

Ф. А. СТОЯНОВ, д-р техн. наук, Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры,
С. Ю. АНДРЕЕВ, канд. техн. наук, КП «Харьковские тепловые сети»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОТОПИТЕЛЬНЫМИ КОТЕЛЬНОМИ

Розглядається задача оптимального управління водогрійною опалювальною котельнею і досліджується вплив різних втрат у системі теплопостачання на результати рішення цієї задачі.

The optimum control of heating boiler plant is considered. The influence of various losses in the heat supply system on the obtained results of this task resolving is researched.

Постановка проблемы. Работа посвящена актуальной проблеме экономии топливно-энергетических ресурсов за счет применения компьютерных технологий и исследованию влияния тепловых и гидравлических потерь в системе теплоснабжения на результаты решения задачи оптимального управления отопительной котельной. Эта задача ставится и реализуется как задача нелинейного математического программирования с предварительной аппроксимацией результатов экспериментальных исследований тепловых и гидравлических потерь энергии в системе теплоснабжения.

Анализ литературы. Решение аналогичной задачи рассматривалось в работе [1], однако там не учитывались гидравлические потери в котлах, а это может существенно повлиять на результаты решения оптимизационной задачи. Представленные же в настоящей работе исследования были проведены с учетом всех видов потерь на котельной.

Кроме того, в работах [2, 3 – 5] применялись сложные математические модели, позволяющие с высокой точностью оценить суммарные потери в системе. Однако, это существенно (на несколько часов) увеличивало время решения задачи оптимального управления отопительной котельной и делало невозможным использование полученных результатов решения в режиме реального времени.

Представленные в настоящей работе исследования лишены указанных недостатков. Они были проведены с учетом гидравлических потерь в котлах и с применением упрощенных моделей. При этом было показано, что точность решения оптимизационных задач практически не ухудшилась.

Рассматривалась одна из водогрейных отопительных котельных Харькова, состоящая из 6 котлов ПТВМ-100 и одного котла ПТВМ-200.

Цель работы. Для заданной текущей нагрузки на котельную $Q_k(t_{нв})$ найти оптимальное распределение этой нагрузки между отдельными i котлами Q_i ($i=\overline{1, n}$), обеспечивающее максимум осредненного по нагрузке коэффициента полезного действия $\bar{\eta}_k$. Здесь $t_{нв}$ – температура наружного воздуха, а n – количество котлов, установленных на котельной.

Математическая постановка задачи принимает следующий вид.

Найти

$$\max_{Q_i \in \Omega} \eta_k(Q_i), i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где область Ω определяется равенством

$$Q_k = \sum_{i=1}^n Q_i, i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

и неравенством

$$Q_{i,min} < Q_i < Q_{i,max}, \quad (3)$$

где $Q_{i,min}$ и $Q_{i,max}$ (МВт) – минимальные и максимальные допустимые значения нагрузок на каждый i -й котел.

Основные исходные данные: $Q_k, n, Q_{i,min}, Q_{i,max}$, а также зависимости $\eta_i(Q_i)$, где η_i – КПД i -го котла.

Величину осредненного КПД можно представить в виде

$$\bar{\eta}_k = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i(Q_i) \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}. \quad (4)$$

Обозначим $X = Q_1, Y = Q_2, Z = Q_3, U = Q_4, V = Q_5, W = Q_6, S = Q_7$.

Теперь преобразуем целевую функцию $\bar{\eta}_k$, исходя из того, что

$$\sum_{i=1}^7 Q_i = Q_k = const. \quad (5)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_k &= \bar{\eta}_k \cdot Q_k = \eta_1(X) \cdot X + \eta_2(Y) \cdot Y + \eta_3(Z) \cdot Z + \eta_4(U) \cdot U + \\ &+ \eta_5(V) \cdot V + \eta_6(W) \cdot W + \eta_7(S) \cdot S. \end{aligned} \quad (6)$$

Для нахождения аналитических зависимостей $\eta_1(X), \eta_2(Y), \eta_3(Z), \eta_4(U), \eta_5(V), \eta_6(W)$ и $\eta_7(S)$ экспериментальные данные, полученные в процессе пуско-наладочных испытаний, были аппроксимированы полиномом второго порядка. В результате были получены аппроксимационные зависимости для

двух вариантов расчетов. В первом случае учитывались только потери с уходящими газами. Тогда:

$$\begin{aligned}
 \eta_1(X) = f_1(X) &= 95,84 + 0,0202 \cdot X - 0,00088 \cdot X \cdot X; \\
 \eta_2(Y) = f_2(Y) &= 96,09 + 0,0223 \cdot Y - 0,000312 \cdot Y \cdot Y; \\
 \eta_3(Z) = f_3(Z) &= 94,84 + 0,0193 \cdot Z - 0,0086 \cdot Z \cdot Z; \\
 \eta_4(U) = f_4(U) &= 96,71 + 0,0169 \cdot U - 0,000598 \cdot U \cdot U; \\
 \eta_5(V) = f_5(V) &= 95,62 + 0,0291 \cdot V - 0,000943 \cdot V \cdot V; \\
 \eta_6(W) = f_6(W) &= 95,008 + 0,0136 \cdot W - 0,000385 \cdot W \cdot W; \\
 \eta_7(S) = f_7(S) &= 95,04 + 0,0062 \cdot S - 0,000135 \cdot S \cdot S,
 \end{aligned} \tag{7}$$

где X, Y, Z, U, V, W соответствуют котлам ПТВМ-100, а S – котлу ПТВМ-180. Подставим $f_1(X), f_1(Y), \dots, f_7(S)$ из (7) в (6). Тогда

$$\begin{aligned}
 \bar{\eta}_k &= X(95,84 + 0,0202X - 0,00088XX) + Y(96,09 + 0,0223Y - 0,000312YY) + \\
 &+ Z(94,84 + 0,0193Z - 0,0086ZZ) + U(96,71 + 0,0169U - 0,000598UU) + \\
 &+ V(95,62 + 0,0291V - 0,000943VV) + W(95,008 - 0,0136W - 0,000385WW) + \\
 &+ S(95,04 + 0,0062S - 0,000135SS).
 \end{aligned} \tag{8}$$

При решении оптимизационной задачи для оценки ограничений (3) были приняты следующие значения:

$$\text{ПТВМ-100: } Q_{i,\min} = 17 \text{ МВт, } i=1,6, \quad \bar{Q}_{i,\max} = 81 \text{ МВт};$$

$$\text{ПТВМ-180: } Q_{i,\min} = 31 \text{ МВт, } i=7, \quad \bar{Q}_{i,\max} = 150 \text{ МВт}.$$

Минимум функции (8) находим с применением методов нелинейного математического программирования. Результаты приведены в табл. 1 и на рисунке для различных значений тепловой нагрузки на котельную Q_k .

Анализируя результаты, представленные в табл. 1, можно сделать следующие выводы:

– по мере наращивания нагрузки на котельную Q_k в первую очередь следует задействовать котлы с наиболее высокими экономическими характеристиками;

– оптимальное распределение нагрузок между котлами также отвечает их экономическим характеристикам. Так, большие нагрузки, как правило, приходятся на котлы с лучшими экономическими характеристиками.

Таблица 1

Зависимость $Q_{i,\text{опт}}$, МВт, от общей нагрузки на котельную Q_k , МВт
(без учета гидравлических потерь)

| $Q_k \backslash Q_i$ | W | Z | S | V | X | Y | U | $\bar{\eta}$ | $\bar{\eta}_{k\max}$ |
|----------------------|---|---|----|-------|-------|-------|-------|--------------|----------------------|
| 90 | 0 | 0 | 0 | 20,04 | 19,08 | 25,41 | 25,46 | 8647 | 96,07 |
| 120 | 0 | 0 | 30 | 20,04 | 19,08 | 25,41 | 25,47 | 11500 | 95,83 |

Продолжение таблицы 1

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 150 | 0 | 0 | 30,08 | 28,1 | 26,9 | 32 | 31,9 | 14360 | 95,73 |
| 180 | 0 | 17 | 38,41 | 29,8 | 28,34 | 33,4 | 32,9 | 17204 | 95,57 |
| 210 | 17 | 17,4 | 45,53 | 31 | 29,7 | 34,7 | 34,6 | 20050 | 95,48 |
| 270 | 20,7 | 27,1 | 69,4 | 36,7 | 35,5 | 40,17 | 49,49 | 25711 | 95,2 |
| 330 | 31,4 | 34,83 | 87,65 | 42,33 | 41,25 | 45,84 | 46,7 | 31321 | 94,91 |
| 390 | 41,8 | 42,1 | 105,35 | 48,2 | 47,3 | 51,85 | 53,4 | 36868 | 94,53 |
| 450 | 52,04 | 49,15 | 122,7 | 54,2 | 53,42 | 58,07 | 60,42 | 42339 | 94,1 |
| 510 | 62,15 | 56,06 | 139,8 | 60,25 | 59,65 | 64,41 | 67,63 | 47719 | 93,57 |
| 550 | 69,12 | 60,8 | 150 | 64,48 | 64 | 68,9 | 72,7 | 51250 | 93,18 |
| 580 | 76,09 | 65,5 | 150 | 68,7 | 68,4 | 73,36 | 77,9 | 83858 | 92,85 |
| 610 | 81 | 71,28 | 150 | 74 | 73,8 | 78,9 | 81 | 56422 | 92,5 |
| 636 | 81 | 81 | 150 | 81 | 81 | 81 | 81 | 58582 | 92,11 |

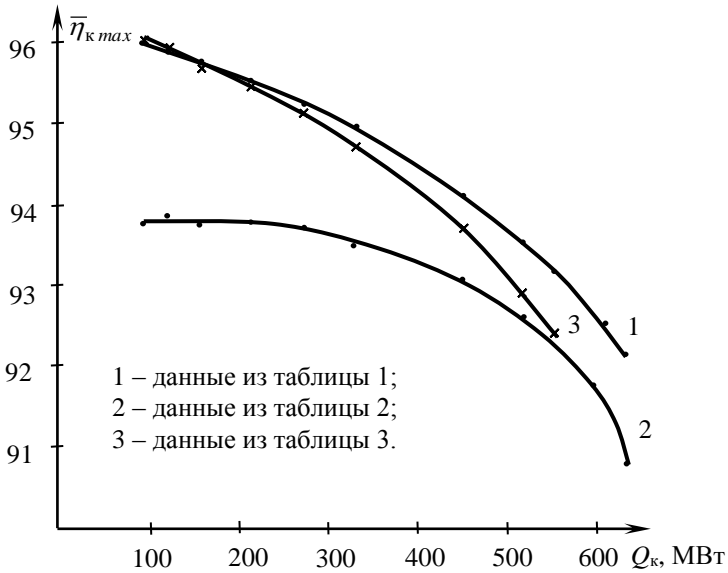


Рис. Зависимость $\bar{\eta}_{kmax}$ от Q_k , МВт

Далее рассмотрим решение оптимизационной задачи для варианта, в котором при расчете целевой функции учитывались потери с уходящими газами и гидравлические потери. В этом случае для оценки коэффициентов полезного действия η_i использовались, как и перед этим, результаты пусконаладочных испытаний, которые были аппроксимированы полиномом второго порядка:

$$\begin{aligned}
 \eta_1(X) = f_1(X) &= 90,91 + 0,1288 \cdot X - 0,00163 \cdot X \cdot X; \\
 \eta_2(Y) = f_2(Y) &= 91,13 + 0,133 \cdot Y - 0,00158 \cdot Y \cdot Y; \\
 \eta_3(Z) = f_3(Z) &= 90,15 + 0,182 \cdot Z - 0,002 \cdot Z \cdot Z; \\
 \eta_4(U) = f_4(U) &= 91,22 + 0,135 \cdot U - 0,00158 \cdot U \cdot U; \\
 \eta_5(V) = f_5(V) &= 91,83 + 0,00965 \cdot V - 0,00125 \cdot V \cdot V; \\
 \eta_6(W) = f_6(W) &= 91626 - 0600683 \cdot W - 06000958 \cdot W \cdot W; \\
 \eta_7(S) = f_7(S) &= 93,03 + 0,0249 \cdot S - 0,000194 \cdot S \cdot S.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Подставим $f_1(X), f_2(Y), \dots, f_7(S)$ из (7) в (6). Тогда

$$\begin{aligned}
 \bar{\eta}_k &= X(90,91 + 0,1288X - 0,00163XX) + Y(91,13 + 0,133Y - 0,00158YY) + \\
 &+ Z(90,15 + 0,182Z - 0,002ZZ) + U(91,22 + 0,135U - 0,00158UU) + \\
 &+ V(91,83 + 0,00965V - 0,00125VV) + W(91,26 - 0,00683W - 0,000958WW) + \\
 &+ S(93,03 + 0,0249S - 0,000194SS).
 \end{aligned}$$

Минимум этой функции определяем методом Нелдера-Мида [6 – 8]. Результаты решения приведены в табл. 2 и на рисунке для разных значений тепловой нагрузки на котельную. Аналогичное решение было получено для варианта, в котором учтены потери на дутьевые вентиляторы, гидравлические потери и отключен котел №1, т.е. $Q_1=W=0$. Эти результаты также приведены в табл. 3 и на рисунке.

Таблица 2

Зависимость $Q_{i, \text{отг}}$, МВт, от общей нагрузки на котельную Q_k , МВт
(с учетом гидравлических потерь)

| $\begin{matrix} Q_i \\ Q_k \end{matrix}$ | W | Z | S | V | X | Y | U | $\bar{\eta}$ | $\bar{\eta}_{k \text{max}}$ |
|--|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------------|-----------------------------|
| 90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 41,45 | 48,45 | 8439,5 | 93,77 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34,9 | 41,57 | 43,5 | 11270 | 93,91 |
| 150 | 0 | 0 | 0 | 31,4 | 35 | 40 | 42,69 | 14069 | 93,79 |
| 180 | 0 | 0 | 0 | 40,3 | 42,6 | 47,44 | 49,28 | 16878 | 93,76 |
| 210 | 0 | 0 | 55,6 | 34,9 | 34,3 | 41,6 | 43,53 | 19699 | 93,8 |
| 270 | 0 | 0 | 88,37 | 43,3 | 42,3 | 47,2 | 48,74 | 25313 | 93,75 |
| 330 | 0 | 41,67 | 94,16 | 47,36 | 45,22 | 50,1 | 51,47 | 30845 | 93,46 |
| 390 | 40,37 | 44,71 | 101,46 | 50 | 47,6 | 52,24 | 52,53 | 36389 | 93,3 |
| 450 | 51,58 | 51,43 | 119,61 | 56,9 | 53,6 | 57,8 | 58,96 | 41874 | 93,05 |
| 510 | 61,44 | 57,8 | 138,15 | 64,06 | 59,87 | 63,81 | 64,83 | 47260 | 92,66 |
| 540 | 66,16 | 60,92 | 147,47 | 67,67 | 63 | 66,9 | 67,85 | 49908 | 91,42 |
| 570 | 72,3 | 65,01 | 150 | 72,49 | 67,25 | 71,01 | 71,9 | 52518 | 92,14 |
| 600 | 78,86 | 69,43 | 150 | 77,44 | 71,88 | 75,58 | 76,45 | 55072 | 91,79 |
| 630 | 81 | 76,5 | 150 | 81 | 79,5 | 81 | 80,93 | 57556 | 91,36 |
| 636 | 81 | 81 | 150 | 81 | 81 | 81 | 81 | 58033 | 90,92 |

Таблица 3

Зависимость $Q_{i, \text{опт}}$, МВт, от общей нагрузки на котельную Q_k , МВт ($Q_1=W=0$)

| $Q_i \backslash Q_k$ | W | Z | S | V | X | Y | U | $\bar{\eta}$ | $\bar{\eta}_{k \max}$ |
|----------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-----------------------|
| 90 | 0 | 0 | 0 | 20,04 | 19,08 | 25,41 | 25,46 | 8647 | 96,07 |
| 120 | 0 | 0 | 30 | 20,04 | 19,08 | 25,41 | 25,47 | 11500 | 95,83 |
| 150 | 0 | 0 | 30,08 | 28,1 | 26,9 | 32 | 31,9 | 14360 | 95,73 |
| 180 | 0 | 17 | 38,41 | 29,8 | 28,34 | 33,4 | 32,9 | 17204 | 95,57 |
| 210 | 0 | 20 | 54 | 32,46 | 31,2 | 36 | 36,1 | 20049 | 95,48 |
| 270 | 0 | 30,44 | 77,17 | 34,01 | 37,8 | 42,5 | 43,02 | 25695 | 95,17 |
| 330 | 0 | 39,4 | 99,44 | 45,89 | 44,97 | 49,48 | 50,8 | 31273 | 94,77 |
| 390 | 0 | 48,05 | 120 | 53,24 | 52,4 | 57,06 | 59,26 | 36675 | 94,27 |
| 450 | 0 | 56,27 | 140,8 | 60,4 | 60 | 64,6 | 67,87 | 42151 | 93,67 |
| 510 | 0 | 68,4 | 150 | 70,19 | 68,85 | 74,42 | 78,15 | 47401 | 92,94 |
| 540 | 0 | 75 | 150 | 76,9 | 76,1 | 81 | 81 | 49944 | 92,49 |
| 555 | 0 | 81 | 150 | 81 | 81 | 81 | 81 | 51180 | 92,27 |

Выводы: 1. Расчеты, приведенные для вариантов с учетом и без учета гидравлических потерь и потерь на дутьевые вентиляторы, заметно отличаются. Как и следовало ожидать, в первом случае включение каждого последующего котла (по мере роста нагрузки Q_k), запаздывает по сравнению со вторым. Это объясняется резким увеличением потерь на дутьевые вентиляторы и гидравлических потерь (при включении каждого нового котла) в первом случае. Таким образом, результаты расчетов, приведенные в [1], где указанные выше потери не учитывались, могут быть применены только как первое приближение в решении оптимизационной задачи управления отопительной котельной. 2. Эффективность работы котельной при семи работающих котлах существенно выше, чем при шести (рисунок, кривые 1 и 3). Это объясняется наличием возможности (в первом случае) приблизить нагрузку на котел Q_i к величине, обеспечивающий его максимальный КПД.

Список литературы: 1. Лысак Л. В. Выбор рациональных нагрузок пиковых водогрейных котлов теплофикационной системы // Коммунальное хозяйство городов: Респ. межвед. н.-т. сб. – К.: Техніка. – 2001. – № 33. – С. 178 – 182. 2. Федоров А. П. Исследование влияния места подмешивания теплоносителя на экономическую эффективность отопительной системы в целом // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДГУБіА, ХОТВАБУ. – 1999. – №6. – С. 154 – 159. 3. Федоров А. П. Выбор оптимальных величин режимных характеристик магистрального теплопровода // Коммунальное хозяйство городов: Респ. межвед. н.-т. сб. – К.: Техніка. – 1999. – №18. – С. 133 – 137. 4. Федоров А. П., Андреев С. Ю. Оптимальное управление отопительной системой независимого типа // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДГУБіА, ХОТВАБУ. – 2000. – №10. – С. 120 – 123. 5. Андреев С. Ю. Рациональные методы реконструкции городских систем теплоснабжения. – Коммунальное хозяйство городов: Респ. межвед. н.-т. сб. – К.: Техніка. – 2001. – №27. – С. 216 – 222. 6. Стоянов Ф. А. Оптимальное автоматизированное проектирование проточных частей осевых турбин. – К.: Наук. думка, 1989. – 176 с. 7. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с. 8. Геминтерн В. Н., Каган Б. Н. Методы оптимального проектирования. – М.: Энергия, 1980. – 158 с.

Поступила в редакцию 25.09.2004