

**2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

УДК 681.5:658.264

**УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
ГОРОДА ЗА СЧЕТ ЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
СТРУКТУРЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**Бабич С.В.¹¹ Одесский национальный политехнический университет, ОдессаE-mail: maxvell2k13@gmail.com

Copyright © 2014 by author and the journal “Automation technological and business - processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>ONAFT
Open AccessDOI: [10.15673/2312-3125](https://doi.org/10.15673/2312-3125).**Аннотация**

Процесс теплоснабжения современного Украинского города фактически обеспечивается множеством различных источников тепловой энергии, как на локальном уровне отдельных потребителей, так и на уровне обособленных домов, кварталов и целых районов. Сегодня рынок теплоэнергетического оборудования предлагает большой ассортимент источников тепловой энергии: районные и промышленные котельные и ТЭЦ, крышные, модульные котельные, теплонасосные установки, котлы, работающие на различных видах топлива, электрические бойлеры, масляные радиаторы, тепловентиляторы и т.д. В силу ряда причин сегодня конечный потребитель решает задачу теплоснабжения за счет различных альтернативных источников тепловой энергии, которые могут функционировать одновременно и параллельно. С учетом прогрессирующих и многозонных тарифов на первичные энергоресурсы стоимость единицы тепловой энергии для отдельного потребителя может изменяться в существенных пределах в зависимости от выбранного источника. В данной работе предложена модифицированная целевая функция, которая позволяет оценивать стоимость тепловой энергии источника без его фактического включения. Поставлен ряд модельных экспериментов и приведены результаты их анализа. Показано, что при наличии альтернативных источников тепловой энергии различных по своей физической природе и эффективности возможно решение задачи оптимизации процесса теплоснабжения с целью минимизации затрат. Помимо этого, предлагаемый подход можно также использовать как средство диагностики состояния тепловых сетей по увеличению себестоимости тепловой энергии.

Abstract

The process of heat supply a modern Ukrainian city actually provides a variety of different sources of thermal energy, both at the local level, individual consumers, and at the level of separate houses, neighborhoods and entire district. Today the market of thermal power equipment offers a wide range of thermal energy sources: district and industrial boilers and CHP, roof, modular boilers, heat pumps, boilers operating on different fuels, electric water heaters, oil heaters, etc. For several reasons, today the final consumer solves the problem of heating due to various alternative sources of thermal energy, which can operate simultaneously and in parallel. Given the progressive and payment multiband primary energy cost per unit of heat energy for individual consumer may vary significantly depending on the source. In this paper we propose a modified objective function, which allows you to estimate the cost of thermal energy source without actually turning. Raised a number of model experiments and the results of their analysis. It is shown that in the presence of alternative sources of heat energy of different physical nature and effectiveness of the possible solution of the optimization process in order to minimize heating costs. In addition, the



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

proposed approach can also be used as a means of diagnosing the state of thermal networks to increase the cost of thermal energy.

Ключевые слова

Системы теплоснабжения городских районов, целевая функция, имитационное моделирование

Введение

Решение задачи теплоснабжения и горячего водоснабжения (ГВС) современных городских районов может обеспечиваться широким спектром различных источников тепла как локально, на уровне отдельного потребителя, так и централизованно, на уровне целого района.

Развитие технологий в областях теплоэнергетики, альтернативных и возобновляемых источников энергии, позволяет сегодня создавать достаточно разнообразные системы теплоснабжения. На уровне индивидуального теплоснабжения отдельной квартиры рынок предлагает большой ассортимент газовых и электрических котлов, электрических бойлеров, тепловентиляторов, масляных радиаторов, кондиционеров, тепловых насосов и т.д. При переходе к отдельным домам и целым районам, в зависимости от конкретных природных условий этот ассортимент может расширяться и дополняться генераторами, преобразующими в тепло энергию ветра, солнца и волн. Помимо газа, угля и торфа котлы могут функционировать практически на любой органике, являющейся побочным продуктом различных технологических процессов. Также может использоваться тепло грунтовых и сточных вод, и различных геотермальных источников.

В силу различных причин, как, например, повышение надежности или экономия энергоресурсов, сегодня нередко можно наблюдать ситуацию, когда решение задачи отопления и ГВС в рамках одной системы может решаться различными альтернативными источниками тепла. Наличие альтернативных путей достижения цели, потенциально позволяет оптимизировать процесс теплоснабжения, т.е. выбрать более дешевый на данный момент источник тепловой энергии.

В первую очередь стоимость этой энергии определяется КПД источника и стоимостью используемого энергоресурса. В централизованных системах высокий КПД источника может нивелироваться потерями в тепловой сети, и результирующий КПД всего процесса может быть существенно ниже. Тарифы на энергоресурсы также существенно изменяются в зависимости от уже потребленного количества ресурса. Тариф на электроэнергию также может изменяться в течение суток.

Следует также отметить, что если КПД котла в номинальном режиме работы относительно постоянен, то для теплового насоса его аналог КПД называемый тепловой коэффициент преобразования, может существенно изменяться в зависимости от температуры внешней среды.

Таким образом, в современных системах теплоснабжения городских районов, содержащих десятки и сотни различных альтернативных источников тепловой энергии, открываются широкие перспективы по оптимизации процесса теплоснабжения с целью минимизации затрат.

Ранее в ряде работ были рассмотрены отдельные аспекты синтеза системы управления теплоснабжением городских районов. Так в [1] приведены результаты исследования системы теплоснабжения отдельного коттеджа. Показана возможность управления структурой технических средств. Синтезирован комплексный критерий управления, учитывающий такие параметры как: надежность системы, стоимость энергоресурсов, эффективность преобразования ресурсов в тепловую энергию и качество обеспечения заданной температуры. В [2] приведены результаты анализа экономической эффективности рассматриваемых систем теплоснабжения городских районов в составе которых находятся источники тепловой энергии различные по своей природе и используемых энергоресурсов. В [3] приведены результаты синтеза и адаптации целевой функции управления системой теплоснабжения применительно к городским районам.

Моделирование системы теплоснабжения городского района, оптимизирующей затраты.

Рассмотрен городской район, состоящий из 200 многоквартирных жилых домов. Отдельный дом представляет собой девятиэтажное здание на 72 квартиры. Принято, что каждая квартира может снабжаться теплом и горячей водой пятью альтернативными источниками: централизованной системой в основе которой лежат газовые котлы. Централизованной котельной в основе которой теплонасосная установка (ТНУ), крышной котельной на газе, также индивидуальным газовым котлом и индивидуальной ТНУ. Теплофизические модели здания, окружающей среды и оборудования детально рассмотрены в [1]. Тепловая сеть представляла собой восемь веток, в каждой из которой находятся пять ЦТП. К каждому ЦТП подключены 5 домов. Протяженность отдельных участков трубопровода



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

была принята на основе анализа схем тепловых сетей различных городов. Величина тепловых и физических потерь в тепловой сети принята в соответствии со СНиП 41-03-2003.

Предварительные исследования показали необходимость модификации целевой функции управления. Так первоначально целевая функция имела вид:

$$J(\tau) = S(\tau) + R(\tau) \rightarrow \min$$

$$S(\tau) = \frac{(C_e + C_{ia} + C_s)\Delta\tau}{n_c T} + \sum_i C_r^i(\tau, G_c^i) G_r^i(\tau) \Delta\tau$$

$$R(\tau) = \left((1 - P(\tau)) 0,7 \left(1 + 1,2\alpha(\gamma) \sqrt{\frac{P(\tau)}{n(1 - P(\tau))}} \right) \right) \frac{(C_e + C_{ia})\Delta\tau}{\Delta T}$$

где: $S(\tau)$ — стоимостная составляющая;

$R(\tau)$ — составляющая надежности;

T — ресурс системы, с;

$\Delta\tau$ — интервал моделирования или интервал, на котором оценивается работа системы, с;

C_e — стоимость оборудования;

C_{ia} — стоимость монтажа и наладки;

C_s — стоимость обслуживания системы за период времени T ;

G_c^i — количество уже потребленного i -го энергоресурса за отчетный период (месяц);

$C_r^i(\tau, G_c^i)$ — текущая цена i -го энергоресурса, зависящая как от времени суток так и от количество уже потребленного энергоресурса;

G_r^i — текущий расход i -го энергоресурса за отчетный период (месяц);

n_c — количество подключенных потребителей;

$\alpha(\gamma)$ — коэффициент, зависящий от гарантии безопасности γ (выбирается по справочным таблицам);

$P(\tau)$ — надежность источника тепловой энергии.

Дальнейшие исследования выявили ряд недостатков предложенной целевой функции:

- стоимостная составляющая $S(\tau)$ должна иметь возможность оценки без включения конкретного источника;
- значение целевой функции, фактически являющееся стоимостью тепловой энергии, должно состоять из условно постоянных затрат зависящих только от времени и переменных, зависящих от мощности источника;
- оценка целевой функции должна основываться на требуемой в данный момент суммарной тепловой мощности потребителя;
- оценка целевой функции должна явно учитывать тепловой КПД процесса преобразования энергоресурса в тепловую энергию с учетом всех потерь.

После модификации целевая функция приняла следующий вид:

$$J(\tau) = A(\tau) + M(N_{\text{тр}}, \tau) \rightarrow \min$$

$$A(\tau) = \frac{(C_e + C_{ia} + C_s)\Delta\tau}{n_c T} + R(\tau) + \Delta S$$

$$M(N_{\text{тр}}, \tau) = C_r^i(\tau, G_c^i) \frac{N_{\text{тр}} \Delta\tau}{R_i \eta_i^*}$$

где: $A(\tau)$ — аддитивные затраты, зависящие только от времени;

$M(N_{\text{тр}}, \tau)$ — мультипликативные затраты, зависящие от требуемой мощности;



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

$N_{тр}$ — требуемая суммарная мощность потребителей;

R_i — удельная энергоемкость i -го энергоресурса;

ΔS — стоимость дополнительных затрат ресурсов для обеспечения процесса и компенсации потерь, грн;

η^* — тепловой КПД процесса получения тепловой энергии.

В зависимости от вида используемого энергоресурса величина R_i принимает различные значения. Для топлива это удельная теплота сгорания Дж/м³, Дж/кг. Для электричества $R_i = 3600000$ Дж/кВтч.

Величина ΔS аккумулирует в себе различные затраты такие как: стоимость холодной воды для компенсации физических потерь в тепловой сети; стоимость энергоресурсов идущих на нагрев холодной воды до регламентной температуры; стоимость электроэнергии затрачиваемой на работу насосов и т.п.

Решающее правило для системы управления формулировалось следующим образом. В любой момент времени теплоснабжение любого потребителя должно осуществляться от самого дешевого источника тепловой энергии. Если энергии источника не хватает, должен подключаться источник, генерирующий самую дешевую энергию среди оставшихся.

Шаг моделирования составлял 2 минуты. Интервал моделирования — один месяц, начиная с 1 января. Так как привести весь объем данных модельного эксперимента в рамках данной статьи не представляется возможным, в табл. 1-3 приведены только оценки месячной стоимости различных вариантов теплоснабжения рассматриваемого городского района.

Данные, приведенные в табл. 1 являются точкой отсчета относительно которой можно сравнивать остальные результаты моделирования. По условию экспериментов считалось, что отопление и ГВС может осуществляться только от одного конкретного источника, т.е. альтернатив нет. При этом результаты по моделированию централизованных систем можно считать существенно заниженными т.к. реальный износ тепловых сетей таков, что тепловые и физические потери в десятки раз выше нормативных. С другой стороны данные по индивидуальным ТНУ близки к идеальным. При температурах теплоносителя на входе и выходе 20°C и 60°C тепловой коэффициент трансформации (COP) был примерно равен 5. При этом считалось, что ТНУ частично утилизируют тепло сточных вод. В зависимости от внешних условий, COP ТНУ может отличаться как в меньшую, так и в большую стороны. Но следует отметить, что в ряде европейских стран ограничено применение ТНУ с низким COP.

В рамках проведенного эксперимента теплоснабжение от индивидуальных ТНУ является самым эффективным с точки зрения затрат. При этом отказ от использования тепла сточных вод и переходе на сетевую воду с температурой 5°C в зимнее время, все равно дает самое дешевое решение задачи теплоснабжения.

Таблица 1 – Месячная стоимость теплоснабжения городского района одиночными источниками

Источник	Стоимость, грн
Централизованное отопление на газе	7 084 892
Централизованное отопление с использованием ТНУ	6 026 546
Крышная котельная	5 796 872
Индивидуальные газовые котлы	2 809 945
Индивидуальные ТНУ с утилизацией тепла сточных вод	1 967 357
Индивидуальные ТНУ без утилизации тепла сточных вод	2 319 546

Таблица 2 – Месячная стоимость теплоснабжения городского района при различных ограничениях

Ограничения	Стоимость, грн
Можно включать все	1 915 356
Максимальная мощность индивидуальных ТНУ снижена на 50%	1 957 667
Индивидуальных ТНУ нет	2 810 840
Тариф на э/э увеличен в 2 раза	2 576 226

**2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Таблица 3 – Месячная стоимость теплоснабжения городского района одиночными источниками в случае увеличения тепловых и физических потерь в 10 раз

Источник	Стоимость, грн
Централизованное отопление на газе	10 616 300
Централизованное отопление с использованием ТНУ	7 066 618

В табл. 2 приведены результаты моделирования при условии, что все источники взаимозаменяемы. Как видно итоговое решение немного лучше варианта использования только индивидуальные ТНУ. При снижении максимальной мощности индивидуальных ТНУ вплоть до полного отказа от них, происходит постепенный переход на использование индивидуальных котлов. Следует отметить, что КПД таких котлов был принят равным 0,75, что существенно меньше современных качественных котлов от ведущих производителей.

Для сравнения в табл. 3 приведены результаты моделирования централизованных систем теплоснабжения при условии повышения уровня тепловых и физических потерь в 10 раз. Хорошо видно преимущество районной котельной использующей ТНУ. В первую очередь это связано с тем, что в этом случае в тепловой сети можно поддерживать существенно меньший температурный режим, а с другой стороны эффективность ТНУ существенно повышается с ростом тепловой мощности установки, что связано с использованием более совершенных компрессоров.

Выводы

1. Проведенный ряд модельных экспериментов показал, состоятельность гипотезы о возможности оптимизации процесса теплоснабжения при использовании альтернативных источников тепловой энергии с целью минимизации затрат;
2. В условиях существующего износа тепловых сетей целесообразным является переход на индивидуальные источники теплоснабжения. С другой стороны предлагаемый подход к управлению теплоснабжением городских районов можно использовать как средство диагностики качества тепловых сетей. В случае повышения стоимости тепловой энергии система может сигнализировать о необходимости проведения очередного ремонта и обслуживания тепловой сети;
3. Предлагаемый подход к управлению теплоснабжением городских районов также легко может быть использован для контроля потребления первичных энергоресурсов при их ограничении путем воздействия на соответствующие тарифы.

Литература

1. Максимова О.Б. Управление системой теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств / О.Б. Максимова, В.О. Давыдов, С.В. Бабич // Проблемы управления и информатики: междунар. науч.-техн. журн. 2014. – №3. – С. 50–60;
2. Бабич С.В. Анализ экономической эффективности систем теплоснабжения городских районов / С.В. Бабич, В.О. Давыдов // Тр. Одес. нац. политехн. ун-та. – О., 2014. – Вып. 1 (43). – С. 141–147;
3. Бабич С.В. Целевая функция структурной оптимизации городских систем теплоснабжения / С.В. Бабич, В.О. Давыдов // Тр. Одес. нац. политехн. ун-та. – О., 2014. – Вып. 2 (36). – С. 146–154.

Reference

1. Maksimova O.B. Upravlenie sistemoy teplosnabzheniya s izmenyaemoj strukturoj texnicheskix sredstv / O.B. Maksimova, V.O. Davydov, S.V. Babich // Problemy upravleniya i informatiki: mezhdunar. nauch.-texn. zhurn. 2014. – №3. – S. 50–60;
2. Babich S.V. Analiz ekonomicheskoi effektivnosti sistem teplosnabzheniya gorodskih raionov / S.V. Babich, V.O. Davydov // Tr. Odes. nac. politexn. un-ta. – O., 2014. – Вып. 1 (43). – S. 141–147;
3. Babich S.V. Celevaya funkciya strukturnoj optimizacii gorodskix sistem teplosnabzheniya / S.V. Babich, V.O. Davydov // Tr. Odes. nac. politexn. un-ta. – O., 2014. – Вып. 2 (36). – S. 146–154.