

УДК 621.313

**РОЗРОБЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ  
В ЕЛЕКТРОПОБУТОВІЙ ТЕХНІЦІ****Карплюк І. М., Петко А. К., Біла Т. Я.**

Київський національний університет технологій та дизайну

***Мета.** Створення комп'ютерних моделей для дослідження теплових процесів в електро побутових машинах для зменшення енерговитрат.*

***Методика.** У роботі використані методи побудови математичних та комп'ютерних моделей і експериментальні методи досліджень.*

***Результати.** Отримані узагальнена математична та комп'ютерна моделі теплових процесів, що дозволяють прогнозувати їх перебіг. На прикладі посудомийної машини проведений аналіз конструктивних та технологічних параметрів, показаний перехід від узагальненої моделі до моделі конкретної машини. Проведені комп'ютерні дослідження теплового процесу та експериментально підтверджена адекватність отриманих результатів.*

***Наукова новизна.** Запропоновані комп'ютерні моделі, що дають змогу обирати конструктивні та технологічні параметри при проектуванні енергоефективного обладнання.*

***Практична значимість.** Отримані результати дозволяють створювати комп'ютерно-інтегровані системи керування з енергоощадними режимами роботи.*

***Ключові слова:** комп'ютерна модель, тепловий потік, посудомийна машина, алгоритм проектування, витрати енергії.*

Принцип роботи практично всіх електро побутовій техніки (ЕПТ) ґрунтується на використанні електричної енергії живлення для забезпечення перебігу теплових процесів (нагрівання, охолодження, заморожування тощо). На забезпечення самого технологічного процесу витрачається інколи менший відсоток енергії, ніж той, що переходить в зовнішнє середовище [1]. Чим досконаліше ЕПТ, тим менше ці втрати, а, відповідно, вище коефіцієнт корисної дії. Тому підвищення енергоефективності устаткування є однією з найбільш важливих задач дослідника та конструктора.

Існує кілька основних способів зниження теплових втрат в навколишнє середовище від високо або низкотемпературного приладу: вдосконалення конструкції теплоізоляції, поліпшення технологічного режиму, використання тепла основних і побічних продуктів виробництва як теплоносіїв, вдосконалення способів теплогенерації і розвиток нових систем автоматичного керування технологічним процесом [2, 3]. А тому розроблення моделей, направлених на підвищення енергоефективності ЕПТ, є актуальною задачею, яку необхідно вирішувати як в процесі наукових досліджень, так і в процесі проектування нових конструкцій.

**Постановка завдання**

Головною метою роботи є створення комп'ютерних моделей для дослідження теплових процесів, що дозволить більш правильно визначати конструктивні параметри та прогнозувати працездатність ПМП, що проектується, та зменшити енерговитрати.

**Результати досліджень**

В електропобутовій техніці незалежно від конкретного призначення машини чи приладу (холодильник, морозильник, пральна або посудомийна машина, кондиціонер) всі теплові процеси технологічного циклу можна представити у вигляді двох складових. Перші з них виконують роботу, що необхідна для забезпечення функціонування системи (зниження температури, заморожування, підігрів рідини тощо), а другі – це втрати енергії в навколишнє середовище. Від співвідношення цих складових залежить коефіцієнт корисної дії (ККД) електропобутової техніки.

Джерело теплової енергії повинно компенсувати сумарне значення складових теплового процесу, тобто:

$$Q_{ДЖ} \geq \Sigma Q_{КОР} + \Sigma Q_{ВТР}, \quad (1)$$

де  $Q_{ДЖ}$  – тепловий потік джерела енергії;

$Q_{КОР}$  – корисний тепловий потік;

$Q_{ВТР}$  – втрати теплового потоку в навколишнє середовище внаслідок теплопровідності, конвекції та випромінювання.

Корисний тепловий потік витрачається на виконання технологічного процесу і залежить в загальному випадку від теплоємності об'єкта та обмежується температурою, яку необхідно отримати для виконання заданої функції протягом певного часу. Змінювання температури об'єкта описується диференціальним рівнянням першого порядку

$$C \frac{dT}{dt} = Q_{ДЖ} - \Sigma Q_{ВТР}, \quad (2)$$

де  $C$  – теплоємність об'єкта;

$T$  – температура;

$t$  – час.

Узагальнена комп'ютерна модель рішення рівняння (2) засобами програми Matlab&SimuLink наведена на рис. 1.

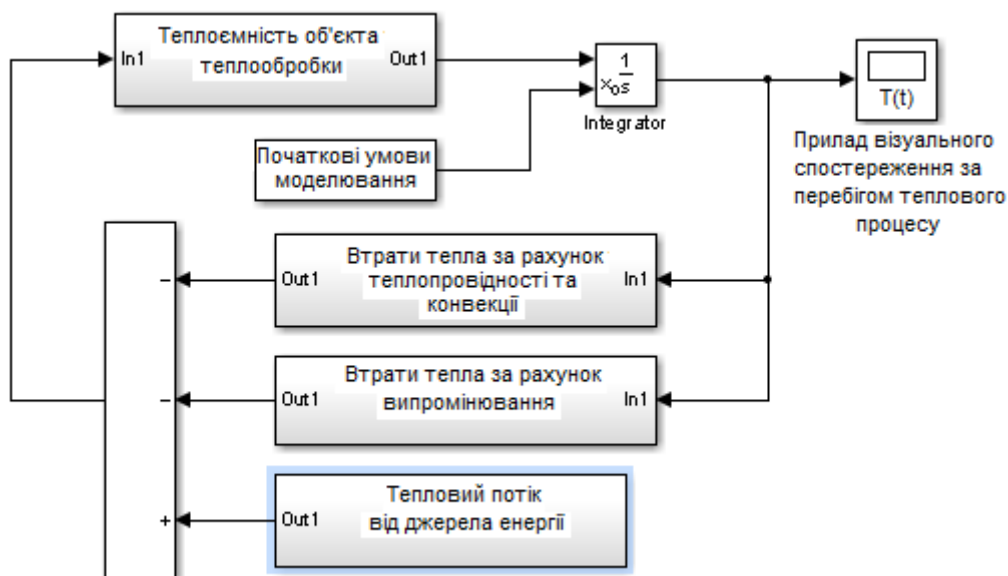


Рис. 1. Узагальнена комп'ютерна модель дослідження теплового процесу в ЕПТ

Для комп'ютерного моделювання теплового процесу в конкретному типі ЕПТ необхідно провести аналіз конструктивних параметрів машини та врахувати всі чинники, які впливають на стан її роботи.

В якості приклада виконаємо аналіз гідроструменевого способу миття посуду в автоматичній посудомийній машині (МПА). Цей спосіб ґрунтується на фізико-хімічному та гідравлічному впливі струменя розчину на поверхню посуду. Конструкція МПА забезпечує подачу миючого розчину на посуд під тиском циркуляційного насоса. Ефективність теплового процесу залежить від величини тиску на виході з розбризкувачів, їх конструкції та розмірів, температури та складу миючого розчину, відстані розбризкувачів від посуду, кута між струменем та забрудненою поверхнею, а також часу миття.

Аналіз літературних джерел дозволив створити алгоритм теплового розрахунку для посудомийної машини та виявити особливості для розроблення комп'ютерної моделі [3, 4]. Схема алгоритму наведена на рис. 2.

В міжнародній класифікації побутових посудомийних машин в якості основного показника вибрана місткість камери, що вміщує одночасно певну кількість комплектів посуду (міжнародний комплект складається з 11 предметів для прийому їжі та 6...11 предметів для сервірування столу). Камери посудомийних машин вміщують 4...16 комплектів (оптимальними вважають камери на 6...12 комплектів). Розміри камер для кожної кількості комплектів стандартизовані за об'ємом та габаритними розмірами.

Саме ці вище перераховані параметри є початковими для дослідження теплового процесу в МПА (блоки 1, 2, 11 на рис. 2).

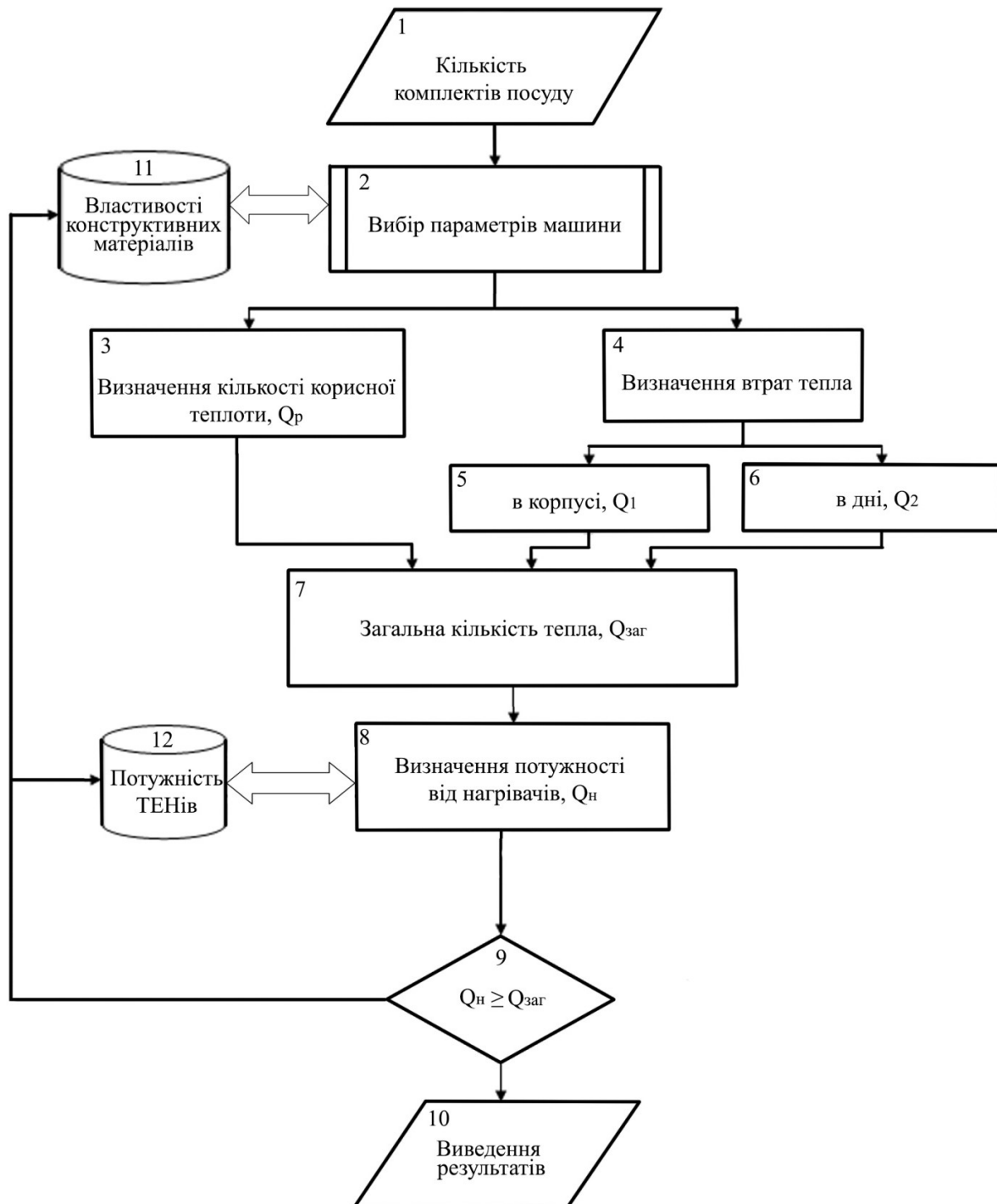


Рис. 2. Схема алгоритму для розрахунку теплового процесу в МПА

В зв'язку з тим, що теплообмін відбувається в камері посудомийної машини, то для комп'ютерного моделювання розглянемо більш детально тепловий процес роботи МПА на 8 комплектів посуду, як найбільш поширений в практиці.

Рівняння (1) в даному випадку приймає вигляд

$$Q_H \geq Q_p + \Sigma Q_{ВТР}, \quad (3)$$

де  $Q_H$  – тепловий потік від електронагрівача з врахуванням його ККД  $\eta$  та кількості  $n$ ;  
 $Q_p$  – тепловий потік для нагрівання миючого розчину до необхідної температури гарячого розчину  $T_r$ ;

$Q_{ВТР}$  – сумарні втрати теплового потоку в навколишнє середовище через камеру для миття посуду внаслідок теплопровідності та конвекції.

Кількість миючого розчину в камері для миття посуду залежить від її об'єму. Для МПА-8 приймаємо  $V = 6$  л. Згідно з вимогами стандарту температура розчину повинна бути: гарячої рідини  $T_r = (333 \pm 5)K$ ; холодної рідини  $T_x = (293 \pm 5)K$ .

Кількість теплоти  $Q_p'$ , яка витрачається на підогрів миючого розчину від  $T_x$  до  $T_r$ , визначається за формулою

$$Q_p' = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T, \text{ Дж}, \quad (4)$$

де  $c$  та  $\rho$  – питома теплоємність та густина розчину, відповідно (при  $293K$   $c = 4190$  Дж/(кг·K);  $\rho = 0,997 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>);

$V$  – об'єм підігрітого розчину,  $V = 0,006$  м<sup>3</sup>.

Добуток параметрів  $c$ ,  $\rho$  та  $V$  в формулі (4) являє собою теплоємність об'єкта  $C$  (в даному випадку миючого розчину) в диференційному рівнянні (2).

Тепловий потік буде дорівнювати (блок 3 на рис. 2):

$$Q_p = \frac{Q_p'}{\tau}, \text{ Вт},$$

де  $\tau$  – час, який витрачається на нагрівання розчину.

Втрати тепла в навколишнє середовище через корпус визначаються з урахуванням таких умов: 1) три стінки камери для миття (дві бокові і задня) та верхня поверхня мають теплову ізоляцію; 2) дно камери, дверка та нижня поверхня посудомийної машини ізоляції не мають (блоки 4...6 на рис. 2).

Тепловий потік  $Q_1$ , який витрачається на компенсацію втрат в навколишнє середовище через поверхні, які мають ізоляцію, становить:

$$Q_1 = q_1 \cdot F_1, \text{ Вт}, \quad (5)$$

де  $q_1$  – густина теплового потоку,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$F_1$  – площа поверхні теплообміну,  $\text{м}^2$ .

Густина теплового потоку визначається за формулою:

$$q_1 = K_1 \cdot \Delta T_1, \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (6)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт теплопередачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\Delta T_1$  – різниця між температурою повітря в камері  $T_1$  (приймаємо  $T_1 = T_T = 338\text{К}$ ) та температурою навколишнього середовища  $T_2$  (приймаємо  $T_2 = 293\text{К}$ ).

Коефіцієнт теплопередачі  $K_1$  в даному випадку (трьохшарова стінка камери) визначається за формулою [4]:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (7)$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт теплопередачі від повітря до внутрішньої стінки камери,  $\alpha_1 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\alpha_2$  – коефіцієнт теплопередачі від стінки корпусу машини в повітря,  $\alpha_2 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності через стінку камери,  $\lambda_1 = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності через пінополіуретанову ізоляцію,  $\lambda_2 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$\lambda_3$  – коефіцієнт теплопровідності через стінку корпусу машини,  $\lambda_3 = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$\delta_1$  – товщина стінки камери,  $\delta_1 = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

$\delta_2$  – товщина термоізоляційного матеріалу,  $\delta_2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;

$\delta_3$  – товщина стінки корпусу машини,  $\delta_3 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Для визначення площі поверхні теплообміну  $F_1$  приймаємо стандартні розміри стінок мийної камери: бокової стінки  $(0,4 \cdot 0,33) \text{ м}^2$ , задньої стінки  $(0,4 \cdot 0,33) \text{ м}^2$ , верхньої поверхні  $(0,4 \cdot 0,44) \text{ м}^2$ . Тоді загальна площа цих поверхонь буде дорівнювати  $F_1 = 0,572 \text{ м}^2$ , а тепловий потік з мийної камери, який витрачається на компенсацію втрат в навколишнє середовище через ці поверхні, становить  $Q_1 = 0,572 q_1$ .

Тепловий потік  $Q_2$  через дно мийної камери у відсік, в якому розташовані комплектуючі вироби, визначаємо згідно з формулами (5) і (6), а коефіцієнт теплопередачі від гарячої води через дно мийної камери у відсік  $K_2$  – за формулою (7). Для розрахунків приймаємо  $\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності через дно мийної камери;  $\lambda_1 = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\alpha_1$  – коефіцієнт теплопередачі від розчину до дна мийної камери;

$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\alpha_2$  – коефіцієнт теплопередачі від дна мийної камери до повітря у відсіку під мийною камерою,  $\alpha_2 = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\delta_1$  – товщина дна мийної камери,  $\delta_1 = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Значення площі поверхні теплообміну, що розглядається, приймаємо  $F_2 = 0,176 \text{ м}^2$ . Тоді  $Q_2 = 0,176q_2$ .

Загальний тепловий потік  $Q_{\text{заг}}$ , який необхідний для підігріву розчину в машині з урахуванням втрат тепла в навколишнє середовище (блок 7 на рис. 2), становить:

$$Q_{\text{заг}} = Q_p + Q_1 + Q_2$$

З урахуванням ККД електронагрівача, його потужність повинна бути не менше  $Q_{\text{заг}} \cdot \eta$  (блоки 8, 9 на рис. 2). Якщо отримана величина  $Q_{\text{заг}}$  буде менше потужності вибраного для підігріву миючого розчину нагрівача, то тепловий розрахунок завершений, в іншому випадку необхідно обрати інший нагрівач (блок 12 на рис. 2), або встановити декілька, або змінити вхідні параметри (блок 11).

Вище викладене дозволяє перетворити узагальнену комп'ютерну модель (рис. 1) в модель для дослідження теплового процесу в посудомийній машині (рис. 3).

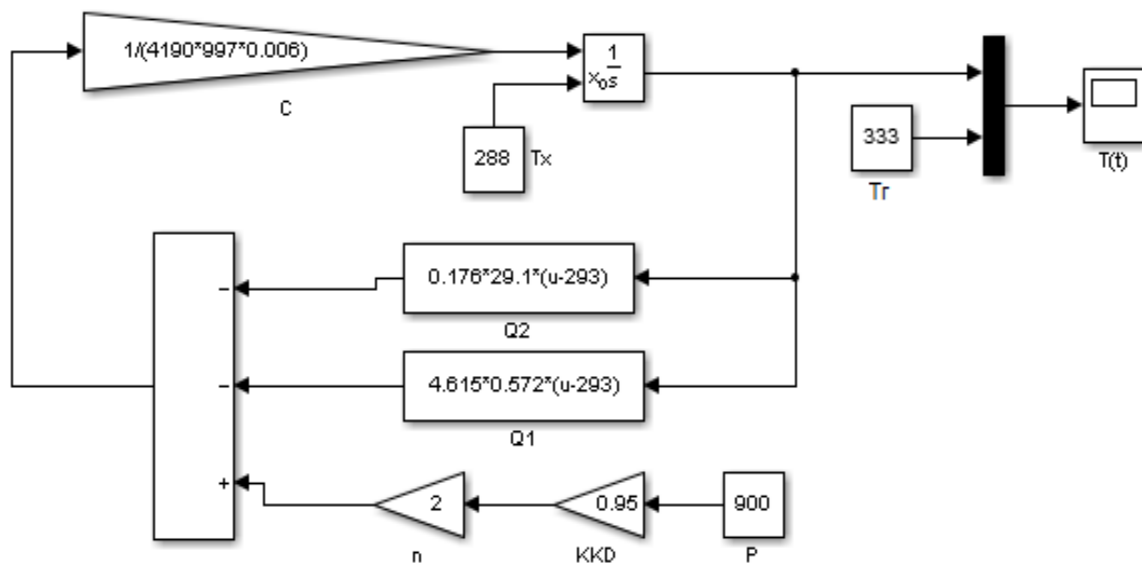


Рис. 3. Комп'ютерна модель теплового процесу в посудомийній машині

Для перевірки адекватності розробленої моделі виконано комп'ютерне моделювання на основі конструктивних параметрів лабораторного станду МПА-8 з двома нагрівачами потужністю 900 Вт кожний на 6 л миючого розчину.

Блоки моделі налаштовані на наступні значення. Блок С: параметр  $Gain = 1/(c \cdot p \cdot V)$  – складова частина виразу (4); блок Tx: параметр *Constant value* дорівнює значенню температури холодного розчину; блок Tг: параметр *Constant value* -

температура гарячого розчину; блок Q2:  $Expression = 0,176q_2$ , де  $q_2$  визначається за виразом (6) при  $K_1 = 29,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; блок Q1: параметр  $Expression = 0,572q_1$ , де  $q_1$  визначається за виразом (6) при  $K_1 = 4,615 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; блок n: параметр  $Gain = 2$  (два електронагрівача); блок КKD: параметр  $Gain = 0,95$  (коефіцієнт корисної дії нагрівача); блок P: параметр  $Constant\ value = 900$  (номінальна потужність нагрівача, Вт). Тривалість моделювання встановлена на рівні 6000 с.

Як видно з графіка змінювання  $T(t)$  (рис. 4, а), час, який витрачається на нагрівання розчину до температури  $T_g = 333\text{К}$  ( $60^\circ\text{C}$ ), становить  $\tau = 740$  с (рис. 4, б). Експериментально на реальній МПА-8 встановлено  $\tau = 750$  с. Відносна похибка становить 1,3 %, отже, розроблена комп'ютерна модель адекватно описує тепловий процес в посудомийній машині.

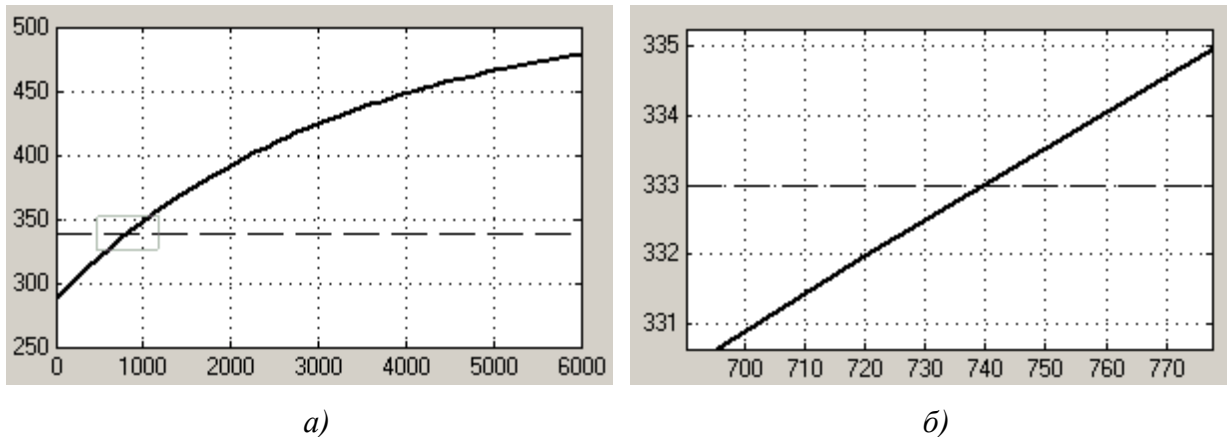


Рис. 4. Графік змінювання температури миючого розчину від часу в МПА-8

Запропонована комп'ютерна модель дозволяє досліджувати перебіг теплових процесів в залежності від різних параметрів посудомийної машини: потужності електронагрівача, розмірів камери для миття посуду, теплофізичних параметрів конструктивних матеріалів тощо. Наприклад, на рис. 5, а наведені результати комп'ютерного дослідження впливу об'єму миючого розчину, який залежить від кількості посуду, на перебіг теплових процесів в МПА-8. Результати дослідження (за допомогою масштабування графіка рис. 5, б) показують, що для нагрівання 6 л розчину необхідно 740 с, 5 л – 620 с, 4 л – 490 с, 3 л – 360 с. Тобто якщо в посудомийній машині передбачити функцію вибору кількості посуду для миття, то можна значно зменшити витрати електроенергії, необхідної для нагрівання миючого розчину.



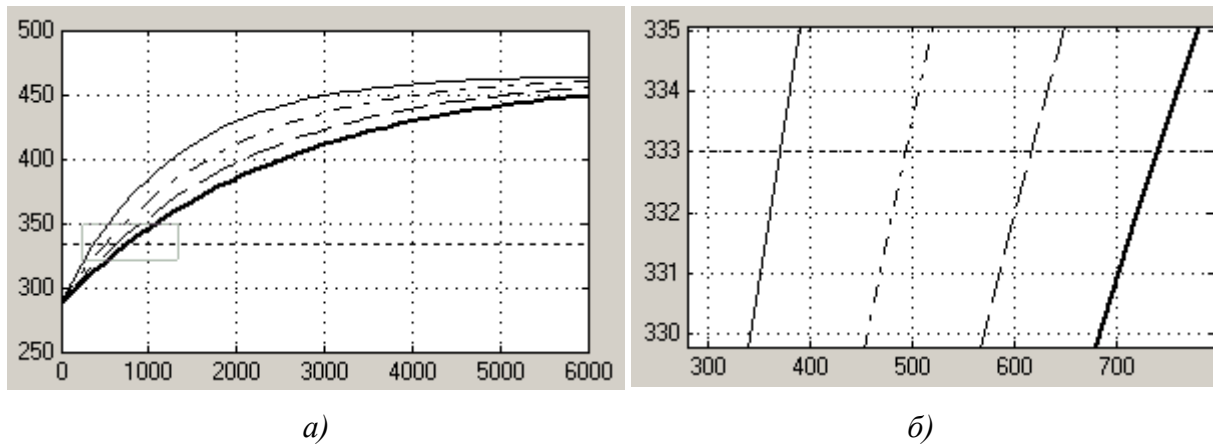


Рис. 5. Перебіг теплових процесів в МПА-8 в залежності від об'єму миючого розчину: товста лінія (—) 6 л; пунктирна (---) 5 л; штрих-пунктирна (-.-) 4 л; тонка (→) 3 л

### Висновки

Розроблений підхід до комп'ютерного моделювання теплових процесів в електропобутовій техніці дозволяє прогнозувати їх перебіг для всього конструктивного ряду однотипних машин та приладів. На прикладі посудомийної машини створена комп'ютерна модель та експериментально підтверджена її адекватність реальному процесу. Результати комп'ютерних досліджень теплових процесів дозволяють створювати комп'ютерно-інтегровані системи керування ЕПТ з енергоощадними режимами роботи.

### Список використаних джерел

1. Михайлов В. І. Теоретико-методологічні засади оцінювання якості пральних машин: Монографія / В. І. Михайлов. – К. : КНТЕУ, 2009. – 216 с.
2. Румянцев Ю. Д. Холодильная техника: Учебник для вузов. / Румянцев Ю. Д., Калюнов В. С. – СПб. :Изд-во «Профессия», 2003. – 360 с.
3. Петко І. В. Основи електропобутової техніки: навчальний посібник / І. В. Петко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла. – 2013. – 239 с.
4. Кудинов В. А. Техническая термодинамика [Текст] / А. В. Кудинов, Э. М. Карташев. – М. : Высшая школа, 2003. – 261 с.

### References

1. Mykhailov V. I. Teoretyko-metodolohichni zasady otsiniuvannia yakosti pralnykh mashyn: Monohrafiia / V. I. Mykhailov. – K. : KNTEU, 2009. – 216 s.

2. Rumiantsev Yu. D. Kholodylnaia tekhnika: Uchebnyk dlia vuzov. / Rumiantsev Yu. D., Kaliunov V. S. – SPb. : Yzd-vo «Professya», 2003. – 360 s.
3. Petko I. V. Osnovy elektropobutovoi tekhniki: navchalnyi posibnyk / I. V. Petko, O. P. Burmistenkov, T. Ya. Bila. – 2013. – 239 s.
4. Kudynov V. A. Tekhnicheskaiia termodinamyka [Tekst] / A. V. Kudynov, Э. М. Kartashev. – М. : Vysshaia shkola, 2003. – 261 s.

***Разработка компьютерных моделей тепловых процессов в электробытовой технике***

***Карплюк И. М., Петко А. К., Била Т. Я.***

*Киевский национальный университет технологий и дизайна*

***Цель.*** Создание компьютерных моделей изучения тепловых процессов в электробытовых машинах для уменьшения энергозатрат.

***Методика.*** В работе использованы методы построения математических и компьютерных моделей и экспериментальные методы исследований.

***Результаты.*** Получены обобщенная математическая и компьютерная модели тепловых процессов, позволяющие прогнозировать их течение. На примере посудомоечной машины проведен анализ конструктивных и технологических параметров, показан переход от обобщенной модели к модели конкретной машины. Проведены компьютерные исследования теплового процесса и экспериментально подтверждена адекватность полученных результатов.

***Научная новизна.*** Предложенные компьютерные модели позволяют выбирать конструктивные и технологические параметры при проектировании энергоэффективного оборудования.

***Практическая значимость.*** Полученные результаты позволяют создавать компьютерно-интегрированные системы управления с энергосберегающими режимами работы.

***Ключевые слова:*** компьютерная модель, тепловой поток, посудомоечная машина, алгоритм проектирования, расход энергии

***Development of the computer models of the thermal processes in electrical appliances***

***Karpluk I.M., Petko A. K., Bila T. Y.***

*Kyiv National University of Technology and Design*

***Purpose.*** Creation of computer models of exploring thermal processes in electrical machines to reduce energy consumption.

***Methodology.*** Methods of constructing mathematical and computer models and experimental research were used in this article.

***Findings.*** Obtained generalized mathematical and computer models of thermal processes allow to predict their course. Structural and technological parameters analysis and transition from a generalized model to the concrete model were made on example of dishwasher machine. Computer research of the thermal processes was carried out and adequacy of the results was confirmed.

***Originality.*** A computer models that allow choosing the design and processing parameters when energy efficient equipment is being designed were offered.

***Practical value.*** The results allow creation of computer integrated control systems with energy saving modes.

***Keywords:*** computer model, heat flux, dishwasher machine, design algorithm, energy consumption