

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ, РАБОТАЮЩИХ СОВМЕСТНО

Рассмотрена задача оптимального распределения тепловых нагрузок по нескольким совместно работающим тепловым насосам (ТН) теплонасосных станций (ТНС) с целью получения минимума суммарного потребления приводной энергии. Показано, что равномерное распределение тепловых нагрузок обеспечивает незначительное отклонение от точного решения задачи, определенного при различных способах задания коэффициентов эффективности отдельных тепловых насосов, что позволяет рекомендовать такое распределение на практике.

Ключевые слова: тепловой насос, теплонасосная станция, маневренные ТЭЦ, потребители-регуляторы.

Одним из наиболее перспективных направлений развития энергетики в мире за последние 30 лет является использование тепловых насосов [1].

В настоящее время известно множество теплонасосных станций (ТНС), работающих в системах теплоснабжения и содержащих тепловые насосы, работающие совместно. Среди них можно отметить ТНС в городах Бурленге (24 МВт), Умеа (34 МВт), Эребру (40 МВт), Стокгольме (320 МВт) [1].

Эффективно использование ТН в качестве утилизаторов сбросной теплоты на промышленных предприятиях, в особенности на ТЭЦ [2–4]. На современной ТЭЦ имеется много источников низкотемпературной теплоты (ИНТ) высокой мощности, таких как теплота уходящих газов, системы охлаждения генераторов и конденсаторов, устройства охлаждения маслосистемы и др. Использование тепла уходящих газов удобно сочетается с проведением «мокрой» очистки дымовых газов от вредных газов и твердых частиц. Примером такого подхода является, в частности, ТЭЦ Dava (Швеция, г. Умеа) [5,6], где успешно работает система теплонасосной утилизации теплоты дымовых газов мусоросжигательных паровых

котлов совместно с системой комплексной газоочистки, что приводит к увеличению коэффициента использования топлива (КИТ) на ТЭЦ на 15–20% [5–8].

В настоящей статье излагается решение задачи оптимального подбора тепловой мощности нескольких однотипных ТН, установленных на ТНС, так, чтобы их суммарная потребляемая приводная мощность (далее электрическая) была минимальной.

Сразу следует отметить, что последовательное подключение конденсаторов n , совместно работающих ТН по нагреваемому теплоносителю, более выгодно, чем параллельное, поскольку $n-1$ ТН будут работать при этом при меньших температурах конденсации хладагента, чем при параллельном подключении, что потребует и меньших затрат мощности на привод компрессоров.

Тепловая мощность Q , выделяемая в конденсаторах каждого ТН, определяется выражением:

$$Q = GC(T_{ВЫХ} - T_{ВХ}), \quad (1)$$

где G – поток воды через конденсатор, C – теплоемкость воды, $T_{ВЫХ}$ – температура потока воды на выходе конденсатора, $T_{ВХ}$ – температура воды на входе конденсатора. При этом

коэффициент преобразования ТН μ записывается различными способами. Рассмотрим вначале самое простое его представление в виде:

$$\mu = \frac{T_{ВЫХ}}{T_{ВЫХ} - T_{И}} \xi, \quad (2)$$

где $T_{ВЫХ}$ – температура воды на выходе из конденсатора ТН, $T_{И}$ – температура в испарителе, ξ – коэффициент эффективности однотипных ТН, принимаемый далее постоянным. Коэффициент эффективности представляет собой отношение реального коэффициента трансформации к коэффициенту трансформации идеального теплового насоса с температурой в конденсаторе, равной температуре воды на выходе из конденсатора реального ТН, т.е. с нулевым недогревом.

При этом электрическая мощность, потребляемая ТН, составит:

$$N = Q / \mu = \frac{GC(T_{ВЫХ} - T_{ВХ})(T_{ВЫХ} - T_{И})}{\xi T_{ВЫХ}}. \quad (3)$$

При принятых обозначениях постановка задачи запишется следующим образом. Необходимо найти распределение мощностей Q_k тепловых насосов, работающих совместно, где $k=1,2,\dots,n$ – текущий номер ТН, минимизирующее суммарную потребляемую электрическую мощность:

$$N = \sum_{k=1}^n N_k \rightarrow \min, \quad (4)$$

при условии постоянства суммарной тепловой мощности:

$$Q = \sum_{k=1}^n Q_k = GC(T_{ВЫХ} - T_{ВХ}) = \text{const}. \quad (5)$$

Рассмотрим вначале аналитическое решение задачи для двух ТН ($n=2$). При включении их описанным выше образом потребляемая ими мощность будет определяться выражениями:

$$N_1 = \frac{GC(T_{ПР} - T_{ВХ})(T_{ПР} - T_{И})}{\xi T_{ПР}}, \quad (6)$$

$$N_2 = \frac{GC(T_{ВЫХ} - T_{ПР})(T_{ВЫХ} - T_{И})}{\xi T_{ВЫХ}}, \quad (7)$$

где $T_{ПР}$ – температура на выходе из конденсатора первого ТН, подлежащая определению с целью оптимизации, $T_{ВЫХ}$ – температура выхо-

да из второго ТН, $T_{ВХ}$ – температура входа в первый ТН.

Введем обозначение $T_{ПР} = T_{ВХ} + a(T_{ВЫХ} - T_{ВХ})$, где параметр $a \in (0;1)$, а $N = AF$, где

$$A = \frac{GC}{\xi}, \quad \text{а } F \text{ определяется выражением:}$$

$$F = \left\{ \frac{(aT_{ВЫХ} - aT_{ВХ})[aT_{ВЫХ} + (1-a)T_{ВХ} - T_{И}]}{T_{ПР}} + \frac{(1-a)(T_{ВЫХ} - T_{ВХ})(T_{ВЫХ} - T_{И})}{T_{ВЫХ}} \right\}. \quad (8)$$

При большом количестве последовательно соединенных ТН ($n \rightarrow \infty$) степень нагрева воды в каждых двух соседних тепловых насосах пренебрежимо мала по сравнению с абсолютной температурой нагретой воды. При этом можно приближенно считать, что для каждых двух соседних ТН справедливо соотношение:

$$\frac{1}{T_{ПР}} \approx \frac{1}{T_{ВЫХ}}. \quad (9)$$

Тогда искомым минимумом соответствует минимуму следующего выражения:

$$FT_{ВЫХ} = \left\{ (aT_{ВЫХ} - aT_{ВХ})[aT_{ВЫХ} + (1-a)T_{ВХ} - T_{И}] + (1-a)(T_{ВЫХ} - T_{ВХ}) \times (T_{ВЫХ} - T_{И}) \right\} = (a^2 T_{ВЫХ}^2 + aT_{ВХ}T_{ВЫХ} - a^2 T_{ВХ}T_{ВЫХ} - aT_{ВЫХ}T_{И} - a^2 T_{ВХ}T_{ВЫХ} - aT_{ВХ}^2 + a^2 T_{ВХ}^2 + aT_{ВХ}T_{И} + T_{ВЫХ}^2 - T_{ВЫХ}T_{И} - aT_{ВЫХ}^2 + aT_{ВЫХ}T_{И} - T_{ВХ}T_{ВЫХ} + T_{ВХ}T_{И} + aT_{ВХ}T_{ВЫХ} - aT_{ВЫХ}T_{И}). \quad (10)$$

Условием минимума последнего выражения, как известно, является равенство производной нулю, записанное ниже:

$$\frac{d(FT_{ВЫХ})}{da} = 2aT_{ВЫХ}^2 + 2T_{ВЫХ}T_{ВХ} - 4aT_{ВЫХ}T_{ВХ} - T_{ВХ}^2 + 2aT_{ВХ}^2 - T_{ВЫХ}^2 = 0. \quad (11)$$

Данное условие удовлетворяется при $a=0,5$ вне зависимости от значений $T_{ВХ}$ и $T_{ВЫХ}$. Это означает, что для двух любых последовательно

соединенных ТН, а значит и для всей совокупности (всегда можно выбрать три последовательно включенных тепловых насоса, из которых один принадлежит первой и второй паре), условие минимума потребляемой электрической мощности имеет вид:

$$T_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2}. \quad (12)$$

Отсюда следует, что тепловые мощности ТН в соответствии с (1) должны быть равны ($Q_k = \text{const}$), и это условие распространяется на все совместно работающие ТН. При этом оптимальная промежуточная температура двух соседних ТН определяется как среднее арифметическое от их общих температур входа и выхода. Исходя из этого, с учётом соотношений (1) – (3), определим соотношение потребляемых мощностей n , включенных описанным выше образом ТН по отношению к одному работающему ТН:

$$\begin{aligned} N_k / N_1' &= \\ &= \frac{(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}) \left[T_{\text{вх}} + \frac{k(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})}{n} - T_{\text{и}} \right]}{n \left[T_{\text{вх}} + \frac{k(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})}{n} \right]} / \\ & / \frac{(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})(T_{\text{вых}} - T_{\text{и}})}{T_{\text{вых}}} = \\ &= \frac{T_{\text{вых}} \left(1 - \frac{nT_{\text{и}}}{T_{\text{вх}}(n-k) + kT_{\text{вых}}} \right)}{n(T_{\text{вых}} - T_{\text{и}})}. \end{aligned} \quad (13)$$

При этом среднее значение коэффициента преобразования группы из n совместно работающих ТН одинаковой мощности определяется выражением:

$$\mu_n = \frac{\sum_{k=1}^n Q_k}{\sum_{k=1}^n \mu_k} = \frac{n}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{\mu_k}}, \quad (14)$$

т.е. равно среднегармоническому коэффициенту преобразования ТН, нагруженных равномерно.

Выражение (14) справедливо при подключении конденсаторов ТН последовательно, что и рассматривается в данной статье, а $T_{\text{и}}$ может быть любым, откуда следует, что это выражение справедливо для ТН, работающих от различных ИНТ.

В табл. 1 приведены значения соотношений N_k/N_1' для $n = 2-7$ и суммарное относительное потребление мощности совместно работающих ТН при среднеарифметическом распределении промежуточных температур при $T_{\text{вх}}=313$ К, $T_{\text{вых}}=333$ К и $T_{\text{и}}=303$ К.

Полученные зависимости были определены с учётом допущения (9), точное решение данной задачи, при конечном количестве ТН и отмеченных выше допущениях, приводится ниже, при этом для двух ТН можно записать:

$$N_1 + N_2 = \frac{GC}{\xi} \left[(T_{\text{пр}} - T_{\text{вх}}) \left(1 - \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{пр}}} \right) + \right.$$

Таблица 1 – Относительная нагрузка тепловых насосов ТНС при среднеарифметическом распределении промежуточных температур

| Количество ТН в ТНС | Последовательный номер теплового насоса ТНС | | | | | | | ТНС в целом |
|---------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 2 | 0,3437 | 0,5000 | | | | | | 0,8437 |
| 3 | 0,1929 | 0,2646 | 0,3333 | | | | | 0,7908 |
| 4 | 0,1309 | 0,1718 | 0,2115 | 0,2500 | | | | 0,7642 |
| 5 | 0,0980 | 0,1245 | 0,1503 | 0,1754 | 0,2000 | | | 0,7482 |
| 6 | 0,0780 | 0,0965 | 0,1146 | 0,1323 | 0,1496 | 0,1667 | | 0,7377 |
| 7 | 0,0645 | 0,0782 | 0,0916 | 0,1047 | 0,1177 | 0,1304 | 0,1429 | 0,7300 |

$$\begin{aligned}
 & + (T_{ВЫХ} - T_{ПП}) \left(1 - \frac{T_{И}}{T_{ВЫХ}} \right) \Big] = \quad (15) \\
 & = \frac{GC}{\xi} \left\{ T_{ВЫХ} - T_{ВХ} - T_{И} \left[2 - \left(\frac{T_{ВХ}}{T_{ПП}} + \frac{T_{ПП}}{T_{ВЫХ}} \right) \right] \right\}.
 \end{aligned}$$

Производная последнего выражения по $T_{ПП}$ даёт следующую зависимость:

$$-\frac{T_{ВХ}}{T_{ПП}^2} + \frac{1}{T_{ВЫХ}} = 0, \quad (16)$$

откуда

$$\frac{T_{ВХ}}{T_{ПП}} = \frac{T_{ПП}}{T_{ВЫХ}}, \quad (17)$$

или

$$T_{ПП} = \sqrt{T_{ВХ} T_{ВЫХ}}. \quad (18)$$

Таким образом, из последнего выражения можно сделать вывод, что при точном решении задачи исходя из зависимостей (1) – (3) оптимальная промежуточная температура двух соседних ТН определяется как среднегеометрическое от их общих температур входа и выхода. Распространяя полученный результат на n ТН, работающих совместно, получим для k -го ТН следующее выражение, аналогичное соотношению (13):

$$\begin{aligned}
 N_k / N_1' &= \\
 &= \frac{\left[1 - \left(\frac{T_{ВЫХ}}{T_{ВХ}} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \left[\left(\frac{T_{ВЫХ}}{T_{ВХ}} \right)^{\frac{k}{n}} - \frac{T_{И}}{T_{ВХ}} \right]}{\left(\frac{T_{ВЫХ}}{T_{ВХ}} - 1 \right) \left(1 - \frac{T_{И}}{T_{ВЫХ}} \right)}. \quad (19)
 \end{aligned}$$

В табл. 2 приведены значения соотношений N_k/N_1' для $n = 2-7$ и суммарное относительное потребление мощности совместно работающих ТН при среднегеометрическом распределении промежуточных температур и при таких же значениях исходных параметров ТН, что и при среднеарифметическом распределении промежуточных температур.

Отклонения приближенных значений параметров в табл. 1 по отношению к оптимальным значениям, представленным в табл. 2, отличаются на тысячные доли процента (отклонения в пятой значащей цифре последнего столбца).

Выше был произведен теоретический анализ оптимального распределения нагрузок идеальных ТН, работающих совместно. Представляет интерес проверить полученные результаты на реальных ТН с численным расчетом их характеристик.

Ниже приводится анализ ТН, работающих совместно, с характеристиками, соответствующими

Таблица 2 – Относительная загрузка тепловых насосов ТНС при среднегеометрическом распределении промежуточных температур

| Количество ТН в ТНС | Последовательный номер теплового насоса ТНС | | | | | | | ТНС в целом |
|---------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 2 | 0,3359 | 0,5077 | | | | | | 0,8436 |
| 3 | 0,1875 | 0,2631 | 0,3402 | | | | | 0,7908 |
| 4 | 0,1269 | 0,1692 | 0,2122 | 0,2558 | | | | 0,7642 |
| 5 | 0,0950 | 0,1220 | 0,1493 | 0,1770 | 0,2050 | | | 0,7482 |
| 6 | 0,0755 | 0,0942 | 0,1131 | 0,1322 | 0,1515 | 0,1710 | | 0,7376 |
| 7 | 0,0625 | 0,0762 | 0,0901 | 0,1040 | 0,1181 | 0,1323 | 0,1467 | 0,7299 |

Таблица 3 – Относительная загрузка тепловых насосов ТНС при оптимальном распределении промежуточных температур и численном расчете их характеристик

| Количество ТН в ТНС | Последовательный номер теплового насоса ТНС | | | | | | | ТНС в целом |
|---------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 2 | 0,3761 | 0,4906 | | | | | | 0,8667 |
| 3 | 0,2224 | 0,2755 | 0,3250 | | | | | 0,8229 |
| 4 | 0,1562 | 0,1865 | 0,2155 | 0,2429 | | | | 0,8011 |
| 5 | 0,1198 | 0,1394 | 0,1583 | 0,1766 | 0,1940 | | | 0,7881 |
| 6 | 0,0970 | 0,1106 | 0,1240 | 0,1369 | 0,1494 | 0,1615 | | 0,7794 |
| 7 | 0,0808 | 0,0910 | 0,1010 | 0,1108 | 0,1205 | 0,1300 | 0,1391 | 0,7732 |

Таблица 4 – Отклонение нагрузок тепловых насосов ТНС при равномерном распределении промежуточных температур от оптимальных при численном расчете характеристик ТН, %

| Количество ТН в ТНС | Последовательный номер теплового насоса ТНС | | | | | | | ТНС в целом |
|---------------------|---|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 2 | -2,49 | 1,92 | | | | | | 0,005 |
| 3 | -2,77 | -0,784 | 2,573 | | | | | 0,004 |
| 4 | -2,82 | -1,66 | 0,222 | 2,90 | | | | 0,003 |
| 5 | -2,81 | -2,052 | -0,826 | 0,876 | 3,099 | | | 0,003 |
| 6 | -2,8 | -2,25 | -1,39 | -0,195 | 1,33 | 3,23 | | 0,002 |
| 7 | -2,14 | -1,86 | -1,38 | -0,71 | 0,181 | 1,297 | 2,668 | 0,002 |

щими ТН Unitop 50 при работе на хладагенте R134 с отмеченными выше входными данными, при этом коэффициент преобразования μ определялся из термодинамического расчета ТН с использованием программного комплекса RefProp 7 (автор Eric W. Lemmon).

Оптимальные значения рассматриваемых параметров, рассчитанные численными методами для отмеченных выше реальных ТН, и полученные с использованием средств нелинейной оптимизации, представлены в табл. 3.

Сравнение полученных данных позволяет сделать вывод о том, что в данном случае равномерное распределение мощностей ТН, работающих совместно, дает решение ближе к оптимальному, чем то, которое соответствует

среднегеометрическому распределению промежуточных температур. Это объясняется тем, что при оптимальном распределении нагрузок мощности ТН уменьшаются с увеличением номера ТН, при среднегеометрическом – наоборот увеличиваются, а при равномерном – значение электропотребления ТНС находится где-то посередине электропотребления двух отмеченных выше распределений ТН в каскаде.

В заключение определим относительное увеличение электрической мощности, потребляемой ТНС по отношению к оптимальной, при равномерном распределении нагрузок, представленное в табл. 4.

В данном случае при использовании характеристик реального ТН с численным расчетом

их параметров получаем тот же результат – отклонение суммарного потребления ТН, работающих совместно, при равномерном распределении их нагрузок, не превышает тысячных долей процента от потребления при оптимальном распределении нагрузок ТН.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что для минимизации электрической мощности, потребляемой группой ТН, работающих совместно, их конденсаторы должны быть включены последовательно, а испарители – параллельно.

2. Показано, что нагрузки отдельных ТН в каскаде могут отличаться от равномерных на величину до 3,3% при различных способах оптимизации их распределения. Однако суммарное потребление электроэнергии каскадом ТН при равномерном распределении их нагрузок и оптимальном при разных способах расчета коэффициентов преобразования ТН различаются не более чем на тысячные доли процента.

1. *Мальований М.С., Берлінг О.Ю.* Світовий досвід, переваги та недоліки застосування теплових насосів у теплоенергетиці України // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Енергетика та електротехніка. – 2012. – №3. – С. 89–94.

2. *Овсянник А.В., Мацко И.И., Бобович С.О.* О целесообразности использования теплонасосных установок в технологическом цикле ТЭЦ на примере Гомельской ТЭЦ-2 // Энергия и Менеджмент. – Минск, 2009. – №3. – С. 16–19.

3. *Швец М.Ю.* Оптимізація сумісної експлуатації Київської ТЕЦ-6 та теплових насосів, що використовують її скидну теплоту. Розв'язок задачі // Відновлювальна енергетика. – 2013. – №4. – С. 69–74.

4. *Дубовський С.В., Левчук А.П., Каденський М.Я.* Підвищення маневрених можливостей енергетичної системи шляхом впровадження теплових насосів-регуляторів у складі ТЕЦ // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – Вип. 4(35). – С. 16–23.

5. <http://www.umeaenergi.se>

6. *Large-scale Heat Pumps for Swedish Municipal Incineration Plant/European Heat Pump News.* The Newsletter of the European Heat Pump Concerted Action. -Issue 2, August 1999. – P.6–7. (Umea, Sweden)

7. *Патент України № 104217 МПК (2013.01) H02J 15/00, H02J 3/06 (2006.01), F01K 7/00.* Теплоелектроцентральної, спосіб її експлуатації, об'єднана енергосистема та спосіб її експлуатації / С.В. Дубовський, А.П. Левчук, М.М. Кулик, власник – Інститут загальної енергетики Академії наук України. – Заявл. 20.04.2012, опубл. 10.01.2014, бюл. № 1/2014.

8. *Промышленные тепловые насосы* S c a n s o o l . <http://www.realenergo.com.ua/promyshlennye-teplovye-nasosy-scancool>

Надійшла до редколегії 21.11.2014