

УДК 632.382: 620.179.4

С.Л. ГОРЯЩЕНКО, О.О. НИКИТИН, Ю.Ю. КУШНІР, С.В. УСПАЛЕНКО

Хмельницький національний університет

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ

У даній роботі розглядається математична модель динаміки системи опалення з герметично замкнутим контуром теплоносія – води, що нагрівається пропусканням через неї трифазного електричного струму. Нагріта вода надходить на обігрів приміщень за традиційною схемою водяного опалення (стояк подачі, батареї, стояк стоку, циркуляційний насос).

Модель дозволяє досліджувати питання економічної ефективності використання теплоаккумуляторів, які накопичують тепло в нічний час, коли тариф на електроенергію мінімальний, і віддають тепло в систему опалення вдень, коли тариф максимальний. Максимум споживання електроенергії на опалення в нічні годинники створює сприятливі умови роботи електростанцій, які перевантажені в годинники денного пікового навантаження й практично розвантажені в нічні годинники.

Ключові слова: модель, автоматизація, теплоаккумулятор.

S. HORIASHCHENKO, O. NIKITIN, J. KUSHNIR, S. USPALENKO  
Khmelnytskyi National University

### PROBLEMS OF PROTECTING COATINGS ON RULL TEXTILE MATERIALS

In this paper, a mathematical model of the dynamics of a heating system with a hermetically sealed circuit of a coolant - water heated by passing through a three-phase electric current is considered. Hot water enters the heating of premises according to the traditional scheme of water heating (feedstock, battery, runner, circulating pump).

The model allows studying the economic efficiency of using heat accumulators that accumulate heat at night, when the tariff for electricity is minimal, and give heat to the heating system during the day when the tariff is maximal. The maximum consumption of electricity for heating at night hours creates favorable conditions for the operation of power plants that are overloaded in daily peak load hours and practically unloaded at night hours.

**Keywords:** polymer coatings, devices for applying films, application of protective coatings

### Вступ

На відміну від традиційних теплотехнічних розрахунків, де досліджується статика - сталі процеси переносу тепла, динамічна модель дозволяє одержувати відповіді на такі питання як:

- ефективність стабілізації температури в приміщеннях при істотному коливанні зовнішньої температури протягом доби;
- економічна ефективність застосування теплоаккумуляторів для зниження споживання електроенергії на опалення в годинники пік.

На рис. 1 показана схема електроопалення житлового будинку. Акумулятор тепла - це бак обсягу  $V_{\text{tank}}$ , повністю залитий непротічною водою. Вода в баці, що служить тепловою ємністю, через теплообмінник-змійовик усередині акумулятора одержує/віддає тепло воді контуру водяного опалення. Система обладнана приладами контролю:

- $T_{\text{hot}}$  – датчик температури води після електронагрівників,
- $T_{\text{tank}}$  – датчик температури води в баку теплоаккумулятора,
- $T_{\text{heat}}$  – датчик температури води в стояку подачі,
- $T_{\text{cool}}$  – датчик температури води в стояку стоку (після батарей),
- $T_{\text{room}}$  – датчик температури повітря в опалювальних приміщеннях,
- $T_{\Delta}$  – датчик температури зовнішнього повітря.

Залежно від  $T_{\Delta}$  стабілізація температури в приміщеннях –  $T_{\text{room}}$  – досягається автоматичним включенням необхідного числа електро-нагрівачів.

Контур водяного опалення утворюють: блок електронагрівників з колекторами прийому й видачі теплоносія, теплообмінний змійовик у теплоаккумуляторі, стояк подачі гарячої води на поверхи, батареї водяного опалення в приміщеннях, стояк стоку охолодженої води (після батарей), водяний насос, що забезпечує циркуляцію води в контурі опалення, ресивер - бачок для компенсації збільшення обсягу води при її нагріванні.

### Основна частина

Верхній ряд блоків на рис. 2 моделює динаміку інерційних ланок, нижній ряд блоків моделює статику малоінерційних ланок.

Динаміка досліджуваного об'єкта описується системою диференціальних рівнянь в часток похідних. Використання динамічних моделей з рівняннями в частинних похідних веде до надмірного ускладнення самої моделі й дослідницьких експериментів на ній. Тому будемо використовувати спрощений підхід грубого обліку динаміки нагромадження/витрати тепла в елементах, що володіють значної тепловою ємністю, і безінерційною передачею тепла між іншими елементами системи.

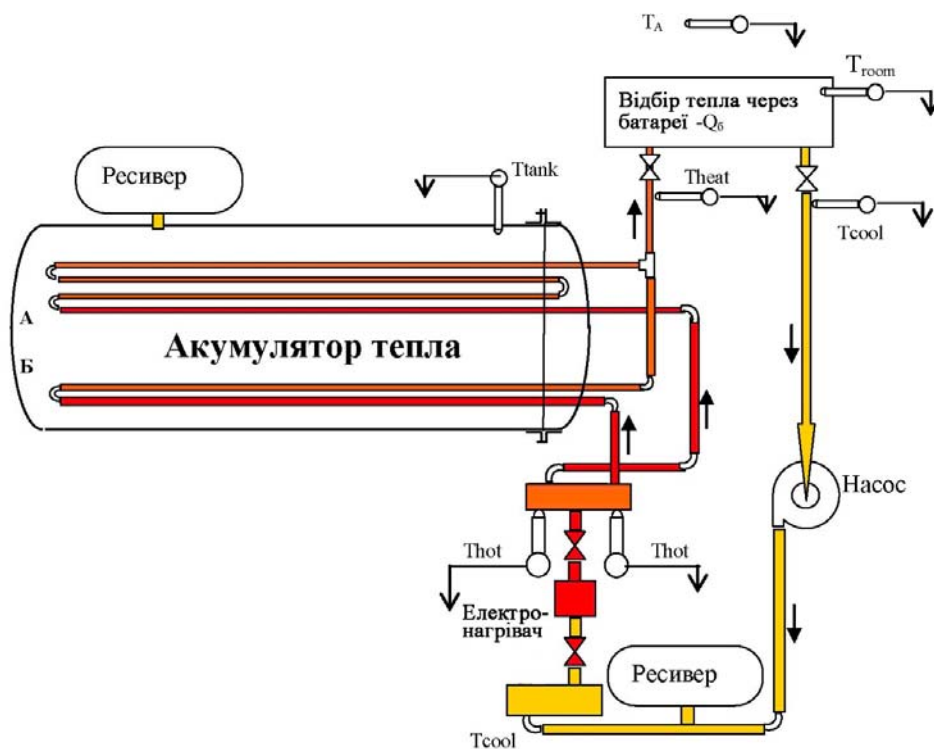


Рис. 1. Схема установки автоматизованої теплоакumuлюючої системи

При спрощеному підході динаміка моделі може бути представлена у вигляді двох теплових ємностей: теплоємності бака теплоакumuлятора й теплоємності повітря в опалювальних приміщеннях. Всі інші процеси теплообміну мають час перехідного процесу на 1-2 порядки менше, і розглядаються як статичні.

З метою максимального ілюстративного викладу вивід формул математичної моделі будемо супроводжувати прикладом конкретного теплового розрахунку. Паралельно з виводом формул будемо виконувати розрахунковий приклад для житлового будинку на 60 двокімнатних квартир із загальним обсягом опалювальних приміщень  $V_{rooms} = 10000 \text{ м}^3$ , опалювальною площею  $S_{rooms} = 3700 \text{ м}^2$ , площею зовнішніх стін  $F_{walls} = 1986 \text{ м}^2$ , площею зовнішнього осклення  $F_{windows} = 496 \text{ м}^2$ , площею покриття неопалюваного горища  $F_{attic} = 576 \text{ м}^2$ , площею перекриття неопалюваного підвалу  $F_{cellar} = 576 \text{ м}^3$ .

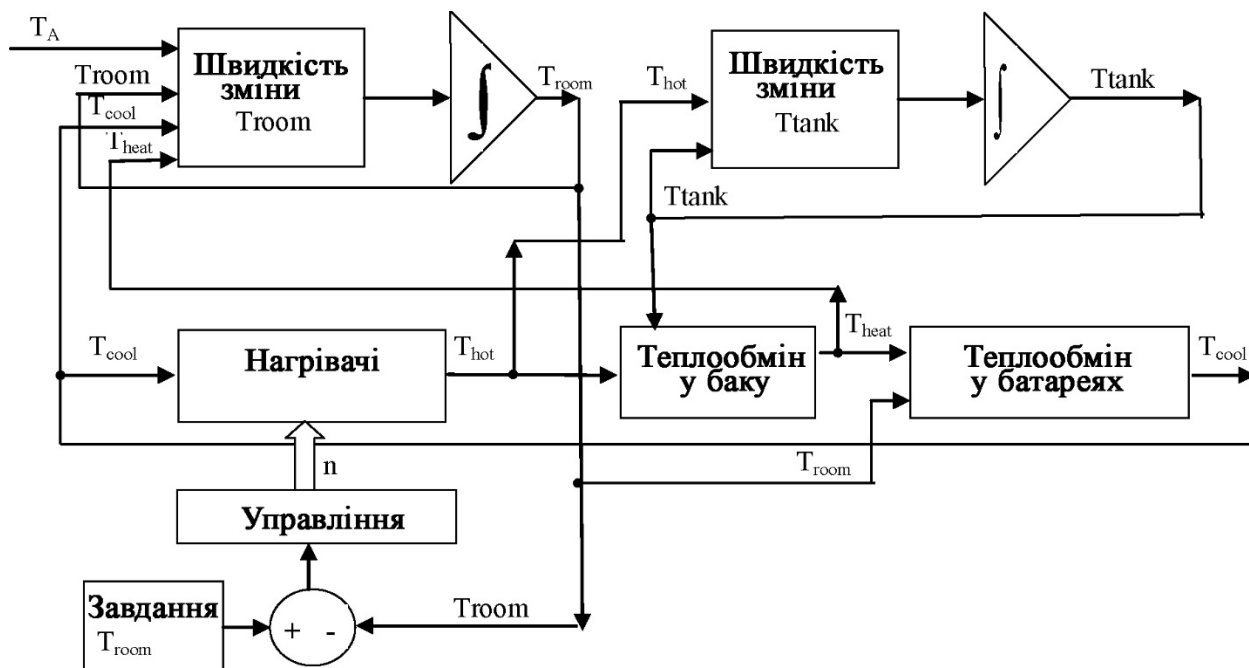


Рис. 2. Структура моделі динаміки системи електроопалення

Теплова інерція повітря приміщень додатково пов'язана з тепловою інерцією масивних непрозорих конструкцій, що обгороджують (стін). Цей другорядний фактор можна спрощено враховувати поправочним коефіцієнтом  $K_{walls} > 1$  до обсягу приміщень  $V_{rooms}$ .

По термічному опорі (Ri) всіх конструктивних елементів будинок задовольняє вимогам ДБН В.3.6-31:2006 [5], а саме:  $R_{walls} = 2.8 \text{ м}^2 \text{ К}^\circ/\text{Вт}$ ;  $R_{windows} = 0.6 \text{ м}^2 \text{ К}^\circ/\text{Вт}$ ;  $R_{attic} = 3.3 \text{ м}^2 \text{ К}^\circ/\text{Вт}$ ;  $R_{cellar} = 2.8 \text{ м}^2 \text{ К}^\circ/\text{Вт}$ .

Циркуляційний насос пропompує через систему теплоносій, при цьому витрата теплоносія становить  $G = 4000 \text{ кг/година}$ .

Маса повітря  $M^{air}$  в обсязі опалювальних приміщень при температурі  $20^\circ \text{C}$  і атмосферному тиску  $760 \text{ мм.рт.ст.}$  становить:

$$M^{air} = \rho_H^{air} V_{room} \tag{1}$$

де  $\rho_H^{air} = 1.2 \text{ кг/м}^3$  – щільність повітря при кімнатній температурі [5],  $M^{air} = 1.2 \cdot 10000 = 12000 \text{ кг}$ .

У кожний момент часу теплова ємність обсягу  $V$  містить певну кількість теплової енергії:

$$E = V \cdot c \cdot p \cdot T \tag{2}$$

де  $E$  – кількість теплової енергії, ккал;  $V$  – обсяг простору, займаного нагрівається середой,  $\text{м}^3$ ;  
 $c$  – питома теплоємність нагрівається середой,  $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $p$  – щільність нагрівається середой,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $T$  – температура нагрівається середой,  $\text{К}^0$ .

Відповідно, зміна теплової енергії в ємності за час  $d\tau$ :

$$dE = V \cdot c \cdot p \cdot d\tau \tag{3}$$

пов'язане із приходом- витратою тепла теплової ємності, тобто

$$dE = (Q^{in} - Q^{out}) \cdot d\tau \tag{4}$$

де  $Q^{in}$  – потужність припливу тепла,  $\text{ккал}/\text{година}$ ,  $Q^{out}$  – потужність відтоку тепла,  $\text{ккал}/\text{година}$ .

Для теплоаккумулятора потужність приходу-витрати тепла залежить від того, яка температура більше. Якщо  $T_{ак} > T_{г}$ , то тепло аккумулятора витрачається, якщо  $T_{ак} < T_{г}$ , то тепло в аккумуляторі накопичується:

$$Q^{in/out} = G \cdot c^{H2O} \cdot (T_{hot} - T_{tank}) \tag{5}$$

де  $G$  – витрата теплоносія,  $\text{кг}/\text{година}$ ,  $c^{H2O} = 1 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$  - теплоємність води.

Прирівнюючи (3), (5), одержимо:

$$V_{tank} \cdot c^{H2O} \cdot \rho^{H2O} \cdot dT_{tank} = G \cdot c^{H2O} \cdot (T_{hot} - T_{tank}) \tag{6}$$

звідки

$$dT_{tank} / d\tau = G(T_{hot} - T_{tank}) / (V_{tank} \rho^{H2O}) \tag{7}$$

Формула дозволяє обчислювати швидкість зміни температури води в баку теплоаккумулятора як функцію від температур  $T_{hot}$  і  $T_{tank}$ .

Інтегруючи  $dT_{tank} / d\tau$ , одержимо поточне значення температури води в баці (див. рис. 2).

Для повітря в опалювальних приміщеннях за аналогією з (2), (4) можна записати рівняння теплового балансу:

$$V_{room} \cdot \rho_{room}^{air} T_{room} = (Q_{in} - Q_{out}) d\tau \tag{8}$$

Потужність подачі тепла в будинок (потужність втрати тепла теплообмінниками опалювальних приміщень):

$$Q^{in} = G \cdot c^{H2O} \cdot (T_{heat} - T_{cool}) \tag{9}$$

Потужність відводу тепла з опалювальних приміщень у зовнішнє середовище складається із двох складових:

$$Q_{out} = Q_t^{out} + Q_{inf}^{out} \tag{10}$$

де  $Q_t^{out} = (T_{room} - T_A) \cdot \sum F_i / R_i$  – потужність тепловтрат квартири через зовнішні огороження,  $\text{ккал}/\text{год}$ ,

$$Q_{inf}^{out} = V_{rooms} \cdot k_{inf} \cdot c_{pair} \cdot (T_{room} - T_A) \tag{11}$$

Потужність тепловтрат квартир через інфільтрацію зовнішнього повітря в кімнаті через вентиляцію й нещільності,  $\text{ккал}/\text{година}$  [6].

З (8), одержимо

$$dT_{room} / d\tau = (Q_{in} - Q_{out}) / (V_{room} \cdot \rho_{room}^{air} \cdot c_{pair}) \tag{12}$$

Формула дозволяє обчислювати швидкість зміни температури в опалювальних приміщеннях розрахункового прикладу як функцію від температур  $T_{heat}$ ,  $T_{cool}$ ,  $T_{room}$ ,  $T_A$ . Інтегруючи  $dT_{room}/d\tau$ , одержимо поточне значення температури в приміщеннях.

### Висновки

Дослідження загального рівняння показує, що акумулювання енергії може здійснюватися в результаті зміни: питомої внутрішньої енергії; питомої потенційної енергії; питомої кінетичної енергії; маси системи. Віддача тепла залежить від площі теплообмінника та висоти приміщення, інфільтрації зовнішнього повітря в кімнаті через вентиляцію й нещільності, що впливає на якість балансу між швидкістю віддачі тепла та нагріванням приміщення. Отримані формули можуть бути використані для інженерних розрахунків та проектування/підбору теплоаккумулятора на основі води.

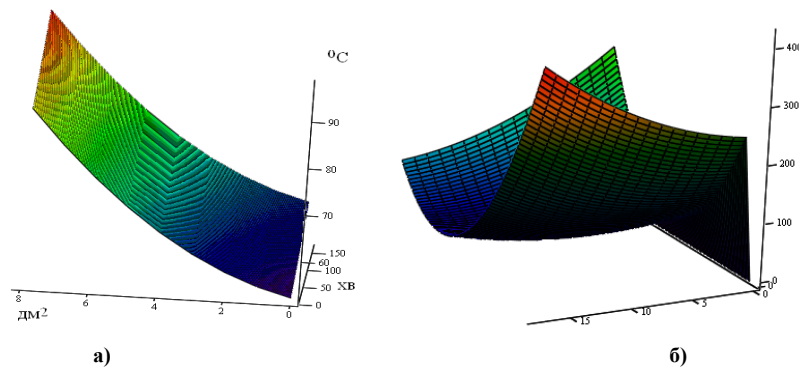


Рис. 3. Графік розповсюдження тепла в приміщенні: а) залежно від ефективності теплообмінника б) в верхній зоні приміщення

### Література

1. Параска Г.Б. Дослідження впливу конструктивних параметрів обладнання на ефективність нагрівання та акумулювання тепла в теплоаккумуляторі / Г.Б. Параска, С.Л. Горященко, А.І. Гордєєв, Є.О. Голінка // Materials Of The Xii International Scientific And Practical Conference Modern European Science - 2016 June 30 - July 7, 2016 Volume 9 Chemistry And Chemical Technology Mathematics Technical Science Sheffield Science And Education LTD 2016. p. 42–46.
2. Сотникова О. А. Аккумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения / О. А. Сотникова, В. С. Турбин, В. А. Григорьев // АВОК. – М., 2003. – № 5. – С. 76–83.
3. Горященко С.Л. Моделирование тепловых процессов теплоаккумулятора / С.Л. Горященко, Є.О. Голінка // Матеріали XIII міжнародної науково-техн. конф., ВОТТ-13-2014. – С. 152–153.
4. Аналіз теплового стану цеху азотування металевих виробів та модернізація його опалення / Г. Б. Параска, С. Л. Горященко, А. В. Вітюк, Є. О. Голінка // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 6. – С. 44–46.
5. Управління проектами енерговикористання : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів, які навч. за спец. "Енергетичний менеджмент" / Ю. Г. Качан, К. О. Братковська ; Запорізька інж. акад. – Запоріжжя : ЗДІА, 2014. – 141 с.

### References

1. Paraska G.B., Goryashhenko S.L., Gordyeyev A.I., Golinka Ye.O. Doslidzhennya vplyvu konstruktivnykh parametriv obladnannya na efektyvnist' nagrivan'nya ta akumulyuvannya tepla v teploakumulyatori // Materials Of The Xii International Scientific And Practical Conference Modern European Science - 2016 June 30 - July 7, 2016 Volume 9 Chemistry And Chemical Technology Mathematics Technical Science Sheffield Science And Education LTD 2016. p.42-46
2. Sotny'kova O. A. Akkumulyatory teploty teplogeneruyushhy'x ustanovok sy'stem teplosnabzheny'ya / O. A. Sotny'kova, V. S. Turby'n, V. A. Gry'gor'ev // AVOK. – M., 2003. – 5. – S.76-83.
3. S.L. Goryashhenko, Ye.O. Golinka. Modelyuvannya teplovy'x procesiv teploakumulyatora. Materialy' XIII mizhnarodnoyi naukovo-texnichnoyi konferenciyi, VOTTP-13-2014, s.152-153
4. Analiz teplovogo stanu cexu azotuvannya metalovy'x vy'roviv ta modernizaciya jogo opalennya / G. B. Paraska, S. L. Goryashhenko, A. V. Vityuk, Ye. O. Golinka // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2014. – Issue 6. – S. 44–46.
5. Upravlinnya proektamy' energovy'kory'stannya : navch. posib. dlya stud. vy'shh. navch. zakladiv, yaki navch. za specz. "Energety'chny'j menedzhment" / Yu. G. Kachan, K. O. Bratkovs'ka ; Zaporiz'ka inzh. akad. - Zaporizhzhya : ZDIA, 2014. - 141 s.

Рецензія/Peer review : 03.11.2017 р.

Надрукована/Printed :07.12.2017 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Скиба М.Є.