

О. М. Головченко<sup>1</sup>  
О. М. Нанака<sup>1</sup>

## СИСТЕМА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СКИДНОГО ТЕПЛА ТРАНСФОРМАТОРА

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

Поставлена задача використання скидного тепла потужних електричних трансформаторів для теплопостачання житлових та виробничих будівель. Скидне тепло трансформаторів є низькотемпературним і тому для нього необхідні догрівачі. Розглянуто теплову схему системи теплопостачання з електротрансформатором та догрівачами — тепловим насосом та електродігрівачем. Після конденсатора теплової насосної установки (ТНУ) вода догрівається в електронагрівачеві та надходить до споживача. Теплова потужність трансформатора та температура гарячої води, що надходить до споживача, відомі. Невідомою є температура води, що надходить до електродігрівника після конденсатора ТНУ. За критерій вибору варіантів з різними температурами води взято сумарні дисконтовані витрати на обладнання системи теплопостачання. Дисконтовані витрати на систему теплопостачання визначаються, як сума витрат на теплообмінники, насоси та спожиту їхніми приводами електроенергію, витрат на ТНУ та на спожиту електроенергію її компресора, витрат на догрівач та затрат на спожиту ним електроенергію. Розроблена комп'ютерна програма визначення сумарних дисконтованих витрат на систему теплопостачання з регенерацією скидного тепла трансформатора. Наведено результати розрахунків сумарних дисконтованих витрат на варіанти системи теплопостачання. Досліджені варіанти без ТНУ з нагріванням води в електронагрівнику, з нагріванням води в ТНУ та догрівом її в електронагрівнику. Теплові потужності ТНУ та електричні потужності приводів компресорів за різних температур води з конденсаторів визначалися за допомогою відомої програми FKW Cycle. Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів і показано, що сумарні дисконтовані витрати на варіант з ТНУ менші сумарних дисконтованих витрат на варіант без ТНУ, що характер зміни сумарних дисконтованих витрат зі змінами температури нагрітої в ТНУ води однаковий для широкого інтервалу питомих вартостей ТНУ та електроенергії. Найменші сумарні дисконтовані витрати відповідають найменшому нагріву води в ТНУ та, відповідно, найбільшому догріву в електронагрівачеві.

**Ключові слова:** трансформатор, теплопостачання, теплонасосна установка, дисконтовані витрати.

### Вступ

Електричні процеси в трансформаторах супроводжуються їх нагрівом. Охолоджуються трансформатори маслом, теплота від якого відводиться у повітря навколишнього середовища. Є доцільним використання цієї скидної теплоти в системі теплопостачання. Проте температура нагрітого масла близько 40 °С, а температура води теплопостачання близько 60 °С. Тому необхідне додаткове джерело теплоти для догріву теплоносія. В умовах трансформаторних підстанцій такими джерелами можуть бути електронагрівачі, теплові насоси та їх комбінації [1]—[4].

Метою роботи є визначення варіантів системи теплопостачання з використанням тепла від трансформаторів з найменшими сумарними дисконтованими витратами.

### Основна частина

Розрахункова схема використання скидного тепла трансформатора для теплопостачання показана на рис. 1.

Схема системи теплопостачання заданої теплової потужності  $Q$  містить три контури. В першому контурі теплота від трансформатора 1 передається маслу. В другому контурі теплота від масла в масло-водяному теплообміннику 4 передається воді, яка нагрівається до температури  $T_1$ . В третьому контурі теплота від води у випарнику теплонасосної установки (ТНУ) 6 передається фреону. Фреон також нагрівається в процесі стиску в компресорі ТНУ. Далі теплота фреона в конденсаторі ТНУ передається воді, яка нагрівається до температури  $T_x$ . Після конденсатора ТНУ

вода насосом третього контуру 5 подається до споживача 7, в якому електричним нагрівником 8 догрівається до потрібної температури  $T_h$ .

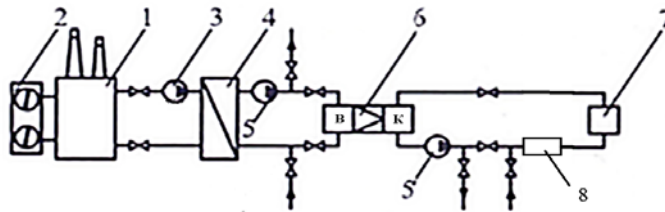


Рис. 1. Розрахункова схема використання скидного тепла трансформатора для теплопостачання: 1 — трансформатор; 2 — охолоджувач; 3 — масляний насос; 4 — теплообмінник масло-вода; 5 — водяний насос; 6 — теплонасосна установка; 7 — споживач тепла; 8 — електричний нагрівник

За цільову функцію оцінки варіантів схеми прийняті сумарні дисконтовані розрахункові витрати  $Z_{\Sigma}$ ,

$$Z_{\Sigma} = Z_{to} + Z_{mn} + Z_{eemn} + Z_{vn1} + Z_{eevn1} + Z_{tmu} + Z_{eetmu} + Z_{vn2} + Z_{eevn2} + Z_d + Z_{eed}, \quad (1)$$

де  $Z_{to}$ ,  $Z_{mn}$ ,  $Z_{eemn}$ ,  $Z_{vn1}$ ,  $Z_{eevn1}$ ,  $Z_{tmu}$ ,  $Z_{eetmu}$ ,  $Z_{vn2}$ ,  $Z_{eevn2}$ ,  $Z_d$ ,  $Z_{eed}$ , відповідно, дисконтовані витрати на теплообмінник, маслонасос та на спожиту річну електроенергію його приводу, на водяний насос першого контура та на спожиту річну електроенергію його приводу, на ТНУ та на спожиту річну електроенергію його приводу, на водяний насос другого контура та на спожиту річну електроенергію його приводу, на догрівач та на його спожиту річну електроенергію.

Витрати на теплообмінник, маслонасос, водяний насос першого контура, ТНУ, водяний насос другого контура, догрівач визначались за формулою

$$Z_i = a \cdot K_i, \quad (2)$$

де  $Z_i$  — витрати в  $i$ -му елементі обладнання системи теплопостачання, грн/рік;  $a$  — норма дисконту, 1/рік;  $K_i$  — капіталовкладення в  $i$ -й елемент обладнання системи теплопостачання, грн.

Витрати  $Z_{\Sigma}$  є функцією температури  $T_x$ . Необхідно знайти таку температуру  $T_x$ , яка відповідає найменшим витратам  $Z_{\Sigma}$ .

Роз'язання цієї задачі проілюструємо на прикладі розрахунку системи теплопостачання будівель тягової підстанції 110 кВ з масляними трансформаторами електрифікованої залізниці. Електрифікована залізниця є споживачем першої категорії щодо надійності електропостачання, яку забезпечують не менше двох понижувальних трансформаторів. Це, в свою чергу, забезпечить надійність і системи теплопостачання. Потрібна теплова потужність теплопостачання  $Q$  складає 36,6 кВт за температури гарячої води  $T_h = 60$  °С. Вартість 1 кВт·год електроенергії оцінено в 3 грн, а річна тривалість роботи системи теплопостачання становить 8000. За цих даних забезпечення будівель теплом від електронагрівача коштує 878 400 грн щорічно. Середньорічна потужність відведеного від трансформаторів тепла за літературними даними оцінена в 23 кВт. Капіталовкладення в обладнання схеми теплопостачання визначені за преїскурантами, наведеними в Інтернеті, норма дисконту  $a = 0,1$ .

Результати розрахунків схеми такі.

1. Тепловий потужності втрат трансформатора 23 кВт відповідає витрата масла 0,75 кг/с за температури масла на виході з трансформатора 45 °С.

2. Охолодження масла здійснюється в кожухотрубному теплообміннику з перегородками в міжтрубному просторі. Розрахунок теплообмінника виконано за методикою [6]. Масло тече в міжтрубному просторі, вода — всередині труб.

– внутрішній діаметр кожуха  $D_0 = 0,16$  м;

– зовнішній діаметр труб  $d_1 = 0,012$  м;

– внутрішній  $d_2 = 0,01$  м;

– робоча довжина  $L = 746$  мм;

– кількість труб  $n = 64$  шт.;

– теплопровідність матеріалу труб

$$\lambda = 58 \text{ Вт/(м·К)};$$

– поверхня теплообміну з боку води  $F_2 = 1,5$  м<sup>2</sup>;

– кількість перегородок в міжтрубному просторі  $m = 10$ ;

– розташування трубок — по кутах рівностороннього трикутника, крок між трубками  $S = 0,02$  м;

– товщина перегородки  $\delta = 0,002$  м.

Капіталовкладення в теплообмінник  $K_{to} = 9400$  грн. Потужність маслонасоса — 1,2 кВт. Капіталовкладення в масляний насос  $K_{mn} = 8000$  грн.

Витрати на електроенергію приводу маслонасоса — 29400 грн/рік.

3. Розрахунки ТНУ виконані за допомогою відомої програми FKW Cycle. Результати розрахунку подані в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку ТНУ

Температура води на виході з ТНУ, °С	Теплова потужність ТНУ, кВт	Електрична потужність приводу ТНУ, кВт
40	30,73	10,99
50	33,34	13,53
60	36,6	16,68

За температури води на виході з ТНУ 40 °С капіталовкладення в ТНУ за питомої вартості 6000 грн/кВт дорівнюють  $K_{ми} = 184380$  грн, а витрати  $Z_{ми}$  на електроденергію приводу ТНУ складають 63760 грн/рік. Потужність водяного насоса другого контуру — 0,6 кВт. Капіталовкладення в насос  $K_{vn} = 1650$  грн. Витрати на електроенергію приводу насоса — 14700 грн/рік.

4. Потужність водяного насоса другого контуру 0,6 кВт, потужність електронагрівача за температури конденсату 40 °С складає 5,87 кВт, потужність водяного насоса в третьому контурі — 0,215 кВт.

5. Дисконтовані сумарні витрати на систему теплопостачання  $Z_{\Sigma}$  дорівнюють 479470 грн/рік, з яких 20780 грн/рік складають дисконтовані витрати на устаткування, а 458690 грн/рік є витрати на електроенергію двигунів та електродогрівача.

За методикою «ручного» розрахунку складена програма розрахунку на ЕОМ. За допомогою програми виконані розрахунки сумарних дисконтованих витрат та їх складових на систему теплопостачання за температур води на виході з ТНУ 40, 50 та 60 °С за питомих вартостей електроенергії та ТНУ 3 грн/кВт·год та 6000 грн/кВт, відповідно. Результати розрахунків подані в табл. 2.

Таблиця 2

Сумарні дисконтовані витрати, грн/рік, на систему теплопостачання за температур води на виході з ТНУ 40, 50 та 60 °С

№	Складова сумарних дисконтованих витрат	Без ТНУ	40 °С	50 °С	60 °С
1	1 контур. Масловодяний теплообмінник	0	940	940	940
2	Маслонасос	0	800	800	800
3	Електроенергія приводу маслонасоса	0	29400	29400	29400
4	2-й контур. Водяний насос	0	165	165	165
5	Електроенергія приводу водяного насоса	0	14700	14700	14700
6	3-й контур. ТНУ	0	18438	20004	21960
7	Електроенергія приводу компресора ТНУ	0	263760	324720	400320
8	Водяний насос	0	400	400	400
9	Електроенергія приводу водяного насоса	0	5160	5160	5160
10	Електронагрівач	0	587	326	0
11	Електроенергія нагрівача	878400	140880	78240	0
12	Сумарні затрати	878400	479470	499095	483445

З табл. 2 випливає, що найменші сумарні дисконтовані затрати відповідають температурі 40 °С нагріву води в ТНУ.

Термін окупності  $T$  (в роках) системи теплопостачання з ТНУ визначено за формулою

$$T = \frac{K}{\Delta E}, \quad (3)$$

де  $K$  — капіталовкладення,  $\Delta E$  — економія вартості електроенергії.

Зменшені в 10 разів (дисконтовані) складові  $K$  подані в табл. 2.  $\Delta E$  визначена як різниця затрат на електроенергію в існуючому варіанті (без ТНУ) та в варіанті з нагрівом води в ТНУ до 40 °С (табл. 2). Тоді

$$T = \frac{213330}{424500} = 0,5 \text{ (рік)}.$$

Результати розрахунків сумарних витрат на систему теплопостачання за питомих вартостей електроенергії 1...6 грн/кВт·год подані в табл. 3 та на графіках рис. 2.

За допомогою програми виконані розрахунки сумарних дисконтованих витрат на систему теплопостачання за питомих вартостей ТНУ, грн/кВт: 500; 1000; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000; 7000; 8000; 9000; 10000. Результати розрахунків подані в табл. 4 та на графіках рис. 2.

Таблиця 3

**Дисконтовані сумарні витрати, грн/рік, на систему теплопостачання за різних питомих вартостей електроенергії, грн/кВт·год**

Питома вартість електроенергії, грн /кВт·год	Без ТНУ, з електронагрівачем	Температура води на виході з ТНУ, °С		
	60 °С	40	50	60
0,5	195515	141720	162745	149235
1	341915	209160	229905	215955
2	634715	344040	364225	349395
3	927515	478920	498545	482895
4	1220315	613800	632865	616275
5	1513115	748680	767185	749715
6	1805915	883560	901505	883155

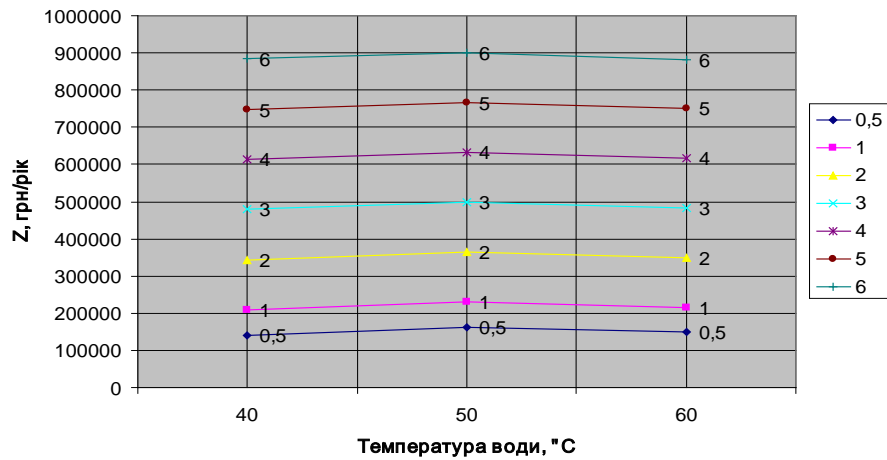


Рис. 2. Залежності сумарних дисконтованих витрат на систему теплопостачання від температури води на виході з ТНУ, °С за різних питомих вартостей електроенергії

Результати розрахунків сумарних дисконтованих витрат на систему теплопостачання за питомих вартостей ТНУ 500...10000 грн/кВт подані в табл. 4 та графіках рис. 3.

Таблиця 4

**Дисконтовані сумарні витрати на систему теплопостачання за різних питомих вартостей ТНУ, грн/кВт**

Питома вартість ТНУ, грн/кВт	Температура води на виході з ТНУ, °С		
	40	50	60
500	462018	480208	462705
1000	463555	481875	464535
2000	466628	485209	468195
3000	469701	488543	471855
4000	472774	491877	475515
5000	475847	495211	479175
6000	478920	498545	482835
7000	481993	501879	486495
8000	485066	505213	490155
9000	488139	508547	493815
10000	491212	511881	497475

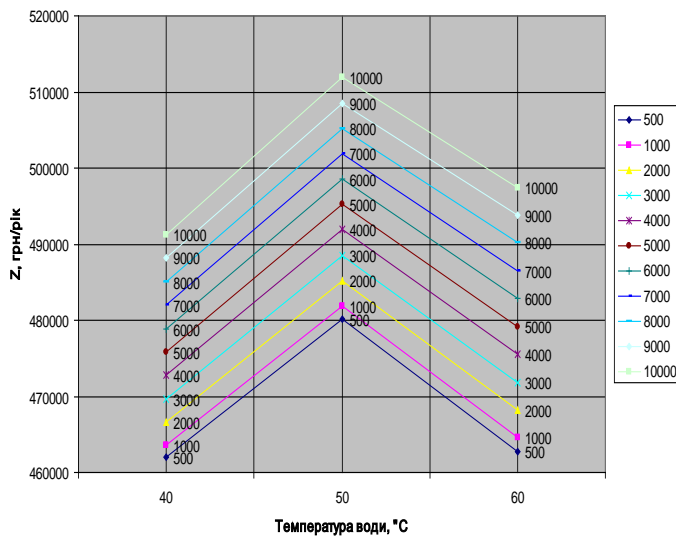


Рис. 3. Залежності дисконтованих витрат, грн/рік, на систему теплопостачання від температури води на виході з ТНУ, °С за різних питомих вартостей ТНУ

## Висновки

Виконані розрахунки системи теплопостачання з регенерацією скидного тепла трансформатора. Досліджені варіанти без теплової насосної установки з нагріванням води в електронагрівнику та з нагріванням води в ТНУ та догрівом її в електронагрівнику.

Розрахунки показали:

1. Сумарні дисконтовані витрати на варіант з ТНУ менші сумарних дисконтованих витрат на варіант без ТНУ через:
  - а) високу вартість електроенергії, споживану електронагрівником;
  - б) «безкоштовну» теплову енергію від трансформатора.
2. Характер зміни дисконтованих витрат у разі змін температури нагрітої в ТНУ води однаковий за питомих вартостей електроенергії в інтервалі 0,5...6 грн/кВт·год.
3. Характер зміни сумарних дисконтованих витрат у разі змін температури нагрітої в ТНУ води однаковий за питомих вартостей ТНУ в інтервалі 500...10000 грн/кВт.
4. Найменші сумарні дисконтовані витрати відповідають найменшому нагріву води в ТНУ та, відповідно, найбільшому догріву в електронагрівачу. Це пояснюється тим що зі збільшенням температури нагріву в ТНУ витрати на електроенергію приводу компресора зростають інтенсивніше зростання витрат на електроенергію електронагрівача за таких самих нагрівів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. Г. Беседин, В. З. Манусов, «Использование тепла силовых масляных трансформаторов для теплоснабжения электрических подстанций. Часть 1. Способы использования», *Сборник научных трудов НГТУ*, № 4, с. 1-6, 2005.
- [2] В. Г. Беседин, В. З. Манусов, «Использование тепла силовых масляных трансформаторов для теплоснабжения электрических подстанций. Часть 2. Варианты подключения устройств отбора тепла к системе водяного отопления», *Сборник научных трудов НГТУ*, № 1, с. 111-116, 2006.
- [3] Н. Eickenhorst, Н. Siefen, “Transformatoren heizen ein Buerogebaeude,” *ETA:Elektrowaerme techn. Ausbau*, № 4, pp 140-145, 1989.
- [4] С. В. Гридин, А. Ф. Петренко, «Энергоэффективность способов утилизации отработанного тепла систем охлаждения силовых трансформаторов,» *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, № 7, с. 11-18, 2013.
- [5] П. М. Тихомиров, *Расчет трансформаторов*, учеб. пос. для вузов. Москва, СССР: Энергоатомиздат, 1986, 528 с.
- [6] О. Л. Данилов, *Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях*, учеб. пособие по курсу «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях» для студентов, обучающихся по направлению «Теплоэнергетика». Москва, РФ: изд-во МЭИ, 2004, 62 с.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 15.10.2019

**Головченко Олексій Михайлович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, e-mail: aleksey.golovch@gmail.com ;

**Нанак Олена Миколаївна** — канд. техн. наук, доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, e-mail: e\_nanaka@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**O. M. Holovchenko<sup>1</sup>**  
**O. M. Nanaka<sup>1</sup>**

## Heat Supply System Using Transformer Waste Heat

<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University

*The task is to use the waste heat of powerful electric transformers for hot water supply in residential and industrial buildings. The high heat of transformers is of low-temperature and therefore requires heaters. The thermal scheme of the hot water supply system with electric transformer and heater - heat pump and electric heater is considered. In the scheme, the heat from the transformer is transmitted to oil, from oil to the heat in the oil-heat exchanger is transferred to water, from water to the evaporator of the heat pump installation (HPI) is transferred to the freon and from the freon to the water of the hot water system is transmitted in the condenser of the HPI. After the HPI condenser, water is heated in the electric heater and is supplied to the consumer. The thermal capacity of the transformer and the temperature of hot water supplied to the consumer are known. The temperature of the water supplied to the heater after the HPI condenser is unknown. According to the criterion of quality of variants with different water temperatures, the total cost of equipment of the scheme of hot water supply system is accepted. The method of determination of the total reduced costs of the hot water supply system with regeneration of waste heat of the transformer is offered. Costs for the hot water supply system are defined as the sum of the costs of heat exchangers, pumps and their consumed electricity, the costs of HPI and consumed electricity of its compres-*

sor, the cost of the heater and the consumption of electricity. A computer program for determining the total reduced costs of a hot water supply system with regeneration of the transformer discharge heat has been developed. The results of calculations of the total reduced costs for hot water system options are presented. The variants without HPI with heating of water in the electric heater, with heating of water in HPI and heating it in the electric heater are investigated. The HPI thermal capacities and the compressor drive electrical capacities at different water temperatures from the condensers were determined using the well-known FKW Cycle program. The comparative analysis of the obtained results is performed and it is shown that the cumulative cited costs for the variant of HPI are lower than the cumulative cited costs of the variant without HPI, that the nature of change of the cumulative reduced costs when the temperature of the heated in HPI of water is the same for a wide range of specific costs of HPI and electricity. The lowest total costs shown correspond to the lowest water heating in the HPI and, accordingly, the highest heating in the electric heater.

**Keywords:** transformer, hot water supply, heat pump installation, total costs shown.

**Holovchenko Oleksii M.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electromechanical Automation Systems in Industry and Transport, e-mail: aleksey.golovch@gmail.com ;

**Nanaka Olena M.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electromechanical Automation Systems in Industry and Transport, e-mail: e\_nanaka@ukr.net

**А. М. Головченко<sup>1</sup>**  
**Е. Н. Нанак<sup>1</sup>**

## Система теплоснабжения с использованием сбросного тепла трансформатора

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

Поставлена задача использования сбросного тепла мощных электрических трансформаторов для теплоснабжения жилых и производственных зданий. Сбросное тепло трансформаторов является низкотемпературным и поэтому для него необходимы догреватели. Рассмотрена тепловая схема системы теплоснабжения с электротрансформатором и догревателями — тепловым насосом и электроподогревателем. После конденсатора ТНУ вода догревается в электронагревателе и поступает к потребителю. Тепловая мощность трансформатора и температура горячей воды, поступающей к потребителю, известны. Неизвестной является температура воды, поступающая в электроподогреватель после конденсатора ТНУ. Критерием качества вариантов с разными температурами воды приняты суммарные дисконтированные затраты на оборудование схемы системы теплоснабжения. Дисконтированные затраты на систему теплоснабжения определяются как сумма затрат на теплообменники, насосы и потребленную их приводами электроэнергию, затрат на ТНУ и на электроэнергию ее компрессора, затрат на догреватель и затрат на ним потребляемую электроэнергию. Разработана компьютерная программа определения суммарных дисконтированных затрат на систему теплоснабжения с регенерацией сбросного тепла трансформатора. Приведены результаты расчетов суммарных дисконтированных затрат на варианты системы теплоснабжения. Исследованы варианты без ТНУ с нагревом воды в электронагревателе, с нагревом воды в ТНУ и к догревом ее в электронагревателе. Тепловые мощности ТНУ и электрические мощности приводов компрессоров при различных температурах воды из конденсаторов определялись с помощью известной программы FKW Cycle. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов и показано, что суммарные дисконтированные затраты на вариант с ТНУ меньше суммарных дисконтированных затрат на вариант без ТНУ, что характер изменения суммарных дисконтированных затрат при изменениях температуры нагретой в ТНУ воды одинаков для широкого интервала удельных стоимостей ТНУ и электроэнергии. Наименьшие суммарные дисконтированные затраты соответствуют наименьшему нагреву воды в ТНУ и, соответственно, наибольшему догреву в электронагревателе.

**Ключевые слова:** трансформатор, теплоснабжение, теплонасосная установка, дисконтированные затраты.

**Головченко Алексей Михайлович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: aleksey.golovch@gmail.com ;

**Нанак Елена Николаевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: e\_nanaka@ukr.net