

УДК 641.546.44:  
681.5

ЛАЖЕНКО А.С., БІЛА Т.Я.

Київський національний університет технологій та дизайну

## ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ МОТОР-КОМПРЕСОРОМ ПОБУТОВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА

**Мета.** Визначення раціональної структури системи автоматичного керування мотор-компресором, що забезпечує мінімальні втрати енергії при вмиканні та виході на усталений режим роботи побутового холодильника.

**Методика.** У роботі використано методи імітаційного моделювання, порівняльного аналізу, дослідження систем керування та основні положення технічної термодинаміки і теорії автоматичного управління.

**Результати.** У роботі розглянуто принцип дії холодильного агрегату побутового холодильника, схематично показані його основні елементи і взаємозв'язок з парокомпресійним циклом. Розроблено імітаційні моделі систем автоматичного керування на основі пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора, нечіткого та гібридного регуляторів. Запропоновані моделі дозволяють оцінити якість керування температурою в холодильному відділенні та визначати втрати енергії під час перехідних процесів. Приведено результати комп'ютерного моделювання перехідних процесів в системах керування температурою за рахунок зміни продуктивності мотор-компресора та отримані значення втрат електроенергії. Встановлено, що найменші втрати електроенергії при миттєвому збільшенні теплоприпливів в холодильне відділення відбуваються при застосуванні нечіткого регулятора. Визначено, що використання нечітких регуляторів в системах автоматичного керування зменшує тривалість перехідних процесів, час першого узгодження, кількість коливань, але призводить до виникнення статичної помилки та збільшує величину максимального відхилення від заданої температури в холодильному відділенні побутового холодильника.

**Наукова новизна.** Розроблено імітаційні моделі систем керування роботою мотор-компресора побутового холодильника для оцінки якості регулювання та визначення втрат електроенергії під час перехідних процесів.

**Практична значимість.** Запропоновані шляхи підвищення енергоефективності побутових холодильників за рахунок впровадження систем керування з нечіткими регуляторами.

**Ключові слова:** нечітка логіка, регулятор, імітаційна модель, перехідний процес, парокомпресійний цикл.

**Вступ.** Електропобутова техніка стала незамінним помічником в діяльності людини і дозволяє значно скоротити час виконання домашньої роботи та істотно її полегшити [1]. При цьому холодильник являється найважливішим приладом в сучасному побуті кожної сім'ї, який забезпечує якісне та тривале зберігання продуктів харчування, використовуючи функції охолодження та заморожування. В побутовій техніці використовують компресійні, термоелектричні та абсорбційні холодильники [1]. Завдяки своїм техніко-економічним показникам найбільше розповсюдження отримали побутові компресійні холодильники. Сучасні компресійні холодильники працюють у повторно-короткочасному режимі, вмикаючи та вимикаючи двигун компресора від джерела живлення. Такий режим роботи призводить до підвищених навантажень на виконавчий двигун під час пуску та збільшенню енерговитрат [2-4]. Для переходу від повторно-короткочасного режиму роботи розроблені інверторні системи керування, які дозволяють виконавчим двигунам постійно знаходитися

під напругою, регулюючи при цьому частоту напруги живлення мотор-компресора [5]. Подальшим напрямом вдосконалення систем регулювання є впровадження регуляторів, що дозволяють якісно покращити перебіг перехідних процесів та підвищити енергоефективність системи в цілому.

**Постановка завдання.** На сьогодні більша частина побутових компресійних холодильників має систему регулювання на базі релейної логіки [6]. Інверторні системи регулювання поступово входять в сучасний побут. Це пов'язано з ціною кінцевого приладу та довговічністю холодильників з релейною системою керування. Але недоліком таких систем є підвищене споживання електроенергії на охолодження продуктів внаслідок дії багатьох зовнішніх факторів. До найважливіших з них можна віднести кількість (масу) продуктів, що завантажуються в холодильну камеру, їх температуру, вологість, а також температуру навколишнього середовища. Метою даного дослідження є визначення впливу нечіткого регулятора в нелінійній стаціонарній термодинамічній системі та аналіз втрат енергії холодильного агрегату під час «холодного пуску» при використанні різних регуляторів холодопродуктивності мотор-компресора на основі імітаційного моделювання.

**Результати дослідження.** З точки зору здійснення імітаційного моделювання впливу системи автоматичного керування на ефективність роботи мотор-компресора розглянемо принцип роботи та створимо структурно-функціональну схему холодильника.

Принцип роботи компресійного холодильника заснований на тому, що робоче тіло (холодоагент) за рахунок витрати зовнішньої роботи здійснює зворотний круговий термодинамічний процес - парокompresійний цикл (ПКЦ) (рис. 1) [7].

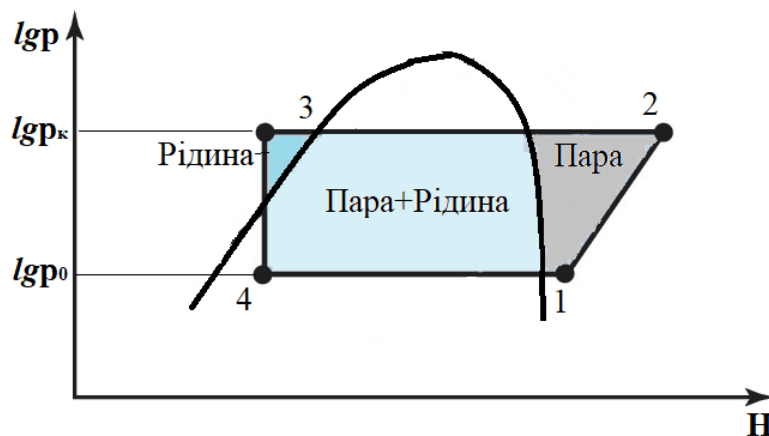


Рис. 1. Парокompresійний цикл в координатах  $\lg p$ - $H$  (тиск - ентальпія)

ПКЦ реалізується за допомогою чотирьох елементів, які утворюють замкнений холодильний контур. На рис. 2 ці елементи позначені: М-К – мотор-компресор, К – конденсатор, ТРВ – терморегулюючий вентиль, В – випарник. В ПКЦ холодоагент спочатку стискається компресором (М-К) до певного тиску (точка 1 на рис. 1), внаслідок чого його температура підвищується, потім охолоджується в конденсаторі за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем (точка 2). Далі стиснутий і холодний холодоагент розріджується та переохолоджується в ТРВ (точка 3) та випаровується у випарнику (точка 4) з відбиранням теплоти від продуктів, що охолоджуються.

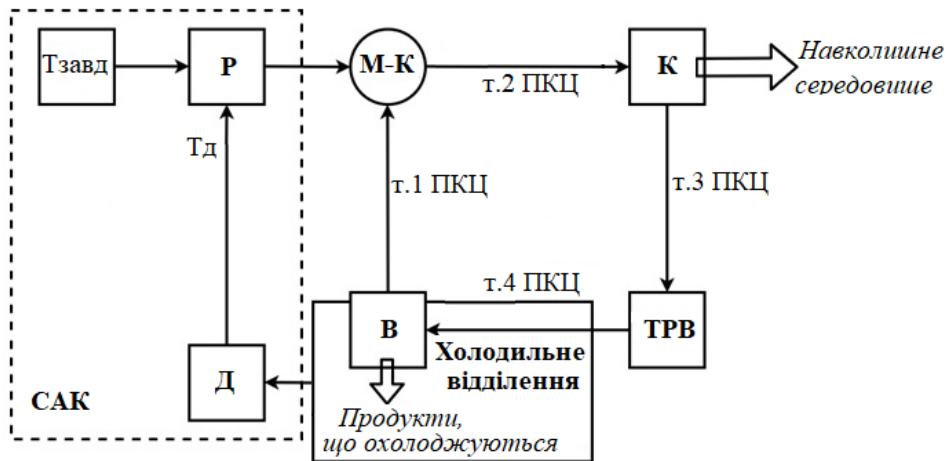


Рис. 2. Структурно-функціональна схема холодильника

Система автоматичного керування (САК) складається з регулятора Р, датчика Д дійсної температури в холодильному відділенні  $T_d$  і задавача температури  $T_{завд}$  (рис. 2). Для проведення комп'ютерного експерименту імітаційна модель повинна відповідати розробленій схемі холодильника (рис. 2). Використаємо імітаційну модель холодильного агрегату [8], яка реалізована за допомогою засобів програмного середовища MATLAB/Simulink/SimScape.

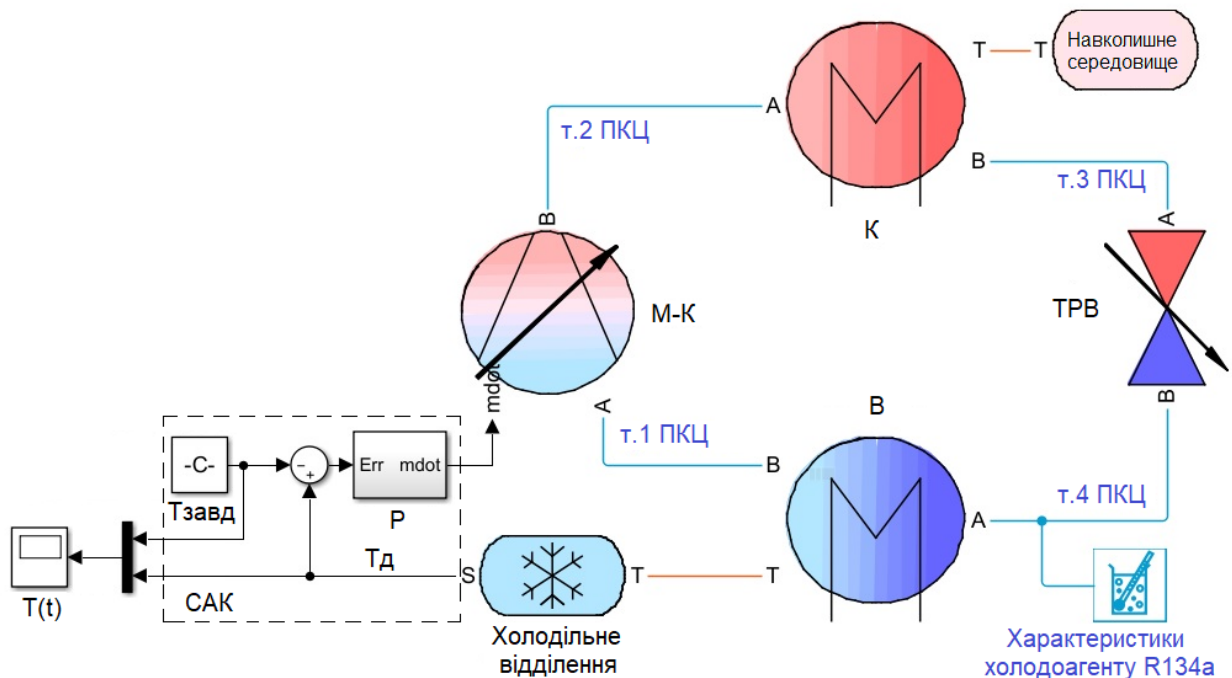


Рис. 3. Імітаційна модель холодильника

Для виконання комп'ютерного моделювання задаємо наступні умови:

- приймаємо, що мотор-компресор інверторного типу описується коливальною ланкою другого порядку;

- регулювання здійснюється за температурою в холодильному відділенні  $T_d$ ;
  - вихідною величиною регулювання є холодопродуктивність компресора;
  - холодильне відділення має об'єм  $0,25 \text{ м}^3$ , в якому миттєво збільшена величина теплоприпливів за рахунок розміщення ємності з водою (приймаємо масу  $3,8 \text{ кг}$ ) та потрапляння повітря з навколишнього середовища (приймаємо  $0,3 \text{ кг}$ ) температурою  $293 \text{ К}$ ;
  - задана температура в холодильній камері становить  $T_{завд} = 277 \text{ К}$ .
- В даній моделі компресор заданий передаточною функцією, що має вигляд:

$$Wk(p) = \frac{\left(\frac{9}{T_k}\right)^2}{p^2 + 2 \cdot \left(\frac{9}{T_k}\right)p + \left(\frac{9}{T_k}\right)^2} \quad (1)$$

де  $p$  – оператор диференціювання;

$T_k = 20 \text{ с}$  – постійна часу компресора.

Для виконання експериментальних досліджень в системі автоматичного керування (рис. 2, 3) використаємо три типи регуляторів: ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальний), нечіткий та гібридний регулятори.

ПІД-регулятор складається з пропорційної ( $K_p$ ), інтегральної ( $\frac{K_i}{p}$ ) і диференціальної ( $K_{dp}$ ) ланок, кожна з яких має власний коефіцієнт передачі. На рис. 4 представлена досліджувана система автоматичного керування інверторним холодильником з ПІД-регулятором.

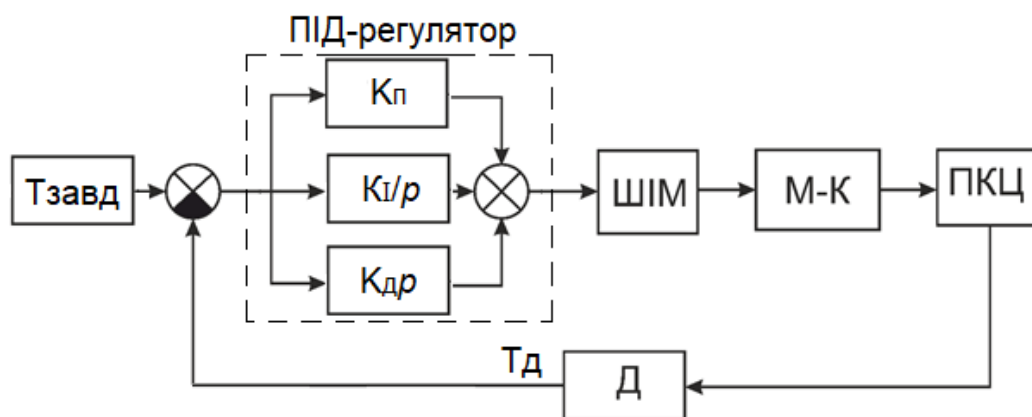


Рис. 4. Структурна схема САК з ПІД-регулятором

В системі дійсна температура  $T_d$  в холодильному відділенні порівнюється зі заданим значенням температури  $T_{завд}$ . Суматор ПІД-регулятора підсумовує сигнали  $Y_p(t)$ ,  $Y_i(t)$  і  $Y_d(t)$  та формує вихідний сигнал  $Y(t)$ :

$$Y(t) = Y_p(t) + Y_i(t) + Y_d(t) = K_p \cdot \delta(t) + K_i \cdot \int_0^t \delta(t) dt + K_d \cdot \frac{d\delta(t)}{dt} \quad (2)$$

де  $\delta(t) = T_d(t) - T_{завд}(t)$  – сигнал відхилення дійсної температури від заданої (сигнал неузгодження);

$t$  – час.

Блок широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) слугує для перетворення вихідного сигналу регулятора в силовий керуючий сигнал, що дозволяє змінювати продуктивність компресора.

Оскільки побутовий холодильник являється складною нелінійною системою, тоді доцільно включати до системи керування нелінійні пристрої, до яких відносяться нечіткі регулятори [9, 10]. Для системи регулювання температури з використанням нечіткої логіки вхідними величинами є величина неузгодженості температур  $\delta(t)$  і похідна від неї (тобто швидкість її зміни) (рис. 5). Ці сигнали спочатку перетворюються у нечіткий формат (блок фазифікації 1), обробляються за допомогою набору правил нечіткої логіки 3 та перетворюються у логічний висновок 2 (нечіткий сигнал). Потім за допомогою блоку дефазифікації 4 нечіткий сигнал перетворюється у сигнал керування.

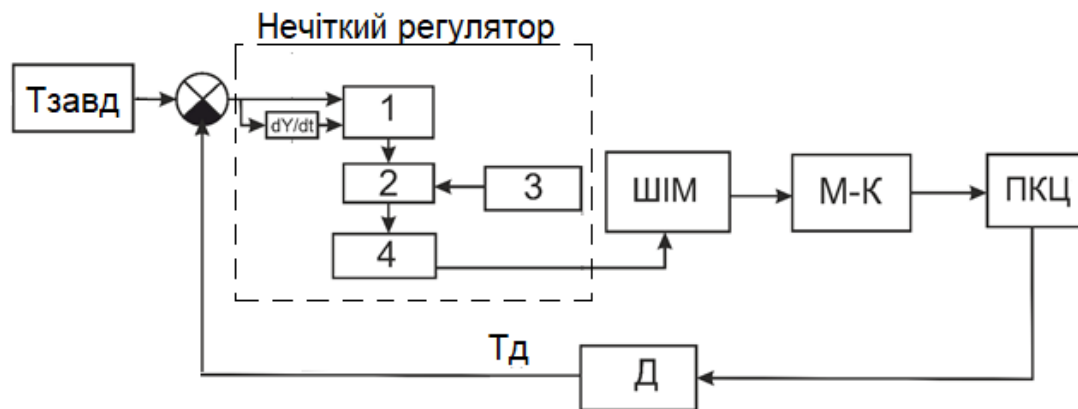


Рис. 5. Структурна схема САК з нечітким регулятором

Гібридний регулятор складається з послідовно з'єднаних ПІД-регулятора та регулятора на базі нечіткої логіки. Структурна схема гібридного регулятора зображена на рис. 6.

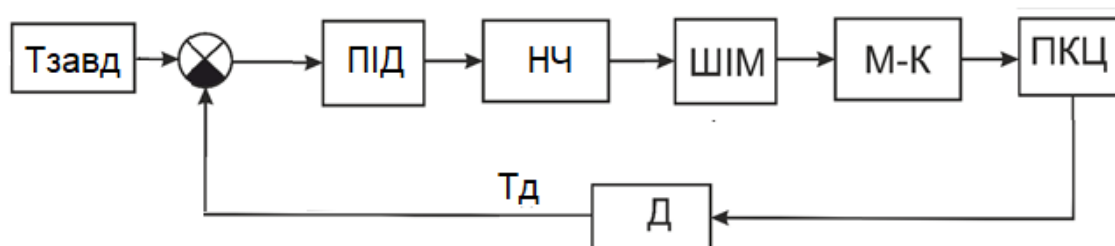


Рис. 6. Структурна схема САК з гібридним регулятором

Для того, щоб перевірити ефективність розглянутих вище регуляторів за допомогою комп'ютерного моделювання, проведено ряд експериментів і встановлено наступні параметри передаточної функції (2) ПІД-регулятора (рис. 7):

$$W(p) = -2.63 \cdot e(t) + -0.005 \cdot \int_0^t e(t) dt + -50 \cdot \frac{de(t)}{dt} \cdot \frac{48}{1 + 48 \cdot \frac{1}{\int_0^t e(t) dt}} \quad (3)$$

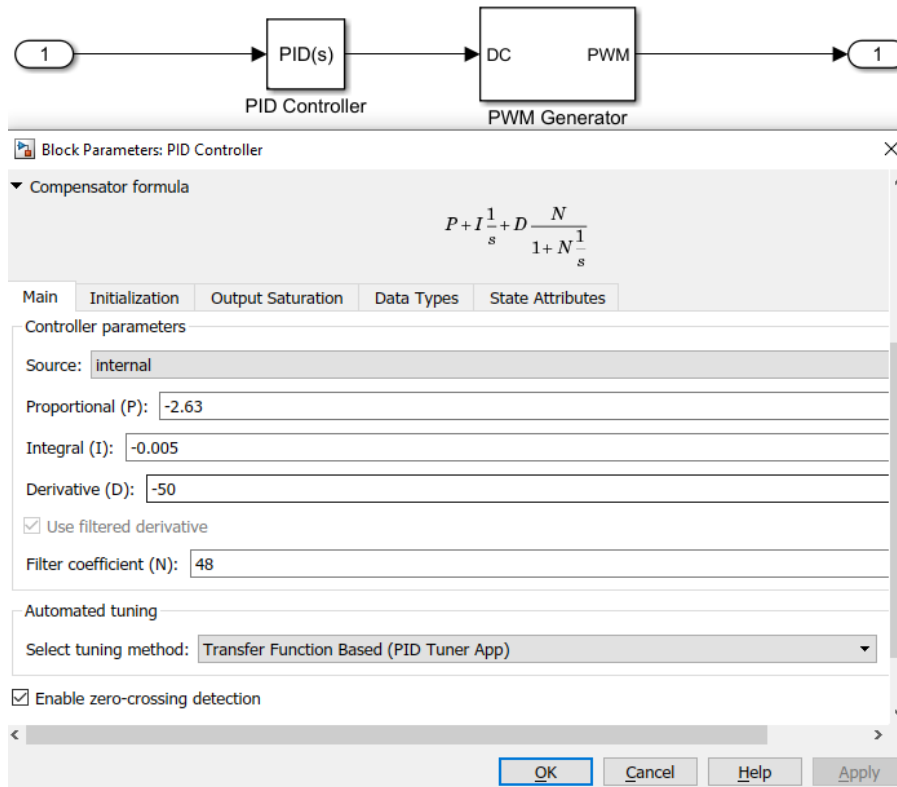


Рис. 7. Імітаційна модель та вікно налаштувань ПІД-регулятора

Імітаційна модель підсистеми «Система регулювання» з нечітким регулятором приведена на рис. 8 і складається з блоків Derivative, що являється ідеальною диференційною ланкою та блоку Fuzzy Logic Controller, що містить терми та правила нечіткої логіки. Працює система наступним чином. На вхід нечіткого регулятора надходять два сигнали: перший – різниця температур, другий – похідна від різниці температур, тобто швидкість змінювання температури. Блок Fuzzy Logic Controller налаштований на 47 правил нечіткої системи.

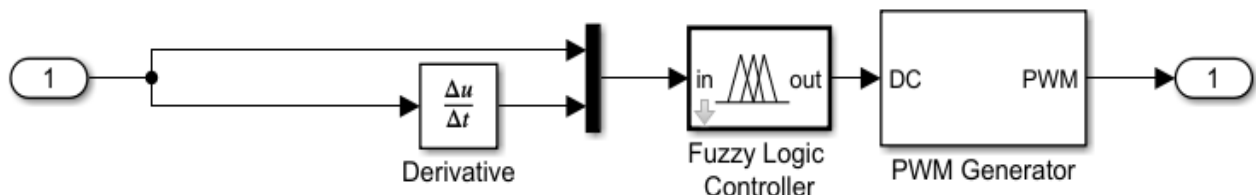


Рис. 8. Імітаційна модель нечіткого регулятора

Імітаційна модель гібридного регулятора представлена на рис. 9.

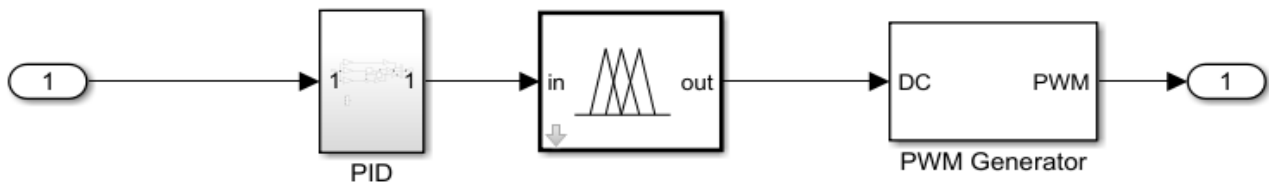


Рис. 9. Імітаційна модель гібридного регулятора

Для отримання значень втрат енергії на охолодження скористаємося формулою знаходження витрат теплового потоку  $Q$  для перехідного (нестационарного) процесу:

$$dQ = (c_{\text{пов}} \cdot m_{\text{пов}} + c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}}) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad (4)$$

де  $c_{\text{пов}}$  та  $c_{\text{в}}$  – питомі теплоємності повітря та води, відповідно ( $c_{\text{пов}} = 1012 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,  $c_{\text{в}} = 4187 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ );  $m_{\text{пов}}$  і  $m_{\text{в}}$  – маси повітря і води, відповідно (за умовою  $m_{\text{пов}} = 0,3 \text{ кг}$ ,  $m_{\text{в}} = 3,8 \text{ кг}$ );  $\tau$  – тривалість перехідного процесу.

Вдосконалюємо імітаційну модель (рис. 3) для визначення втрат енергії протягом перехідного процесу. З цією метою під'єднаємо інтегруючу ланку та два підсилювачі для виконання операції множення на суму добутків мас і теплоємностей та ділимо на  $3,6 \cdot 10^6$  для отримання значень в кВт·год. Підключаємо блок Display, на який буде виведене числове значення в кВт·год.

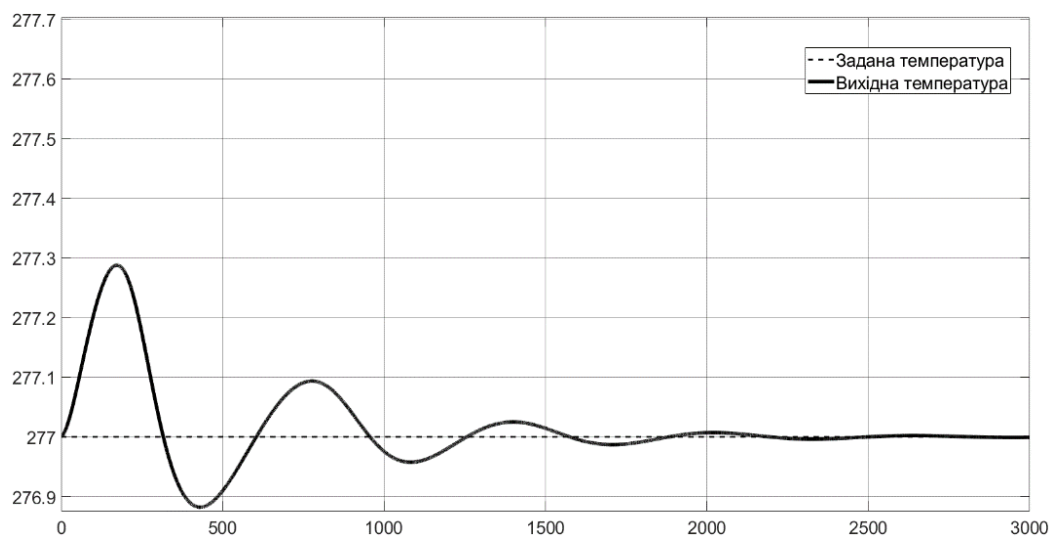
Отримані графіки комп'ютерних досліджень процесів змінювання температури в холодильному відділенні на імітаційній моделі (рис. 3) з різними типами регуляторів (моделі рис. 7-9) представлені на рис. 10.

Результати комп'ютерних досліджень представлені в таблиці.

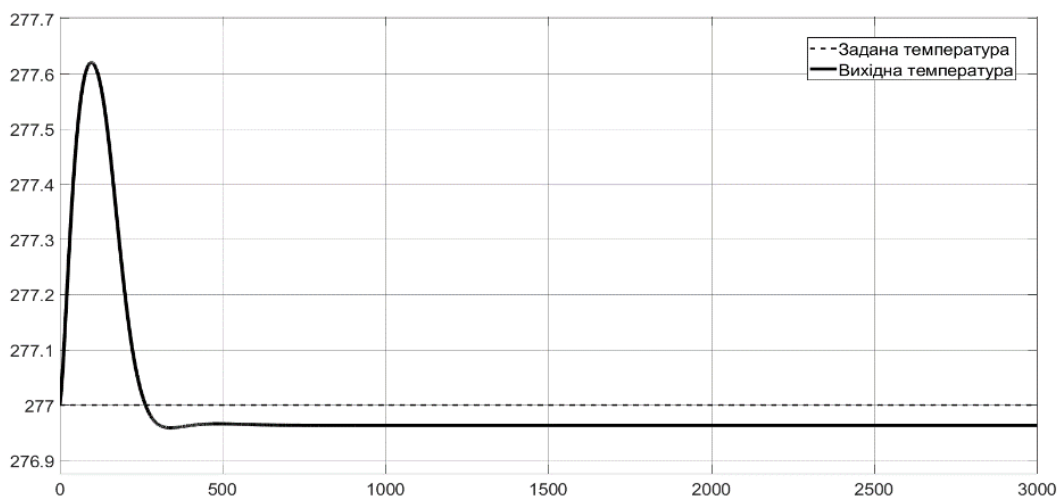
Таблиця

Результати комп'ютерних досліджень

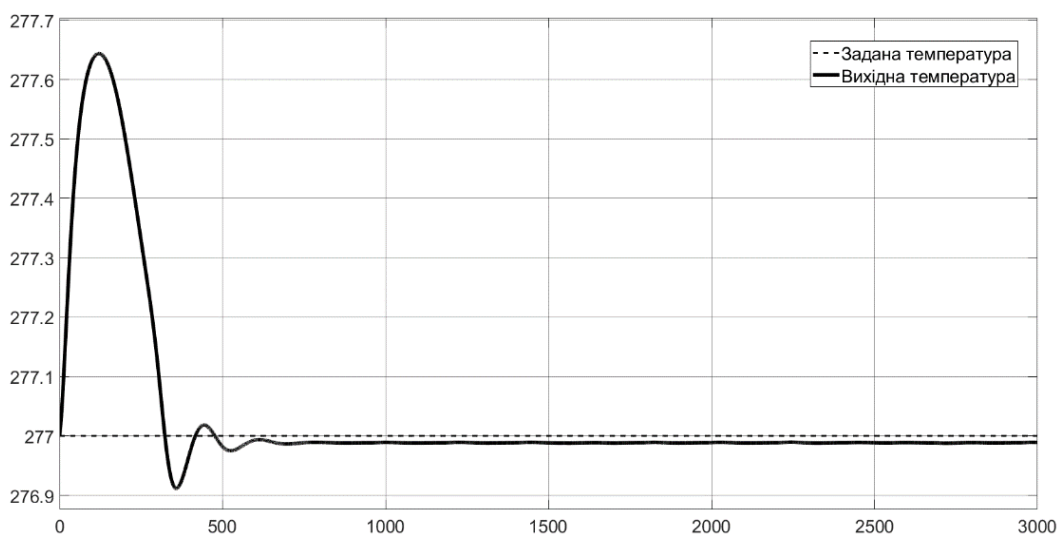
| Параметр       | Тривалість перехідного процесу $\tau$ , с | Максимальне відхилення температури $\delta$ , °C | Час першого узгодження, с | Кількість коливань | Статична помилка, °C | Втрати електроенергії, кВт·год |
|----------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------|
| Тип регулятора |                                           |                                                  |                           |                    |                      |                                |
| ПІД            | 2200                                      | 0,3                                              | 340                       | 4                  | Відсутня             | 0,086                          |
| Нечіткий       | 500                                       | 0,66                                             | 260                       | 1                  | -0,036               | 0,045                          |
| Гібридний      | 750                                       | 0,64                                             | 340                       | 3                  | -0,01                | 0,078                          |



а)



б)



в)

Рис. 10. Зміювання температури в холодильному відділенні при використанні регуляторів: а) ПД; б) нечіткого; в) гібридного

### Висновки:

1) Запропоновані імітаційні моделі дозволяють оцінити якість керування мотор-компресором за температурою в холодильному відділенні побутового холодильника з застосуванням трьох типів регуляторів та визначити втрати енергії під час перехідних процесів.

2) Встановлено, що найменші втрати електроенергії при миттєвому збільшенні теплоприпливів в холодильне відділення відбуваються при застосуванні нечіткого регулятора.

3) Використання нечітких регуляторів в САК мотор-компресором побутового холодильника зменшує тривалість перехідних процесів, час першого узгодження, кількість коливань, але призводить до виникнення статичної помилки та збільшує величину максимального відхилення від заданої температури.

### Література

1. Електропобутова техніка: підручник / І. В.Петко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла, М. Є. Скиба. – Хмельницький: ХНУ, 2017. – 213 с.
2. Електричні машини та електропривод побутової техніки: підручник / [М. Г. Попович, Л. Ф. Артеменко, О. П. Бурмістенков та ін.]. – Київ: Либідь, 2004. – 352 с.
3. Вынгра А. В. Модернизация модели судовых холодильных установок применением нечеткой логики для регулирования температуры / А. В. Вынгра. // Вестник АГТУ. – 2017. – С. 60–68.
4. Онищенко О. А. Модернизация управляемых электроприводов герметичных компрессоров / О. А. Онищенко, А. Ю. Букарос. // ОНПУ. – 2010– С. 58.
5. Shen B. Control of Air-Conditioner With Inverter Using Evaporating Pressure as Middle-Target Via Fuzzy Method [Електронний ресурс] / B. Shen, Z. Su. – 2000. – Режим доступу до ресурсу: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1514&context=iracc>.
6. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Мацько Б. М. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посіб./ Под ред. М. Г. Поповича – К.: Либідь, 2013. – 680 с.
7. Кудинов В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2003. – 261 с.

### References

1. Petko I.V, Burmistenkov O. P., T. Ya. Bila, M & Skyba Ye. (2017). Elektropobutova tekhnika [Electrical household appliances]. Khmelnytskyi: KhNU. [in Ukrainian]
2. М. Н. Popovych, L. F. Artemenko, O. P. Burmistenkov & others (2004).Elektrychni mashyny ta elektropyvod pobutovoi tekhniky [Electric machines and electric drive of household appliances]. Kyiv: Lybid.[in Ukrainian]
3. Vyngra A. V (2017). Modernizatsiya modeli sudovykh kholodil'nykh ustanovok primeneniem nechetkoy logiki dlya regulirovaniya temperatury[Modernization of the model of ship refrigeration units using fuzzy logic for temperature control]. Kerch: Vestnik AGTU. 60-68 [in Russian]
4. Onishchenko O. A & Bukaros A. Yu. (2010). Modernizatsiya upravlyaemykh elektropyvodov germetichnykh kompressorov[Modernization of controlled electric drives of hermetic compressors]. Odessa: ONPU. 58 [in Russian].
5. Shen B (2000). Control of Air-Conditioner With Inverter Using Evaporating Pressure as Middle-Target Via Fuzzy Method. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, paper 515. Retrieved from: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1514&context=iracc> Applied mechanics, 7 (75), V 3, 34-38. Retrieved from: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/44236/41479> [in Russian].
6. Popovych M.H., Lozynskyi O.Yu., Matsko B.M. & others (2013). Elektromekhanichni systemy avtomatychnoho keruvannia ta elektropyvody[Electromechanical automatic control systems and electric drives]. Kyiv.: Lybid.[in Ukrainian].
7. Kudinov V.A. & Kartashov E.M. (2003). Tekhnicheskaya termodinamika[Technical

8. Two-Phase Fluid Refrigeration (Комп'ютерна модель холодильного циклу для середовища MATLAB/Simulink) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/two-phase-fluid-refrigeration.html>

9. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

10. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. / С. Д. Штовба. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

thermodynamics]. Moscow: Vysshaya shkola[in Russian].  
8. Mathworks.com. 2020. Two-Phase Fluid Refrigeration-MATLAB & Simulink. Retrieved from: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/two-phase-fluid-refrigeration.html>.

9. Leonenkov A.V.(2005). Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH[Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. Sankt-Peterburg: BKhV-Peterburg[in Russian].

10. Shtovba S. D.(2007). Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB[Designing Fuzzy Systems Using MATLAB]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom[in Russian]

LAZHENKO ARTEM

e-mail: lazhenko.artem@gmail.com

Institute of Engineering and Information Technologies  
Kyiv National University of Technologies and Design

BILA TETYANA

e-mail: bila.ty@knutd.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8937-5244>

Researcher ID: T-5276-2018

Institute of Engineering and Information Technologies  
Kyiv National University of Technologies and Design

## ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОТОР-КОМПРЕССОРОМ ХОЛОДИЛЬНИКА

ЛАЖЕНКО А.С., БЕЛАЯ Т.Я.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

**Цель.** Определение рациональной структуры системы автоматического управления мотор-компрессором, который обеспечивает минимальные потери энергии при включении и выходе на установившийся режим работы бытового холодильника.

**Методика.** В работе использованы методы имитационного моделирования, сравнительного анализа, исследования систем управления и основные положения технической термодинамики и теории автоматического управления.

**Результаты.** В работе рассмотрены принцип действия холодильного агрегата бытового холодильника, схематически показаны его основные элементы и взаимосвязь с пароконденсационным циклом. Разработаны имитационные модели систем автоматического управления на основе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора, нечеткого и гибридных регуляторов. Предложенные модели позволяют оценить качество управления температурой в холодильном отделении и определять потери энергии во время переходных процессов. Приведены результаты компьютерного моделирования переходных процессов в системах управления температурой за счет изменения производительности мотор-компрессора и полученные значения потерь электроэнергии. Установлено, что наименьшие потери электроэнергии при мгновенном увеличении теплопритоков в холодильное отделение происходят при применении нечеткого регулятора. Определено, что использование нечетких регуляторов в системах автоматического управления уменьшает продолжительность переходных процессов, время первого согласования, количество колебаний, но приводит к возникновению статической ошибки и увеличивает величину максимального отклонения от заданной температуры в холодильном отделении бытового холодильника.

**Научная новизна.** Разработаны имитационные модели систем управления работой мотор-компрессора бытового холодильника для оценки качества регулирования и определения потерь электроэнергии во время переходных процессов.

**Практическая значимость.** Предложены пути повышения энергоэффективности бытовых холодильников за счет внедрения систем управления с нечеткими регуляторами.

**Ключевые слова:** нечеткая логика, регулятор, имитационная модель, переходный процесс, парокомпрессионный цикл.

## EVALUATION OF MOTOR-COMPRESSOR ENERGY EFFICIENCY USING CONTROL SYSTEMS OF A HOUSEHOLD REFRIGERATOR

LAZHENKO A, BILA T.

Kyiv National University of Technologies and Design

**Purpose.** Determining the rational structure of the automatic control system of the motor-compressor, which provides minimal energy losses when switching on and going to a steady state mode of operation of a household refrigerator.

**Methodology.** The methods of simulation modeling, comparative analysis, research of control systems and the main provisions of technical thermodynamics and the theory of automatic control are used in the work.

**Findings.** The paper considers the principle of operation of the refrigeration unit of a household refrigerator, schematically shows its main elements and the relationship with the steam compression cycle. Simulation models of automatic control systems based on proportional-integral-differential controller, fuzzy and hybrid controllers have been developed. The proposed models allow to evaluate the quality of temperature control in the refrigeration compartment and to determine energy losses during transients. The results of computer simulation of transients in temperature control systems due to changes in the performance of the motor-compressor and the obtained values of power losses are presented. It is established that the smallest losses of the electric power at instant increase of heat inflows in refrigerating department occur at application of a fuzzy regulator. It is determined that the use of fuzzy controllers in automatic control systems reduces the duration of transients, the time of the first negotiation, the number of oscillations, but leads to static error and increases the maximum deviation from the set temperature in the refrigerator compartment.

**Originality.** Simulation models of control systems of the motor-compressor of a household refrigerator for assessment of quality of regulation and definition of losses of the electric power during transient processes are developed.

**Practical value.** The ways to increase the energy efficiency of household refrigerators through the introduction of control systems with fuzzy regulators are proposed.

**Key words:** fuzzy logic, regulator, simulation model, transient process, vapor-compression cycle.