

**ОРГАНИЗАЦИЯ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА  
ПРИ СОПОСТАВЛЕНИИ ФАКТИЧЕСКИХ ТЕПЛОПOTЕРЬ  
С НОРМАТИВНЫМИ**

Докт. техн. наук БАЙРАШЕВСКИЙ Б. А., инж. БОРУШКО Н. П.

*РУП «БелГЭИ»*

Рассмотрим простейший случай описания режима работы теплосети, основанный на известных формулах расчета теплопотерь  $Q_T$  и отпуска теплоты в сеть  $Q_C$ . В качестве аргументов при выведении этих формул принимаем: температуры прямой  $t_n$  и обратной  $t_o$  сетевой воды; температурный напор  $\tau$  между обоими теплоносителями и окружающей средой с температурой  $t_{окр}$ ; виртуальные [1] значения поверхности  $S$  и длины  $L$  теплосети; обобщенный коэффициент теплопередачи  $K_n$  через теплоизоляцию теплосети с учетом упомянутых размеров  $S$  и  $L$ ; величину массовой утечки воды  $G_y$  и температуру холодной воды  $t_x$ , подаваемой в теплосеть для компенсации потерь:

$$Q_T = Q_n + Q_y, \quad (1)$$

где потери через теплоизоляцию  $Q_n$  и с утечками воды  $Q_y$  выразим следующим образом:

$$Q_n = K_n S \tau = q_l L; \quad (2)$$

$$\tau = 0,5(t_n + t_o) - t_{окр}; \quad (3)$$

$$Q_y = C G_y [0,5(t_n + t_{окр}) - t_x]. \quad (4)$$

На основании (1)–(4) получаем общую формулу расчета теплопотерь  $Q_T$  как функцию указанных выше аргументов

$$Q_T = K_n S [0,5(t_n + t_o) - t_{окр}] + C G_y [0,5(t_n + t_{окр}) - t_x]. \quad (5)$$

Отпуск теплоты в сеть с массовым расходом воды  $G_c$  выразим с помощью формулы

$$Q_C = C [G_c(t_n - t_o) + G_y(t_o - t_x)]. \quad (6)$$

Факторный анализ предусматривает сопоставление количественных оценок частных дифференциалов того или иного аргумента исследуемой функции по отношению к сумме их модулей. В общем виде это можно записать

$$\delta(\Delta_{\Pi_i} \Pi) = 100 d_{\Pi_i} \Pi / \Sigma [(d_{\Pi_i} \Pi)^2]^{0,5}, \quad (7)$$

где  $\Pi$  – исследуемая функция, определяемая рядом аргументов  $\Pi_i$ ;  $d_{\Pi_i} \Pi = (\partial \Pi / \partial \Pi_i) d \Pi_i$  – частный дифференциал функции  $\Pi$  по аргументу  $\Pi_i$ .

Полный дифференциал исследуемой функции  $\Pi$  записывается

$$\left. \begin{aligned} d\Pi &= (\partial \Pi / \partial \Pi_1) d\Pi_1 + (\partial \Pi / \partial \Pi_2) d\Pi_2 + \dots + (\partial \Pi / \partial \Pi_n) d\Pi_n = \\ &= \Sigma [(\partial \Pi / \partial \Pi_i) d\Pi_i] = d_{\Pi_1} \Pi + d_{\Pi_2} \Pi + \dots + d_{\Pi_n} \Pi = \Sigma d_{\Pi_i} \Pi. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Руководствуясь общим принципом (7), (8), аналогичный факторный анализ показателей  $Q_T$  и  $Q_C$  можно выполнить на основании формул (5) и (6), предварительно установив перечень независимых переменных.

Факторному анализу можно подвергнуть также показатели эффективности работы теплосетей в отношении использования утвержденных резервов экономии топлива согласно методике [2] и действующим инструкциям [3, 4]. Целесообразность реализации этого метода на практике не вызывает сомнений и играет большую роль в стимулировании работ, направленных на освоение резервов экономии топлива. Однако применение этого метода к интегральным показателям эффективности производства, например, таким, как удельные расходы топлива [3, 4] или теплопотери в сетях, следует считать ошибочным. В соответствии с (8) суммарное значение частных дифференциалов аргументов  $\Pi_i$ , т. е.  $\partial\Pi/\partial\Pi_i)d\Pi_i$ , а следовательно, и отклонение исследуемой функции  $d\Pi$ , может оказаться равным нулю за счет того, что одна группа слагаемых  $(\partial\Pi/\partial\Pi_i)d\Pi_i$  имеет знак «плюс», а другая – знак «минус». Поэтому учет влияния абсолютной величины каждого аргумента на изменение интегрального показателя  $d\Pi \approx \Delta\Pi$ , представленного в виде суммы абсолютных изменений определяющих его аргументов, вполне логичен и необходим.

Рассмотрим вариант применения факторного анализа при сопоставлении фактических и нормативных показателей режима работы теплосетей, основываясь на упомянутой методике [2–4]. Используемые в расчетах коэффициенты резервов экономии топлива адекватны соответствующим мероприятиям. Все показатели работы теплосетей разделим на три категории [3, 4] с дополнением в соответствующих формулах индексов  $k$ : фактические (инд.  $k = \phi$ ), номинальные (инд.  $k = н$ ) и нормативные (инд.  $k = нр$ ). В качестве независимых переменных (факторов), определяющих величину теплопотерь (инд.  $t$ )  $Q_{Tk}$ , согласно (5) принимаем следующие четыре фактора ( $\Pi_i$ , от  $i = 1$  до  $i = n = 4$ ):  $Q_{Tk} = f(t_{nk}, t_{ok}, K_{nk}, G_{yk})$ . Аналогично согласно (6) по расчету отпуска теплоты в сеть  $Q_{Ck}$  принимаем также четыре фактора  $\Pi_i$ :  $Q_{Ck} = f(t_{nk}, t_{ok}, G_c, G_{yk})$ . В соответствии с этими обозначениями [3, 4] для каждого  $i$ -го фактора  $\Pi_i$  запишем

$$\Pi_{iнр} = \Pi_{iн}[1 + R_i(1 - \mu_i)], \quad (9)$$

где коэффициент резерва  $i$ -го фактора при степени его освоения  $\mu_i = 0-1$ ;

$$R_i = \Pi_{i\phi}/\Pi_{iн} - 1. \quad (10)$$

На основании (6), (10) получаем расчетную формулу для определения отклонения фактических показателей  $\Pi_{i\phi}$  от нормативных  $\Pi_{iнр}$

$$\Delta\Pi_i = \Pi_{i\phi} - \Pi_{iнр} = R_i\Pi_{iн}\mu_i. \quad (11)$$

Теплопотери  $Q_T$  и отпуск теплоты в сеть  $Q_C$  по всем трем категориям в сетях, т. е.  $k = \phi$ ,  $k = н$ ,  $k = нр$ , определяются теми же расчетными формулами (1)–(6). Допуская, что в исследуемых интервалах  $d\Pi \approx \Delta\Pi$  и соответственно  $d\Pi_i \approx \Delta\Pi_i$ , функцию (5) рассмотрим как  $Q_{Tk} = f(t_{nk}, t_{ok}, K_{nk}, G_{yk})$  и функцию (6) – как  $Q_{Ck} = f(t_{nk}, t_{ok}, G_c, G_{yk})$ .

Частные дифференциалы функции  $Q_T$  определим как результаты отклонения фактических показателей аргументов от нормативных:

- по температурам прямой и обратной воды:

$$d_p Q_T = 0,5(t_{пф} - t_{пнр})(SK_{инр} + CG_{унр}); \quad (12)$$

$$d_o Q_T = 0,5(t_{оф} - t_{онр})(SK_{инр} + CG_{унр}); \quad (13)$$

- по величине утечек сетевой воды

$$d_y Q_T = C[0,5(t_{пнр} + t_{онр}) - t_x](G_{уф} - G_{унр}); \quad (14)$$

- по величине изменения коэффициента теплопередачи

$$d_K Q_T = S[0,5(t_{пнр} + t_{онр}) - t_{окр}](K_{иф} - K_{инр}). \quad (15)$$

Аналогично на основании (6) определяем частные дифференциалы функции  $Q_c$  как результаты отклонения фактических показателей аргументов от нормативных:

- по температурам прямой и обратной воды:

$$d_p Q_c = CG_{снр}(t_{пф} - t_{пнр}); \quad (16)$$

$$d_o Q_c = C(G_{унр} - G_{снр})(t_{оф} - t_{онр}); \quad (17)$$

- по величине изменения циркуляции сетевой воды

$$d_{Gц} Q_c = C(t_{пнр} - t_{онр})(G_{сф} - G_{снр}); \quad (18)$$

- по величине утечек сетевой воды

$$d_{Gy} Q_c = C(t_{онр} - t_x)(G_{уф} - G_{унр}). \quad (19)$$

На основании (9) по утвержденным значениям коэффициентов резерва  $R_i$  показателям степени их использования  $\mu_i$  и номинальным значениям исследуемых аргументов  $\Pi_{ин}$  определяем соответствующие нормативные показатели  $\Pi_{инр}$ . Таким образом согласно (7), (8) расчетные формулы (12)–(19) позволяют определить долевое участие каждого аргумента, влияющего на итоговый эффект от реализации утвержденных мероприятий по экономии топлива.

Следует отметить, что частные дифференциалы функции  $\Pi$ , а в данном случае  $Q_T$  и  $Q_c$ , следует использовать только при оценках относительных показателей  $\delta(\Delta_{\Pi_i} \Pi)$ , например (7). Исходим из того, что полное приращение функции  $\Pi = f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n)$ , т. е.  $\Delta \Pi = f[(\Pi_1 + \Delta \Pi_1), (\Pi_2 + \Delta \Pi_2), \dots, (\Pi_n + \Delta \Pi_n)] - f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n)$  не равно сумме ее частных приращений  $d_{\Pi_1} \Pi + d_{\Pi_2} \Pi + \dots + d_{\Pi_n} \Pi = \Sigma d_{\Pi_i} \Pi$ . Из этого следует, что суммарную экономию (–) или перерасход (+) фактических теплотерь  $Q_{тф}$  и отпуска теплоты  $Q_{сф}$  в сравнении с их нормативными значениями следует вычислять не по формуле (8), а по формулам, аналогичным (11):

$$\Delta Q_t = Q_{тф} - Q_{тнр}; \quad (20)$$

$$\Delta Q_{cr} = Q_{сф} - Q_{снр}. \quad (21)$$

Для оценок эффективности изоляции и уровня утечек воды целесообразно использовать следующие коэффициенты:

$$P_{и} = K_{иф}/K_{инр}; \quad (22)$$

$$P_{у} = G_{уф}/G_{унр}. \quad (23)$$

Теплосети в целом – по изоляции и утечкам

$$P_{тс} = (P_{и}Q_{иф} + P_{у}Q_{уф})(Q_{иф} + Q_{уф})^{-1}. \quad (24)$$

Практический интерес представляют фактические и нормативные значения плотностей тепловых потоков  $q_{и}$ , поступающих через изоляцию теплопроводов. Аналогично следует рассматривать условные плотности теплотерь  $q_{у}$  с утечками воды, а также плотности потоков теплоэнергии  $q_{F}$ , поступающей потребителю:

$$\left. \begin{aligned} q_{и} &= Q_{и}S^{-1}; \\ q_{у} &= Q_{у}S^{-1}; \\ q_{F} &= Q_{c}F^{-1}, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где  $S$  и  $F$  – виртуальная поверхность теплосетей и виртуальное сечение для прохода теплоносителя.

Рассмотренный вариант анализа сравнительной эффективности работы теплосетей основан на сопоставлении фактических и номинальных значений аргументов, определяющих тот или иной технологический процесс. В ряде случаев их значения устанавливаются путем либо расчетов, либо прямых измерений или на основании уравнений регрессии, базирующихся на статистической обработке опытных данных. В частности, значения температур прямой  $t_{п}$  и обратной  $t_{о}$  сетевой воды устанавливаются: фактические – путем измерений, а номинальные – с помощью утвержденных графиков. Аналогичным образом определяются фактические и номинальные значения утечек сетевой воды. Что касается коэффициентов теплопередачи через изоляцию теплосетей, то решение этой задачи требует существенных доработок. В настоящее время фактические теплотери определяются с учетом теплового баланса между теплоисточником и потребителем. В результате на основании (1)–(4) получаем расчетную формулу для нахождения фактических и номинальных значений коэффициентов теплопередачи в сети

$$K_{и} = \{Q_t - CG_y[0,5(t_{п} + t_{о}) - t_x]\}[0,5(t_{п} + t_{о}) - t_{окр}]^{-1}S^{-1}. \quad (26)$$

Величину номинального значения коэффициента теплопередачи можно вычислить также на основании виртуальных размеров теплосетей, т. е.

протяженности  $L$  и поверхности  $S$  по установленной номинальной плотности теплопотерь

$$K_{ин} = q_{ин}L(\tau_n S)^{-1}. \quad (27)$$

Одним из наиболее прецизионных методов расчета теплопотерь следует считать теплофизический метод [5, 6], основанный на физических характеристиках изоляции и реальных размерах теплопровода. Наряду с нормативными значениями теплопотерь он позволяет рассчитывать фактические теплопотери в сетях при условии достоверности исходной информации о состоянии теплопроводов.

Надежность и положительная результативность изложенного метода анализа эффективности работы теплосетей во многом определяются степенью достоверности исходных (отчетных) данных по значениям исследуемых аргументов. Как правило, среди них наибольшим сомнениям подвергается абсолютная величина фактических теплопотерь. Поэтому в процессе расчетов необходима организация соответствующего технологического контроля, на основании которого можно судить о степени достоверности выполненного анализа. В качестве контрольного показателя целесообразно использовать величину перепада температур обоих теплоносителей от входа до выхода:

$$\Delta t_{п} = t_{п}^{БХ} - t_{п}^{БЫХ}, \quad (28)$$

$$\Delta t_{о} = t_{о}^{БХ} - t_{о}^{БЫХ}. \quad (29)$$

Диапазон изменения фактических перепадов температур  $\Delta t_{п} = \Delta t_{пф}$  и  $\Delta t_{о} = \Delta t_{оф}$  хорошо известен в условиях эксплуатации. Поэтому явные отличия расчетных значений  $\Delta t_{п}$  и  $\Delta t_{о}$  от реально существующих могут оказаться достаточным признаком недостоверности тех или иных исходных данных и в первую очередь теплопотерь  $Q_{тф}$  и  $Q_{иф}$ , так как в отличие от остальных аргументов ( $t_{п}$ ,  $t_{о}$ ,  $G_y$  и  $G_c$ ) последние не определяются путем прямых измерений. В данном случае целесообразно сравнивать расчетные показатели  $\Delta t_{п}$  и  $\Delta t_{о}$  с аналогичными значениями  $\Delta t_{пн}$  и  $\Delta t_{он}$ , вычисленными на основании нормативных аргументов, учитываемых при определении коэффициентов резерва экономии топлива.

В целях упрощения задачи считаем, что утечки сетевой воды в прямой и обратной сетях одинаковы. В связи с этим контрольные формулы по расчетам перепадов температур  $\Delta t_{п}$  и  $\Delta t_{о}$  определим на основании уравнений тепловых балансов, составленных для прямой и обратной теплосетей таким образом:

- в прямой сети

$$C[G_c t_{п}^{БХ} - (G_c - 0,5G_y) t_{п}^{БЫХ}] = Q_{п}^{н}, \quad (30)$$

- в обратной сети

$$C[(G_c - 0,5G_y) t_{о}^{БХ} - (G_c - G_y) t_{о}^{БЫХ}] = Q_{о}^{н}, \quad (31)$$

где  $Q_{п}^{н}$ ,  $Q_{о}^{н}$  – теплопотери через поверхности изоляции в прямых и обратных трубопроводах.

Средние значения температур прямой и обратной сетевой воды

$$t_{п,о} = 0,5(t_{п,о}^{вх} + t_{п,о}^{вых}). \quad (32)$$

В результате совместного решения (28)–(32) находим:

$$\Delta t_{п} = (CG_y t_{п} + 2Q_{п}^n)(2G_c - 0,5G_y)^{-1} C^{-1}; \quad (33)$$

$$\Delta t_o = 2Q_o^n (2G_c - 0,5G_y)^{-1} C^{-1}. \quad (34)$$

Результаты теплофизических расчетов показывают, что различия между коэффициентами теплопередачи в прямых и обратных трубопроводах не существенные. Поэтому согласно уравнениям теплопередачи для трубопроводов прямой и обратной сетевой воды потери теплоты через теплоизоляцию (33), (34) можно вычислять следующим образом:

$$Q_{п,о}^n = K_{и} S_{п,о} (t_{п,о} - t_{окр}), \quad (35)$$

где  $K_{и}$  – коэффициент теплопередачи, вычисляемый по формуле (26),  $K_{и} = f(Q_{т}, t_{п}, t_o, t_x, t_{окр})$ ;  $S_{п,о}$  – поверхности трубопроводов прямой и обратной сетевой воды; в большинстве случаев  $S_{п} = S_o = 0,5S$ .

Из учета теплового баланса потерь теплоты через изоляцию трубопроводов и в соответствии с (1) имеем

$$Q_{т} = Q_{п} + Q_y = Q_{п}^n + Q_o^n + Q_y. \quad (36)$$

Следует отметить, что оценка контрольных показателей  $\Delta t_{п}$  и  $\Delta t_o$  по формулам (33) и (34) на основании нормативных аргументов и последующее сопоставление этих показателей, вычисленных по формулам (28), (29), гарантируют также эффективность работ по формированию плановых мероприятий, направленных на освоение имеющихся резервов.

## ВЫВОДЫ

1. Составлен перечень основных расчетных формул, рекомендуемых для всестороннего анализа расчетов при обработке отчетных показателей работы теплосети.

2. Рекомендуется факторный анализ эффективности работы теплосетей предусматривающий принцип учета и освоения резервов экономичности оборудования и способствующий повышению уровня его эксплуатации.

3. Предложен метод расчета степени охлаждения сетевой воды в теплосети как косвенный вариант оценки достоверности отчетных показателей по теплопотерям через изоляцию сетей, рекомендуемый для составления алгоритмов и программных расчетов по организации соответствующего анализа в условиях эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Байрашевский, Б. А. Оценка теплопотерь и эффективности работы теплосетей / Б. А. Байрашевский // Изв. АНБ, Сер. ФТН. – 2004. – № 4.

2. Г л е б о в, Э. С. Применение нормативов в системе планирования и экономическое стимулирование электроэнергетического производства / Э. С. Глебов // Энергетик. – 1989. – № 3.

3. П о р я д о к исчисления экономии топлива на электростанциях исходя из нормативных энергетических характеристик и фактических режимов работы оборудования. – М.: Союзтехэнерго, 1987.

4. П о л о ж е н и е о пересмотре (разработке) энергетических характеристик оборудования и порядке определения нормативных удельных расходов топлива на энергопредприятиях. П 34-70-012-87. – М.: Союзтехэнерго, 1987.

5. Б а й р а ш е в с к и й, Б. А. Анализ теплопотерь одиночного теплопровода / Б. А. Байрашевский, В. А. Седнин, С. И. Абражевич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 5.

6. Б а й р а ш е в с к и й, Б. А. Анализ теплопотерь двухтрубного теплопровода и тепло-сети в целом / Б. А. Байрашевский, В. А. Седнин, С. И. Абражевич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 6.

Поступила 1.09.2006

УДК 621.165

## **ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБИНЫ ПТ-35-90/10 ВИТЕБСКОЙ ТЭЦ**

**Канд. техн. наук ПОПОВА Ю. Б.**

*Белорусский национальный технический университет*

Основной характеристикой, определяющей экономичность работы теплофикационных турбин на различных режимах, является расходная (или энергетическая) характеристика – зависимость расхода теплоты  $Q_0$  на входе в турбогенератор от его нагрузок. В общем случае расход теплоты на входе в турбогенератор является функцией многих переменных – электрической мощности, нагрузок регулируемых отборов, параметров свежего пара и пара отборов, давления в конденсаторе, режима работы схемы регенерации и т. д. Поэтому построение энергетических характеристик теплофикационных турбин представляет собой сложную задачу. Сложность ее повышается при условии применения такой характеристики в задачах оптимизации. Решение таких задач в настоящее время является крайне актуальным, ведь оптимизация режимов работы ТЭЦ позволяет без дополнительных капитальных вложений достигать значительной экономии топливно-энергетических ресурсов.

К энергетическим характеристикам (ЭХ), используемым в задачах оптимизации, предъявляется ряд требований, которым они должны удовлетворять [1]:

- физическая реальность ЭХ, т. е. правильное отображение характера изменения  $Q_0$  при изменении нагрузки агрегата;
- достаточная точность ЭХ, поскольку всевозможные упрощения могут сгладить эффект оптимизации;