Исходное Q_0 , ГДж/ч	200,13	376,92	351,12	570,22	555,65
Значение полинома 1-й ст., ГДж/ч	200,15	376,64	351,63	570,57	553,62
Значение полинома 2-й ст., ГДж/ч	200,47	377,06	351,16	570,3	555,82
Исходное N , МВт	6,8	21,3	14,2	28,7	24,04
Значение полинома 1-й ст., МВт	6,855	21,26	14,222	28,758	24,049
Значение полинома 2-й ст., МВт	6,780	21,326	14,163	28,692	24,024

Для оценки полиномиальной регрессии используется коэффициент детерминации [5]

$$R^2 = \frac{\sum (f'(Q_p, Q_t) - \bar{f}(Q_p, Q_t))^2}{\sum (f(Q_p, Q_t) - \bar{f}(Q_p, Q_t))^2}, \quad (1)$$

где $f'(Q_p, Q_t)$ – значение функции по полученной регрессионной модели; $\bar{f}(Q_p, Q_t)$ – среднее значение выборки; $f(Q_p, Q_t)$ – исходные данные выборки.

Коэффициент детерминации показывает, насколько хорошо эмпирическая регрессия объясняет взаимосвязи между переменными. Значения коэффициента детерминации располагаются в интервале $0 \leq R^2 \leq 1$, и чем ближе это значение к единице, тем более точно подобрана модель. Качественная оценка степени адекватности эмпирической регрессии может быть выявлена на основе шкалы Челлока [5], приведенной в табл. 3. При значениях коэффициента детерминации более 0,7 регрессионная модель признается пригодной для практического использования в целях прогнозирования.

Таблица 3

Значение R^2	0 ... 0,1	0,1 ... 0,3	0,3 ... 0,5	0,5 ... 0,7	0,7 ... 0,9	0,9 ... 1
Степень адекватности модели регрессии	Отсутствует	Слабая	Умеренная	Заметная	Высокая	Весьма высокая

Проведем оценку полученных полиномов для первого участка ОЭХ:

для полиномов первой степени –

$$R_{Q_0}^2 = 0,998; \quad R_N^2 = 0,997;$$

для полиномов второй степени –

$$R_{Q_0}^2 = 0,999; \quad R_N^2 = 0,998.$$

Можно также вычислить оценки погрешности аппроксимации.

Оценка математического ожидания ошибки аппроксимации:

$$\varepsilon_{Q_0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i(Q_p, Q_t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{0i}(Q_p, Q_t) - Q_{0i}'(Q_p, Q_t)); \quad (2)$$

$$\varepsilon_N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i(Q_p, Q_t) - N_i'(Q_p, Q_t)), \quad (3)$$

где $\varepsilon_{Q_0}, \varepsilon_N$ – оценка математического ожидания ошибки аппроксимации для функций $Q_0 = f(Q_p, Q_t)$ и $N = f(Q_p, Q_t)$ соответственно; n – количество рассматриваемых пар (Q_p, Q_t) выборки; $Q_{0i}(Q_p, Q_t)$, $N_i(Q_p, Q_t)$ – значения расхода теплоты и электрической мощности в точках выборки; $Q_{0i}'(Q_p, Q_t)$, $N_i'(Q_p, Q_t)$ – значения полиномов для расхода теплоты и электрической мощности.

Тогда для полиномов первой степени $\varepsilon_{Q_0} = 0,21$ ГДж/ч; $\varepsilon_N = 0,91$ МВт, а для полиномов второй степени $\varepsilon_{Q_0} = 0,19$ ГДж/ч; $\varepsilon_N = 0,9$ МВт.

Оценка дисперсии ошибки аппроксимации:

$$\varepsilon_{Q_0}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{0i}(Q_p, Q_t) - Q_{0i}'(Q_p, Q_t))^2; \quad (4)$$

$$\varepsilon_N^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i(Q_p, Q_t) - N_i'(Q_p, Q_t))^2. \quad (5)$$

Тогда для полиномов первой степени $\varepsilon_{Q_0}^2 = 0,1$ ГДж/ч; $\varepsilon_N^2 = 0,6$ МВт, а для полиномов второй степени $\varepsilon_{Q_0}^2 = 0,09$ ГДж/ч; $\varepsilon_N^2 = 0,48$ МВт.

Аналогичным образом для второго и третьего участков ОЭХ были получены:

полиномы первой степени –

а) для второго участка ОЭХ:

$$Q_0(Q_p, Q_t) = 1,142Q_p + 1,327Q_t + 20,585;$$

$$N(Q_p, Q_t) = 0,048Q_p + 0,095Q_t - 6,447;$$

$$R_{Q_0}^2 = 0,995; \quad R_N^2 = 0,968;$$

$$\varepsilon_{Q_0} = 0,22 \text{ ГДж/ч}; \quad \varepsilon_N = 1,3 \text{ МВт};$$

$$\varepsilon_{Q_0}^2 = 0,12 \text{ ГДж/ч}; \quad \varepsilon_N^2 = 0,79 \text{ МВт};$$

б) для третьего участка ОЭХ:

$$Q_0(Q_p, Q_t) = 1,166Q_p + 1,335Q_t + 33,833;$$

$$N(Q_p, Q_t) = 0,051Q_p + 0,093Q_t - 8,033;$$

$$R_{Q_0}^2 = 0,998; \quad R_N^2 = 0,995;$$

$$\varepsilon_{Q_0} = -0,21 \text{ ГДж/ч}; \quad \varepsilon_N = 0,95 \text{ МВт};$$

$$\varepsilon_{Q_0}^2 = 0,11 \text{ ГДж/ч}; \quad \varepsilon_N^2 = 0,53 \text{ МВт};$$

полиномы второй степени –

а) для второго участка ОЭХ:

$$Q_0(Q_p, Q_t) = 1,456 \cdot 10^{-5} Q_p Q_t - 4,185 \cdot 10^{-4} Q_t^2 + \\ + 1,596 Q_t - 15,250 + 1,103 Q_p + 7,462 \cdot 10^{-5} Q_p^2;$$

$$N(Q_p, Q_t) = -1,875 \cdot 10^{-5} Q_p Q_t - 9,448 \cdot 10^{-5} Q_t^2 + \\ + 0,162 Q_t - 18,228 + 0,059 Q_p - 6,915 \cdot 10^{-6} Q_p^2;$$

$$R_{Q_0}^2 = 0,998; \quad R_N^2 = 0,987;$$

$$\varepsilon_{Q_0} = -0,22 \text{ ГДж/ч}; \quad \varepsilon_N = 1,06 \text{ МВт};$$

$$\varepsilon_{Q_0}^2 = 0,11 \text{ ГДж/ч}; \quad \varepsilon_N^2 = 0,68 \text{ МВт}.$$

б) для третьего участка ОЭХ:

$$Q_0(Q_p, Q_t) = 4,756 \cdot 10^{-4} Q_p Q_t - 7,330 \cdot 10^{-5} Q_t^2 + \\ + 1,278 Q_t + 91,783 + 0,889 Q_p + 7,444 \cdot 10^{-6} Q_p^2;$$

$$N(Q_p, Q_t) = 4,487 \cdot 10^{-5} Q_p Q_t - 2,628 \cdot 10^{-7} Q_t^2 + \\ + 0,080 Q_t - 0,801 + 0,029 Q_p - 8,362 \cdot 10^{-6} Q_p^2;$$

$$R_{Q_0}^2 = 0,999; \quad R_N^2 = 0,994;$$

$$\varepsilon_{Q_0} = 0,17 \text{ ГДж/ч}; \quad \varepsilon_N = 0,96 \text{ МВт};$$

$$\varepsilon_{Q_0}^2 = 0,08 \text{ ГДж/ч}; \quad \varepsilon_N^2 = 0,56 \text{ МВт}.$$

Анализ оценок полученных полиномиальных моделей на каждом участке рассматриваемой ОЭХ позволяет сделать вывод о пригодности полиномов как первой, так и второй степени. Выбор в пользу того или иного полинома должен осуществляться в результате компромиссного решения между простотой модели и ее точностью.

Как видно из предложенного выше алгоритма кусочно-интервальной аппроксимации оптимальной эквивалентной характеристики ТЭЦ, он представляет собой довольно трудоемкий процесс. Во-первых, это связано с большим количеством исходной информации, а во-вторых – с частыми промежуточными аппроксимациями и оценками их погрешностей. Поэтому авторы считают целесообразным создание специального программного продукта для реализации предложенного выше алгоритма. Более того, такой программный продукт должен предоставлять пользователю возможность автоматизированного подбора наилучшего полинома. В настоящее время авторы работают над созданием требуемого программного обеспечения.

ВЫВОДЫ

1. Предложен алгоритм кусочно-интервальной аппроксимации оптимальной эквивалентной характеристики ТЭЦ при работе турбин по тепловому графику.

2. С использованием встроенных функций множественной регрессии ППП MathCAD 2000 Pro получены полиномы первой и второй степеней для поверхностей каждого участка ОЭХ первой очереди МТЭЦ-3. Анализ оценок погрешности аппроксимации показал достаточность и возможность применения полиномов первой и второй степеней.

3. Обоснована необходимость создания программного обеспечения для реализации описанного выше алгоритма и автоматизированного подбора наилучшего полинома.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горнштейн В. М. Наивыгоднейшее распределение нагрузок между параллельно работающими электростанциями. – М.: Госэнергоиздат, 1949. – 256 с.
2. Методы оптимизации режимов энергосистем / Под ред. В. М. Горнштейна. – М.: Энергия, 1981. – 336 с.
3. Попова Ю. Б. Математическое и программное обеспечение для оптимизации режима ТЭЦ // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 6. – С. 79–87.
4. Пашенко А. В., Попова Ю. Б. Частные случаи оптимизации режимов работы ТЭЦ // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 6. – С. 81–87.
5. Романов А. В. Обработка экспериментальных данных: Учеб. пособие. – Мн.: Ротапринт БГПА, 2001.

Представлена кафедрой ПОВТ и АС

Поступила 26.09.2001