

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

3. Онищенко О.А. Система управления электроприводом поршневого компрессора холодильной установки / Онищенко О.А. // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – 2005. – С. 23-28.;
4. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник / В.М. Терехов, О.И. Осипов – М.: «Академия», 2005. – 301 с.
1. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет. / Пластинин П.И. – М.: Колос, 2006. – 456 с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник / Соколовский Г.Г. – М.: «Академия», 2006. – 266 с.
3. Панкратов В.В. Избранные разделы теории автоматического управления: учебное пособие / В.В. Панкратов, О.В. Нос, Е.А. Зима – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2011. – 223 с.

References

1. Bukaros A.Yu. Modernizatsiya upravlyаемyih privodov germetichnyih kompressorov / A.Yu. Bukaros, O.A. Onischenko // *Elektrotehnichni ta komp'yuterni sistemi*. – 2010. – # 01 (77). – P. 58-63.;
2. Voyteh V.A. Chastotnoe regulirovanie skorosti vrascheniya asinhronnih dvigateley kompressorov byitovyih holodilnikov / Voyteh V.A. // *Tehn. elektrodinamika. Temat. vip. "Problemi suchasnoyi elektrotehniki"*. – 2004. – P. 3. – P. 61-63.;
3. Onischenko O.A. Sistema upravleniya elektroprivodom porshneвого komпрессора holodilnoy ustanovki / Onischenko O.A. // *Elektromashinobuduvannya ta elektroobladnannya*. – 2005. – P. 23-28.;
4. Terehov V.M. Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnik / V.M. Terehov, O.I. Osipov – М.: «Akademiya», 2005. – 301 p.;
5. Plastinin P.I. Porshnevyye kompressory. Tom 1. Teoriya i raschet. / Plastinin P.I. – М.: Kolos, 2006. – 456 s.;
6. Sokolovskiy G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem: uchebnik / Sokolovskiy G.G. – М.: «Akademiya», 2006. – 266 p.;
7. Pankratov V.V. Izbrannyye razdelyi teorii avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie / V.V. Pankratov, O.V. Nos, E.A. Zima – Novosibirsk: Izdatelstvo NGTU, 2011. – 223 p.

УДК 681.5:658.264

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКИХ РАЙОНОВ

Бабич С.В.¹¹Одесский национальный политехнический университет, Одесса

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/>

DOI: 10.15673/2312-3125.

Аннотация

Процесс теплоснабжения современного Украинского города должен соответствовать высоким требованиям надежности и эффективности. Как правило задачи отопления и горячего водоснабжения решаются централизованно сетью районных котельных. В тоже время износ оборудования и магистральных трубопроводов приводит к росту тепловых и физических потерь теплоносителя, что существенно снижает эффективность процесса теплоснабжения. Это приводит к тому, что часть потребителей города переходит на альтернативные источники тепла такие как: крышные и модульные котельные, индивидуальные



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

газовые котлы, тепловые насосы и пр. Ранее была предложена целевая функция для управления такими распределенными система теплоснабжения в масштабах города. Функция позволяет оценить удельные затраты на производство тепловой энергии произвольного источника с учетом его надежности и эффективности. В данной работе приводятся результаты анализа параметрической чувствительности предложенной целевой функции к отклонениям различных параметров. Показано, что для систем теплоснабжения с развитой сетью магистральных трубопроводов основным влияющим фактором является надежность. Поддержание таких трубопроводов в хорошем состоянии позволяет существенно снизить затраты на первичные энергоресурсы. Также показано, что для тепловых насосов основным влияющим фактором является их тепловой коэффициент преобразования, а при использовании зонных тарифов на электроэнергию тепловые насосы позволяют получать тепловую энергию по очень низкой себестоимости. Сформулированы рекомендации по тому какие параметры следует улучшать в первую очередь для достижения максимального эффекта.

Abstract

The process of heating the modern Ukrainian city must meet the high requirements of reliability and efficiency. Usually the problem of heating and hot water supply are solved centralized by network of regional boiler rooms. At the same time, depreciation of equipment and pipelines increases the thermal and physical loss of coolant, which significantly reduces the efficiency of the heat supply system. This leads to the fact that some consumers is switches to alternative sources of heat such as modular and roof boiler rooms, the individual boilers, heat pumps, etc. Previously been proposed target function for controlling the heat supply system such distributed across the city. The function allows to estimate the unit cost of production thermal energy arbitrary source, given its reliability and efficiency. This paper presents the results of the parametric sensitivity analysis of the proposed target function to deviations of various parameters. It is shown that for heat supply systems with a big network of pipelines major influencing factor is reliability. Maintaining such pipelines in good condition can significantly reduce the cost of primary energy. It is also shown that the heat pump is mainly influenced factor is their thermal conversion factor, and the use of the band in electricity tariffs heat pumps allow receive thermal energy at a very low cost. Formulated recommendations on which options should be improved in the first place to achieve maximum effect.

Ключевые слова

Параметрический анализ чувствительности, целевая функция, системы теплоснабжения городских районов.

Тепловая сеть современных городов представляет собой достаточно сложную структуру, состоящую из множества источников тепловой энергии. В большинстве случаев это районные котельные, обеспечивающие централизованное отопление (ЦО) и горячее водоснабжение (ГВС). В тоже время большая доля систем ЦО сегодня характеризуются высоким износом оборудования и магистральных трубопроводов, что приводит к существенным тепловым и физическим потерям теплоносителя. Также, в силу ряда причин системы ЦО не обеспечивают круглогодичное снабжение население горячей водой. Поэтому сегодня наблюдается тенденция частичного или полного отказа населения от централизованных систем отопления и ГВС и переход на индивидуальные источники тепловой энергии. Кроме того, в ряде северных европейских стран сегодня на государственном уровне ведутся исследования по интеграции в городские системы теплоснабжения различных альтернативных источников тепловой энергии [1].

Появление альтернативы в выборе источника, который в данный момент будет обеспечивать потребителя теплом и горячей водой приводит к необходимости решения задачи выбора самого оптимального источника.

Ранее в работе [2] была предложена целевая функция $J(\tau)$, позволяющая оценивать стоимость поставляемой потребителю тепловой энергии и горячей воды. Функция является суммой двух составляющих: стоимостной $S(\tau)$ и составляющей надежности $R(\tau)$:

$$J(\tau) = S(\tau) + R(\tau) \tag{1}$$

Стоимостная составляющая определяется выражением:

$$S(\tau) = \frac{(C_e + C_{ia} + C_s)\Delta\tau}{N_c T} + \sum_i C_r^i(\tau, G_c^i) G_r^i(\tau)\Delta\tau \tag{2}$$



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

где 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.

Для выражения вероятностной характеристики «надежность» в стоимостных единицах, были использованы методы актуарной математики применяемой в страховом деле для расчета тарифных ставок по рисковому видам страхования:

$$R(\tau) = \left((1 - P(\tau))0,7 \left(1 + 1,2\alpha(\gamma) \sqrt{\frac{P(\tau)}{n(1 - P(\tau))}} \right) \right) \frac{(C_e + C_{ia})\Delta\tau}{\Delta T} \quad (3)$$

где $P(\tau)$ – надежность источника тепловой энергии;

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

ΔT – некий период времени равный месяцу, кварталу, году;

n – количество договоров страхования, отнесенных к периоду времени, на который проводится страхование.

Следует отметить, что составляющая $R(\tau)$ не является аналогом амортизации или реальных страховых платежей. Это мера позволяющая выразить вероятностную характеристику в стоимостных единицах.

Также в работе [2] было показано, что использование тепловых насосов и переход на зонный (ночной/дневной/пиковый) учет потребляемой электроэнергии позволяет получать в ночное время тепловую энергию существенно более дешевую, чем в альтернативных источниках, например, электрических бойлерах, газовых котлах, крышных или районных котельных.

В масштабах города все системы отопления и ГВС можно рассматривать как единую организационно-техническую систему. Чем более рассредоточена система отопления и ГВС, тем больше состав и объем работ по поддержанию ее в рабочем состоянии. В условиях ограниченных ресурсов возникает проблема направления ресурсов на решение тех задач, которые дадут максимальный эффект. Параметрический анализ чувствительности [3] целевой функции (1) позволяет оценить эффективность тех или иных мероприятий и тем самым определить их приоритетность.

В качестве исходных данных для анализа чувствительности были приняты следующие условия. Анализируемыми источниками тепла являются: районная котельная (РК), крышная котельная (КК), газовый котел, электрический бойлер и тепловой насос (ТН). Все источники кроме бойлера обеспечивают потребителя, как теплом, так и горячей водой. Бойлер обеспечивает только ГВС. Основные характеристики источников приведены в табл. 1. Такие источники как газовый котел, крышная и районная котельные требуют для работы наличие насосов которые обеспечивают прокачку теплоносителя через трубы, что связано с дополнительными затратами электроэнергии. Тарифы на газ и электроэнергию приведены в табл. 2-4. Стоимость холодной воды 2,736 грн/м³. К районной котельной подключены 200 домов. Каждый дом состоит из 72 квартир. Тепловые потери дома составляют 204 кВт. Суточное потребление горячей воды в одной квартире составляет 300 л. Интервал моделирования $\Delta\tau = 120$ с.

В качестве анализируемых параметров были выбраны: капитальные затраты, надежность, ресурс, КПД, дополнительные затраты электроэнергии на работу насосов, цена холодной воды, цена газа, цена электроэнергии, расход холодной воды и тепловые потери здания.



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Таблица 1 – Основные характеристики источников тепловой энергии

Источник тепловой энергии	Ресурс, лет	Суммарные капитальные затраты, грн	Надежность	КПД
Районная котельная	25	13000000	0,999	0,98
Крышная котельная	25	400000	0,999	0,96
Газовый котел	15	10000	0,999	0,75
Электрический бойлер	10	3000	0,999	0,95
Тепловой насос	10	6000	0,999	*

*) — тепловой коэффициент преобразования теплового насоса был выбран равным 1,6.

Таблица 2 – Тарифы на использование газа

	При условии, что годовой расход газа не превышает 2500 м ³	При условии, что годовой расход газа не превышает 6000 м ³	При условии, что годовой расход газа не превышает 12000 м ³	При условии, что годовой расход газа превышает 12000 м ³
Цена 1 м ³ газа, грн	0,725	1,098	2,248	2,686

Таблица 3 – Тарифы на использование электроэнергии

	При условии, что месячный объем потребления не превышает 150 кВт·ч	При условии, что месячный объем потребления не превышает 800 кВт·ч	При условии, что месячный объем потребления превышает 800 кВт·ч
Цена 1 кВт·ч э/э, грн	0,2802	0,3648	0,9576

Таблица 4 – Тарифные коэффициенты на электроэнергию, дифференцированные по периодам суток

Тарифная зона	Границы	Коэффициент
Пиковая	с 08-00 до 11-00 с 20-00 до 22-00	1,5
Полупиковая	с 07-00 до 08-00 с 11-00 до 20-00 с 22-00 до 23-00	1,0
Ночная	с 23-00 до 07-00	0,4

Анализ чувствительности проводился на упрощенной численной модели. Количество потребляемого при отоплении газа и электроэнергии определялось тепловыми потерями дома. При ГВС потребление ресурсов определялось максимальным расходом горячей воды.

Полученные значения чувствительности целевой функции (1) к изменениям различных параметров приведены в табл. 5.

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов.

Прежде всего, отметим, что отрицательная чувствительность означает уменьшение целевой функции при увеличении данного параметра.

Основным влияющим фактором для котельных (районных, блочных, крышных и т.д.) как при решении задачи отопления, так и при решении задачи ГВС, является надежность. Это связано с высокими капитальными затратами на приобретение таких источников тепловой энергии, а также с большим количеством подключенных потребителей. В случае аварии таких теплотехнических объектов каждый подключенный потребитель пытается компенсировать недостаток тепла любыми доступными способами. Самым очевидным решением является использование электроэнергии, что в масштабах города может вызывать существенный дисбаланс энергосистемы.

Следует отметить, что при управлении ресурсом надежности оборудования актуальной становится задача отслеживания изменения надежности со временем. Для этого рекомендуется воспользоваться математической моделью надежности изложенной в [4].



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Следующим по значимости для РК являются капитальные затраты. Хотя удельные капитальные затраты на одного потребителя в рассматриваемом примере составляют 902 грн, что существенно меньше стоимости индивидуальных источников тепловой энергии, большое влияние данного параметра на чувствительность целевой функции объясняется его непосредственным влиянием на составляющую надежности в выражении (3).

Данные по чувствительности целевой функции для РК по параметру КПД были получены для случая, когда система магистральных трубопроводов находится в идеальном состоянии. Если же трубопровод изношен и обладает высокими тепловыми и физическими потерями теплоносителя, то итоговая эффективность процесса отопления может снижаться до значений $0,6 \div 0,7$. В этом случае чувствительность целевой функции для РК по параметру КПД увеличивается на два порядка и достигает значения $-0,3555$.

Таблица 5 – Значения чувствительности целевой функции к вариациям параметров

	Капитальные затраты	Надежность	Ресурс	КПД	Затраты э/э на работу насосов	Цена за х/в	Цена за газ	Цена за э/э	расход х/в	Тепловые потери дома
Отопление										
РК	0,981	-802,3	-0,002	-0,003	0,017	—	0,002	0,017	—	0,002
КК	0,300	-323,8	-0,026	-0,742	0,005	—	0,695	0,005	—	0,695
Котел	0,001	-0,123	-0,001	-1,064	0,001	—	0,998	0,001	—	0,998
ТН	0,001	-0,057	-0,001	-2,082	—	—	—	0,999	—	0,999
ГВС										
РК	0,422	-98,6	-0,002	-0,502	0,007	0,084	0,487	0,007	0,571	—
КК	0,099	-32,5	-0,009	-0,821	0,002	0,130	0,770	0,002	0,899	—
Котел	0,008	-0,762	-0,008	-0,921	0,007	0,121	0,863	0,007	0,985	—
ТН	0,005	-0,365	-0,006	-1,846	—	0,109	—	0,886	0,995	—
Бойлер	0,001	-0,075	-0,001	-1,007	—	0,045	—	0,954	0,999	—

Для КК и котла распределение приоритетов иное. Здесь существенными являются КПД, стоимость газа и тепловые потери дома при решении задачи отопления либо расход холодной воды при ГВС. Если в КК основным влияющим параметром является надежность, то для котла он отходит на второй план. В основном это связано с низким КПД бытовых газовых котлов и относительно низкими капитальными затратами на их приобретение. Очевидно, что низкий КПД бытовых котлов приводит к существенному перерасходу газа, что ведет к увеличению стоимостной составляющей (2).

Параметр КПД также является основным для ТН. В данном случае более корректно говорить о тепловом коэффициенте преобразования. Для ТН он больше единицы и объясняет высокую чувствительность целевой функции к изменению данного параметра.

Так как, котел, ТН и бойлер являются объектами с низкими капитальными затратами по сравнению с котельными, а также ввиду того, что каждый из них обеспечивает потребности только одного абонента, данные источники тепловой энергии характеризуются ярко выраженной зависимостью чувствительности целевой функции от таких очевидных параметров как КПД, стоимость газа (электроэнергии) и тепловые потери дома (расход холодной воды).

Выводы

1. Помимо очевидного требования высокой надежности у котельных обслуживающих большое количество потребителей, в первую очередь необходимо направлять ресурсы на обслуживание магистральных трубопроводов, что повышает КПД процесса теплоснабжения и ГВС;
2. Для индивидуальных источников тепловой энергии стоимость потребленных первичных энергоресурсов также важна как и снижение тепловых потерь, т.е. утепление дома и уменьшение потребления горячей



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

воды. Так как, электроэнергия отпускается по цене зависящей от количества уже потребленного ресурса, а также от времени суток, следует активно использовать этот факт и переходить на многозонные счетчики электроэнергии;

3. Следует по возможности активно использовать тепловые насосы. А если комбинировать использование ТН и многозонного тарифа на электроэнергию, то можно получать в ночное время тепловую энергию по очень низкой себестоимости.

Литература

1. Verda, V., Guelpa, E., Kona, A., Lo Russo, S. Reduction of primary energy needs in urban areas trough optimal planning of district heating and heat pump installations // Energy. 2012. – № 48(1). – pp. 40–46.;
2. 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.;
3. Томович Р. Общая теория чувствительности. Пер. с сербск. и с англ. под ред. Цыпкина Я.З. – М.: Изд-во «Советское радио» – 1972. – 240 с.;
4. 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.

References

1. Verda, V., Guelpa, E., Kona, A., Lo Russo, S. Reduction of primary energy needs in urban areas trough optimal planning of district heating and heat pump installations // Energy. 2012. – № 48(1). – pp. 40–46.;
2. Babich S.V. Celevaya funkciya strukturoj optimizacii gorodskix sistem teplosnabzheniya / S.V. Babich, V.O. Davydov // Tr. Odes. nac. politexn. un-ta. – O., 2014. – Вып. 2 (36). – С. 146–154.;
3. Tomovich R. Obshhaya teoriya chuvstvitelnosti. per. s serbsk. i s angl. pod red. Cypkina Ya.Z. – M.: Izd-vo «Sovetskoe radio» – 1972. – 240 S.;
4. Maksimova O.B. Upravlenie sistemoj 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. – С. 50–60.

УДК: 681.5: 621.515

КОНТУР САМОНАСТРОЙКИ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМ КОМПРЕССОРОМ

Гурский А.А.¹, Денисенко В.А.², Гончаренко А.Е.²

¹Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса
ORCID: [0000-0001-5158-2125](https://orcid.org/0000-0001-5158-2125)

²Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса

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/>



DOI: [10.15673/2312-3125](https://doi.org/10.15673/2312-3125).

Аннотация

В статье рассматривается принцип реализации контура самонастройки нейро-нечеткой системы управления холодильным центробежным компрессором. Представлен обзор современных достижений в