

периментально, оскільки ці методики в основному розглядають теплоенергетичні установки великої потужності, а в системах тепlopостачання останнім часом поширюються автономні джерела теплової енергії малої потужності.

1. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В. Малая энергетика. Состояние разработок и перспективы их развития в Институте технической теплофизики НАН Украины // Промышленная теплотехника. – 1997. – № 6. – С.84-90.

2. Арский Ю.М. Обз. инф. Экологическая экспертиза // ВИНТИ. – 1992. – № 1. – 80 с.

3. Кривоногов Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды. – Л.: Недра, 1986. – 280 с.

4. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами / Государственный комитет по гидрометеорологии и контролю природной среды. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1986. – 183 с.

5. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. – К.: Міністерство палива і енергетики, 2002. – 44 с.

Отримано 18.11.2005

УДК 697.34

С.Ю.АНДРЕЕВ, канд. техн. наук

Коммунальное предприятие «Харьковские тепловые сети»

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТРАНСПОРТНОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Рассматриваются переходные тепловые процессы в системе теплоснабжения (СТ) при ступенчатом изменении нагрузки на котельную. Предлагаются методы оптимального управления СТ с учетом этих процессов.

Работа посвящена актуальной тематике экономии топливно-энергетических ресурсов за счет применения современных компьютерных технологий управления сложными техническими системами. Рассматривается система теплоснабжения (СТ) зависимого типа, упрощенная схема которой приведена на рис.1.

СТ состоит из:

- отопительной котельной, на которой установлены i котлов ПТВМ-100 ($i=1,7$) с различными экономическими характеристиками;
- тепловой сети, в состав которой входят k участков трубопроводов ($k=0,4$);
- трех отапливаемых районов (ОР).

Задачи оптимального управления системой такого типа исследовались в работах [1-3], однако в них не учитывалось влияние транспортного запаздывания при ступенчатом изменении нагрузки на коте-

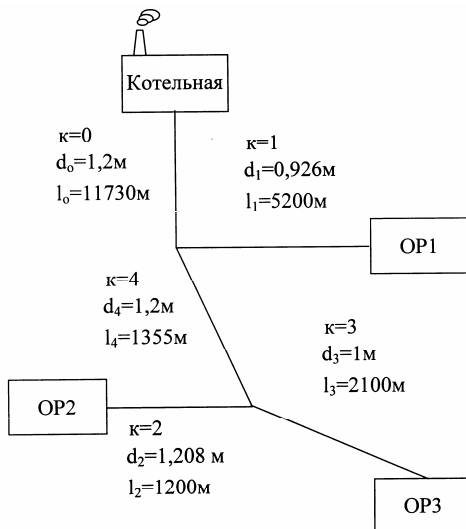


Рис.1 – Схема СТ

льную (ΔQ), вызванном изменением температуры наружного воздуха $\Delta t_{\text{нв}}$. В связи с этим в настоящей работе были поставлены и решены две взаимосвязанные задачи оптимального проектирования и управления. Одна из них – задача оптимального проектирования тепловых сетей, цель которой – найти значения диаметров теплопроводов d_{κ} (и соответствующих им Γ_{κ} – номеров трубопроводов из номенклатурного ряда, где каждому Γ_{κ} соответствует определенный d_{κ} , $\kappa=\overline{0,4}$), обеспечивающие минимум стоимости 1 МДж суммарных потерь энергии (\bar{N} , грн./МДж), рассчитанной за отопительный сезон, и одинаковое время транспортного запаздывания для всех ОР. Выполнение последнего условия обеспечивает отсутствие теплового разрегулирования СТ в ходе протекания переходных процессов, вызванных ступенчатым изменением нагрузки. Вычислив оптимальные значения диаметров трубопроводов тепловых сетей (ТС) при заданных величинах расхода теплоносителя в ее участках, несложно рассчитать время транспортного запаздывания ($T_0/2$), а далее перейти к решению второй задачи – к расчету общей нагрузки на котельную, обеспечивающей комфортное состояние в ОР ($Q_{\text{комф}}^T$, МВт) во время протекания пере-

ходных процессов, и к распределению этой нагрузки между отдельными котлами таким образом, чтобы стоимость 1 МДж производимой энергии (Н, грн./МДж) для заданной текущей нагрузки на котельную была минимальной.

Математическая постановка первой задачи (задачи оптимального проектирования) принимает следующий вид.

Найти

$$\min_{d_k \in \Omega} \bar{N}(d_k), k = \overline{0,4}, \quad (1)$$

где область Ω определена соотношениями, выполнение которых обеспечивает равенство величины транспортного запаздывания $T_0/2$ для всех объектов СТ. Здесь T_0 – время оборота теплоносителя в системе.

Решение задачи реализуется на двух иерархических уровнях.

На первом иерархическом уровне рассчитываются значения диаметров d_k , входящие в область Ω . Исходными данными для решения этой задачи служат длины участков $l_0=11730$ м, $l_1=5200$ м, $l_2=1200$ м, $l_3=2100$ м, $l_4=1355$ м и расходы теплоносителя в них G_k , где G_k – расходы теплоносителя в k -м трубопроводе ($k=\overline{0,4}$).

Чтобы обеспечить равенство величин T_0 для разных ОР, необходимо выполнение следующих соотношений:

$$\tau_0 + \tau_1 = \tau_0 + \tau_4 + \tau_2 = \tau_0 + \tau_4 + \tau_3, \quad (2)$$

где $\tau_k, k = \overline{0,4}$ – время прохождения теплоносителя через k -й участок трубопровода.

Далее, задавшись величинами диаметров участков трубопроводов d_k и принимая заданные исходные данные, несложно определить величины $\tau_0 \div \tau_4$, а варьируя d_k , найти такие их комбинации, которые обеспечивают выполнение условия (2) и, следовательно, принадлежащие области Ω .

Далее решается задача второго иерархического уровня, где из области Ω выбираются комбинации значений d_k , при которых целевая функция \bar{N} достигает минимума. В процессе поиска оптимального значения применялись методы нелинейного математического программирования.

В результате решения задачи были получены оптимальные значе-

ния $d_0^{\text{опт}} = 1,2 \text{ м}$ ($r_0 = 20$); $d_1^{\text{опт}} = 0,926 \text{ м}$ ($r_1 = 18$); $d_2^{\text{опт}} = 1,208 \text{ м}$ ($r_2 = 20$); $d_3^{\text{опт}} = 1 \text{ м}$ ($r_3 = 18$); $d_4^{\text{опт}} = 1,2 \text{ м}$ ($r_4 = 20$).

Зная величины расходов теплоносителя G_K в трубопроводах и их диаметры, несложно рассчитать период оборота теплоносителя в сети T_0 . В рассматриваемом случае $T_0 \approx 4,3$ часа.

Вторая задача (задача оптимального управления) также реализуется на двух иерархических уровнях. На первом уровне рассчитывается величина общей нагрузки на котельную $Q_{\text{комф}}^T$, необходимая для обеспечения комфортных условий в ОР в течение периода регулирования T с учетом переходного процесса, вызванного ступенчатым изменением нагрузки. Характер этого переходного процесса показан на рис.2, 3 для исходных данных, приведенных в файле «init» на рис.4.

Расчет переходного процесса в отопительной системе

τ , час	t_1^{var} , $^{\circ}\text{C}$	t_2^{var} , $^{\circ}\text{C}$	Q^{var} , МВт
2.15	141.6364	66.6364	778.0500
6.45	124.9697	59.9335	674.6858
10.75	118.2668	57.2377	633.1155
15.05	115.5711	56.1536	616.3969
19.35	114.4869	55.7176	609.6732
23.65	114.0509	55.5422	606.9691
27.95	113.8755	55.4717	605.8815
32.25	113.8050	55.4433	605.4442
36.55	113.7766	55.4319	605.2683
40.85	113.7652	55.4273	605.1975
45.15	113.7607	55.4255	605.1691
49.45	113.7588	55.4247	605.1577

Средняя нагрузка в районе за период $T=40$. часов

с учетом переходного процесса ($Q_{\text{сп}}^T$) 626.4901 МВт

Расчетная нагрузка в течение предшествующего периода T без учета переходного

процесса (Q_K^0) 778.0500 МВт

Расчетная нагрузка в течение текущего периода T без учета переходного

процесса (Q_K^1) 605.1500 МВт

Рис.2 – Зависимости t_1^{var} , t_2^{var} , Q^{var} от τ , файл «result», $\Delta t_{\text{нб}} = 10^{\circ}\text{C}$

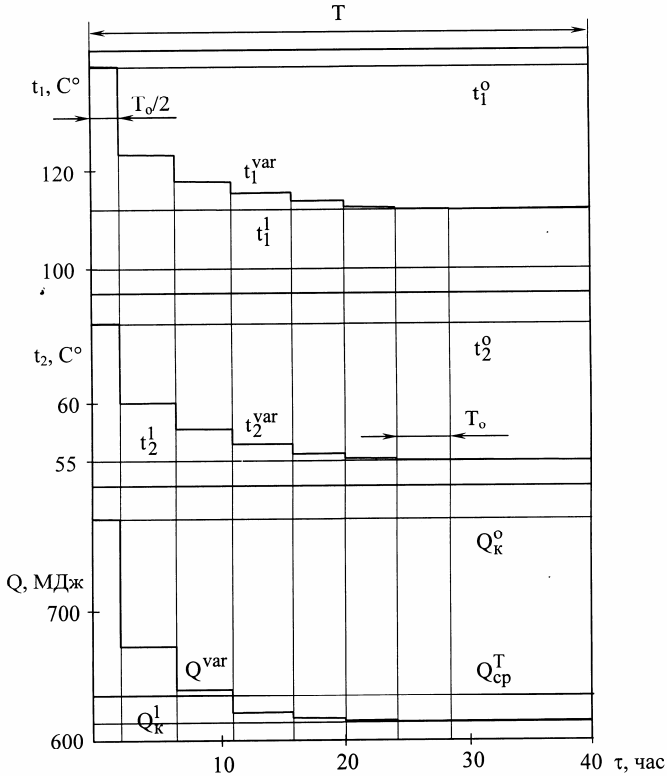


Рис.3 – Зависимости $t_1^0, t_1^1, t_1^{\text{var}}, t_2^0, t_2^1, t_2^{\text{var}}, Q_k^0, Q_k^1, Q^{\text{var}}, Q_{\text{cp}}^T$ от τ , часов, $\Delta t_{\text{нв}} = 10 \text{ }^\circ \text{C}$

Здесь τ_0 , часов – момент времени, в который ступенчато изменилась нагрузка на котельную; $t_1^1, t_2^1, \text{C}^\circ$ – значения температур теплоносителя, рассчитанные с помощью заданных зависимостей $t_1(t_{\text{нв}}), t_2(t_{\text{нв}})$ и соответствующие $t_{\text{нв}} = t_{\text{нв},0}$; $t_1^0, t_2^0, \text{C}^\circ$ – значения температур теплоносителя, соответствующие $t_{\text{нв}} = t_{\text{нв},0} + \Delta t_{\text{нв}}$; $t_1^{\text{var}}, t_2^{\text{var}}, \text{C}^\circ$; $Q^{\text{var}}(\tau)$, МВт – значения температур теплоносителя на входе и выходе из отапливаемого района (ОР) и тепловая нагрузка

на этот район в течение периода регулирования T ; Q_K^0 , Q_K^1 , МВт – значения тепловых нагрузок, рассчитанные с помощью заданных зависимостей $Q_K(t_{нв})$ для $t_{нв} = t_{нв,0}$ и $t_{нв} = t_{нв,0} + \Delta t_{нв}$ и обеспечивающие комфортное состояние в ОР при указанных $t_{нв}$;

$$Q_{ср}^T = \frac{\tau_0}{T} \int_0^{\tau_K} Q_K^{var}(\tau) \cdot d\tau$$

, МВт – средняя нагрузка в ОР с учетом переходного процесса за период T .

Исходные данные для расчета		
Точность расчета	0.00001	
Теплоемкость воды C , кДж/кл*град.С	4.2	
Расход теплоносителя G , кг/с	2470.	
Период оборота воды в СТ T_0 , часов	4.3	
Период расчета средней нагрузки T , часов	40.	
Начальная температура наружного воздуха, $t_{нв,0}$, град.С	-20.	
Приращение температуры наружного воздуха, $\Delta t_{нв}$ град.С	10.	
* Универсальный температурный график		
+-----+-----+-----+		
t_1 , град.С	t_2 , град.С	$t_{нв}$, град.С
+-----+-----+-----+		
58.	33.	10.
150.	70.	-23.
+-----+-----+-----+		

Рис.4 – Основные исходные данные, файл "init"

Анализируя данные, приведенные на рис.2, 3, можно сделать следующие выводы.

Действительное количество теплоты, введенное в ОР за период T с учетом переходного процесса, составляет величину

$$Q_{ср}^T \cdot T = 626,5 \cdot 40 \cdot 3600 = 90216000 \text{ МДж.}$$

Количество теплоты, которое необходимо ввести в ОР за период T , чтобы обеспечить комфортное состояние (при $t_{нв} = t_{нв,0} + \Delta t_{нв}$) составляет величину

$$Q_K^1 \cdot T = 605,15 \cdot 40 \cdot 3600 = 87\ 141\ 600 \text{ МДж.}$$

Таким образом, имеет место «перетоп» и, следовательно, добавочные потери в СТ, величина которых составляет $90216000 - 87141600 = 3074400$ МДж.

Чтобы не допустить такой «перетоп», необходимо определить величину нагрузки на котельную $Q_{\text{комф}}^T$, которая обеспечивает подведение в ОР комфортного количества теплоты $Q_{\text{к}}^1 \cdot T = 8714\ 600$ МДж в течение рассматриваемого периода T . В нашем случае $Q_{\text{комф}}^T = 581$ МВт.

Далее приступаем к решению задачи второго иерархического уровня, цель которой – найти такие значения нагрузок на каждый отдельный i -й котел Q_i , чтобы целевая функция H достигла минимума, и при этом сумма всех Q_i ($i=\overline{1,7}$) была бы равна $Q_{\text{комф}}^T$ [4].

Математическая постановка рассматриваемой задачи принимает следующий вид.

Найти

$$\begin{aligned} \min H(Q_i), \\ Q_i \in \Omega_1 \end{aligned} \quad (3)$$

где область Ω_1 определяется соотношениями:

$$\sum_{i=1}^7 Q_i = Q_{\text{комф}}^T, \quad Q_i > Q_{i,\min}, \quad Q_i < Q_{i,\max}. \quad (4)$$

Здесь $Q_{i,\min}$ и $Q_{i,\max}$, МВт – допустимые минимальные и максимальные нагрузки на отдельные котлы. Алгоритм решения этой задачи изложен в работе [2]. Результаты решения приведены в таблице.

Тогда решение задачи оптимального управления СТ осуществляется следующим образом. Для заданного ступенчатого изменения температуры наружного воздуха $\Delta t_{\text{нв}}$ (рис.4) рассчитываются величины периода оборота теплоносителя в системе T_0 и тепловой нагрузки на котельную $Q_{\text{комф}}^T$, обеспечивающие комфортное состояние в ОР в течение рассматриваемого периода времени T , соответствующего температуре $t_{\text{нв},0} + \Delta t_{\text{нв}}$.

Далее эта нагрузка распределяется между отдельными котлами в соответствии с режимной картой, приведенной в таблице. В нашем случае это следующие значения оптимальных нагрузок на котлы: $Q_{1,\text{опт}} = 92,1$ МВт, $Q_{2,\text{опт}} = 93,8$ МВт, $Q_{3,\text{опт}} = 92,5$ МВт, $Q_{4,\text{опт}} = 89,5$ МВт,

$Q_{5,опт} = 70,8$ МВт, $Q_{6,опт} = 70,5$ МВт, $Q_{7,опт} = 70,5$ МВт.

Зависимости $Q_{i,опт}$, $i = \overline{1, 7}$, МВт от $Q_{комф}^T$, МВт

$Q_{комф}^T$	$Q_{1,опт}$ МВт	$Q_{2,опт}$ МВт	$Q_{3,опт}$ МВт	$Q_{4,опт}$ МВт	$Q_{5,опт}$ МВт	$Q_{6,опт}$ МВт	$Q_{7,опт}$ МВт
260	51,95	52,04	52,04	52,04	51,94	-	-
300	60,4	60,1	60,1	60,1	59,37	-	-
340	69,76	69,67	69,44	68,45	62,7	-	-
380	54,22	54,3	54,22	54,2	54,58	54,39	54
420	61,03	61,03	60,5	60,1	59,1	59	59,2
460	69,67	68,01	67,57	66,44	62,1	62,9	63,3
500	78,3	76,3	74,7	73,4	65,5	65,6	66,06
540	85,1	86,2	83,6	81,2	67,8	67,8	68,2
580	92,1	93,8	92,5	89,5	70,8	70,5	70,5
620	100,1	103,3	99,7	97,1	73,25	73,1	73,4
660	110,4	115,2	107,2	103,4	74,7	74,6	74,3
700	116,3	116,3	116,3	116,3	77,8	78,2	78,8
740	116,3	116,3	116,3	116,3	91,6	91,85	91,36
780	116,3	116,3	116,3	116,3	103,4	105,5	105,9

Полученные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Выбор оптимальных диаметров трубопроводов тепловой сети, рациональных нагрузок на котельную и оптимальных нагрузок на отдельные котлы без учета переходных тепловых процессов в СТ, вызванных транспортным запаздыванием теплоносителя, приводит к значительным погрешностям при решении этих задач и к существенной тепловой разрегулировке СТ в ходе протекания переходных процессов.

2. Оптимальное распределение нагрузок между отдельными котлами соответствует экономическим характеристикам последних. Так, в частности, экономические характеристики котлов №1-4 приблизительно одинаковы, причем более высокие, чем у котлов №5-7. Естественно, более высокие нагрузки на оптимальном режиме приходится именно на эти котлы (№1-4).

1. Федоров А.П. Выбор оптимальных величин режимных характеристик магистрального теплопровода // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.18. – К.: Техніка, 1999. – С.133-137.

2. Федоров А.П., Андреев С.Ю. Оптимальное управление отопительной системой независимого типа // Науковий вісник будівництва. Вып.10. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2000. – С.120-123.

3. Лысак Л.В. Выбор рациональных нагрузок пиковых водогрейных котлов теплофикационной системы // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.33. – К.:

Техніка, 2001. – С. 178-182.

4.Федоров А.П. Рациональные режимы отпуска теплоты при разных схемах тепло-снабжения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / ХГТУСА. – Харьков, 2000. – 21 с.

Получено 04.11.2005

УДК 621.182 : 692.34 : 519.87

Н.А.ШУЛЬГА, А.А.БОБУХ, кандидаты техн. наук, Д.А.КОВАЛЕВ

Харьковская национальная академия городского хозяйства

РАЗРАБОТКА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЛИНЕЙНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ – КОТЕЛЬНОЙ

Рассматриваются вопросы разработки многопараметрической линейной математической модели источника тепловой энергии – котельной, с применением метода наименьших квадратов.

Система централизованного теплоснабжения (СЦТ) городов представляет собой иерархическую многосвязную структуру, в состав которой входят: источник теплоснабжения (ТЭЦ, котельная), тепловые сети, центральный и индивидуальный тепловые пункты, потребитель тепловой энергии.

Ввиду сложности СЦТ целесообразно декомпозировать с учетом указанной выше структуры.

Источник теплоснабжения – котельная, является звеном верхнего уровня иерархии. С точки зрения решаемых задач автоматизации котельная представляет собой многомерный, многопараметрический, инерционный объект управления с распределенными параметрами, относящийся к сложным системам, который на основании априорных данных в первом приближении можно описать линейной математической моделью определенного вида [1].

В настоящее время для расчетов оптимальных режимов работы котельных актуальным является использование математических моделей, при выборе которых учитываются такие факторы, как точность, простота и относительно невысокая стоимость описания реального объекта управления. Пригодность методов идентификации получения математических моделей определяется такими особенностями, как линейность и нелинейность характеристик, непрерывность объекта управления, степень выраженности динамических свойств, уровень случайных помех, возможность введения искусственных возмущений.

Причинами, обуславливающими сложность решения задачи идентификации, могут быть трудности проведения эксперименталь-