

УДК 621.56:004.4:621.317:681.5
DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-113-123

**ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ
МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ**

В.В. Бреус

к.ф.-м.н., доцент кафедри «Математика, фізика та астрономія»

bvv_2004@ua.fm

ORCID: 0000-0002-7535-2241

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. У статті розглянуто експериментальну розробку системи мікроконтролерного управління для компресорного холодильного обладнання, зокрема побутових холодильників. Описано сферу її застосування та можливі шляхи її вдосконалення. Представлено алгоритм роботи програми (прошивки) мікроконтролера, який здійснює контроль роботи та управління компресором. Запропоновано ідеї, які можуть зменшити енергоспоживання холодильного обладнання, зменшити знос та підвищити ресурс роботи компресора. Запропоновано шляхи масштабування, інтеграції системи з іншим обладнанням для віддаленого контролю та автоматичного налаштування режимів роботи, контролю споживання енергії холодильним обладнанням. Дана розробка надає переваги з точки зору енергоефективності та гнучкості управління, що може бути важливим для якості роботи холодильного обладнання в різних умовах експлуатації. Розроблена система може бути застосована не лише в побутових холодильниках, а й у медичній, харчовій та військовій сферах, а також в морському рефрижераторному транспорті.

Ключові слова: мікроконтролер, автоматизація, системи управління, холодильне обладнання

UDK 621.56:004.4:621.317:681.5
DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-113-123

**PROSPECTS OF USING MICROCONTROLLER-BASED CONTROL
TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF REFRIGERATION EQUIPMENT**

Vitalii Breus

p.h.d., assistant professor Mathematics, physics and astronomy

ORCID: 0000-0002-7535-2241

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The article deals with the experimental development of a microcontroller-based control system for compressor refrigeration equipment, in particular household refrigerators. The scope of its application and possible ways of its improvement are described. The algorithm of operation of the microcontroller program (firmware), which controls the operation and the compressor, is presented. Ideas are proposed that can reduce the energy consumption of refrigeration equipment, reduce wear and tear, and increase the service life of the compressor. Ways to scale, integrate the system with other equipment for remote monitoring and automatic adjustment of operating modes, and control of energy consumption by refrigeration equipment are proposed. This development provides advantages in terms of energy efficiency and control flexibility, which can be important for the quality of refrigeration equipment operation in different operating conditions. The developed system can be used not only in household refrigerators, but also in the medical, food and military sectors, as well as in marine refrigerated transport.*

Keywords: *microcontroller, automation, control systems, refrigeration equipment.*

Вступ. Роботу присвячено аналізу перспектив і переваг використання мікроконтролерного управління компресорним холодильним обладнанням, підвищенню ефективності його роботи за рахунок модернізації системи керування роботою компресора. У роботі запропоновано спосіб керування холодильним устаткуванням за допомогою мікроконтролера та наведено опис експериментальної розробки – системи мікроконтролерного керування побутовим холодильником, яка показала успішну роботу протягом 2,5 років.

Актуальність. Актуальність дослідження полягає в тому, що сучасне холодильне обладнання споживає значні обсяги електричної енергії, що впливає на витрати ресурсів та екологічну ситуацію в цілому. Традиційні методи управління компресорними холодильниками, зокрема за допомогою релейних систем, мають ряд недоліків, таких як часті пуски та зупинки компресора, що можуть призводити до його перегріву, підвищеного енергоспоживання і зносу обладнання. Не останнє місце займає проблема відсутності запасних частин до обладнання, випуск якого припинено виробником, або логістичні ланцюги постачання якого перервані. В умовах обмежених ресурсів і зростаючих тарифів на електричну енергію, важливим є впровадження нових енергоефективних технологій, які дозволяють оптимізувати роботу холодильного обладнання. Мікроконтролерні системи управління забезпечують значно більшу гнучкість, енергоефективність і можливість інтеграції з іншими сучасними технологіями. Ось чому дослідження впровадження мікроконтролерного управління для компресорних холодильників є надзвичайно актуальним як з точки зору зниження витрат енергії, так і з перспективи покращення загальної надійності роботи холодильних систем.

Метою роботи є дослідження та розробка системи мікроконтролерного управління для компресорного холодильного обладнання з використанням широко доступних електронних компонентів, яка дозволить підвищити ефективність роботи компресорів, зменшити енергоспоживання та знизити ризик перегріву компресора. Зокрема, робота зосереджена на розробці алгоритмів управління температурою та контролю роботи компресора через мікроконтролер на прикладі

побутового холодильника. Важливим завданням є оптимізація частоти включень та вимикань компресора, забезпечення стабільних температурних умов в холодильній та морозильній камерах, а також забезпечення можливості інтеграції з іншими технологіями, такими як «розумний будинок», для віддаленого контролю та автоматичного налаштування режимів роботи холодильного обладнання.

Типи холодильного обладнання. Холодильники класифікуються за різними критеріями, такими як принцип роботи, конструкція, розташування камер або технології управління. Умовно їх можна розділити на наступні типи:

1. Компресорні холодильники: Найбільш поширені. Працюють за допомогою компресора, який забезпечує циркуляцію холодоагента.
2. Абсорбційні холодильники: Використовують тепло для створення охолоджувального ефекту. Зазвичай застосовуються в готелях чи кемпінгах.
3. Термоелектричні холодильники: Працюють на основі ефекту Пельтьє. Використовуються у компактних і портативних моделях.
4. Інверторні холодильники: Оснащені інверторним компресором, що забезпечує економічне споживання електроенергії і тиху роботу.
5. Морозильні камери: Спеціалізовані пристрої для глибокого заморожування.

В роботі розглядаються компресорні холодильники.

Компресорний холодильник працює завдяки використанню термодинамічних законів та змінення агрегатного стану речовини, яка називається холодоагентом. Основні фізичні принципи роботи холодильника:

1. Випаровування: Холодоагент в рідкому стані проходить через випарник (всередині холодильника), де він випаровується, поглинаючи тепло з внутрішньої камери. Це явище базується на принципі, що випаровування вимагає енергії, яка забирається у вигляді тепла з продуктів чи повітря в холодильнику.
2. Стиснення: Газоподібний холодоагент надходить до компресора, який стискає його. При стисненні підвищується температура та тиск газу. Цей процес підпорядковується законам поведінки газів, зокрема закону Бойля-Маріотта.
3. Конденсація: Після компресії гарячий газ направляється до конденсатора (задня частина холодильника), де охолоджується і переходить у рідкий стан, віддаючи тепло у навколишнє середовище. Це базується на принципі теплообміну.
4. Розширення: Рідкий холодоагент проходить через капілярну трубку або розширювальний клапан, де його тиск знижується, що знову охолоджує його. Це створює умови для наступного циклу випаровування.

Цей цикл повторюється, забезпечуючи постійне охолодження камери та підтримання температури в межах встановлених заводом-виробником та/або користувачем значень. У компресорних холодильниках час роботи компресора зазвичай залежить від температурних умов зовнішнього простору, встановленої температури в холодильнику та об'єму системи. Більшість холодильників працюють за циклом «включення-вимикання», де компресор працює певний період (зазвичай 15-30 хвилин), після чого вимикається на час, що може коливатися від 10 до 30 хвилин. Відношення часу у включеному та вимкненому стані встановлюється температура холодильної камери та стабільність її значення, яке можна охарактеризувати дисперсією.

У підсумку холодильник є прикладом пристрою, який перетворює електричну енергію в термодинамічний процес для підтримання низьких температур.

Максимальний час неперервної роботи компресора є величиною обмеженою, для недопущення перегріву компресора, який неодмінно призводить до прискореного зносу та зменшення ресурсу роботи з подальшим виходом його з ладу.

Надмірна частота включення та вимикання компресора також може негативно позначитися на їх роботі та призвести до швидкого зносу механізмів і підвищення ймовірності виходу з ладу. Пускові струми під час увімкнення значно вищі, ніж під час роботи, що створює додаткове навантаження на електродвигун. Часті пуски можуть впливати на стан інших елементів системи, таких як клеми, реле та конденсатори.

Рекомендується включати і вимикати компресор, з дотриманням інтервалів, що забезпечують оптимальні умови для охолодження компресора між циклами роботи.

Незважаючи на постійне вдосконалення основних показників якості холодильного устаткування, енергетичні витрати на виробництво холоду залишаються високими. Актуальною задачею є впровадження нових систем управління компресорним холодильним обладнанням.

Переваги мікроконтролерного управління обладнанням.

Мікроконтролерне управління приладами та технікою має значні переваги перед традиційними схемами, зокрема в аспектах енергоефективності та економії ресурсів, гнучкості, інтеграції з іншими системами, іноді зменшення вартості виробництва і все це за допомогою різних інноваційних підходів робить їх ідеальними для використання в сучасних пристроях.

Мікроконтролери підвищують гнучкість – дозволяють програмувати поведінку пристроїв за допомогою програмного забезпечення та легко змінювати алгоритми роботи пристроїв без необхідності фізичної модифікації схем, що значно економить час та ресурси. Це особливо важливо для пристроїв, які потребують регулярного оновлення функціоналу.

Мікроконтролери часто мають малий розмір порівняно з традиційними схемами, оскільки об'єднують функції процесора, пам'яті та інтерфейсів в одному пристрої, що зменшує розміри та складність конструкції. Це знижує не лише вартість, але й ймовірність помилок при виробництві та експлуатації. Наприклад, традиційна схема може вимагати кількох мікросхем для реалізації логіки, тоді як мікроконтролер може об'єднати їх в одному чіпі.

Завдяки оптимізації роботи компонентів, мікроконтролери можуть споживати значно менше енергії, оскільки вони можуть працювати на низьких частотах і використовувати методи енергозбереження. Традиційні електронні схеми часто потребують більших потужностей для виконання тих самих функцій, що підвищує витрати енергії, що є важливим аспектом не тільки для побутової техніки, але і у промисловості. Особливо гостро питання енергоефективності стає внаслідок дефіциту потужності через російські атаки по українській енергосистемі в умовах війни та внаслідок неконтрольованого збільшення тарифів на електричну енергію з боку монополістів, яке мало місце і в мирний час.

Завдяки програмованості та можливості підключення до різних комунікаційних протоколів, мікроконтролери можуть легко інтегруватися з іншими технологіями, що дозволяє створювати розумні системи управління обладнанням. Це відкриває нові можливості для автоматизації та віддаленого контролю, що неможливо або вимагає значних зусиль в традиційних схемах.

Мікроконтролери мають високу стабільність завдяки використанню сучасних виробничих технологій, що забезпечує меншу ймовірність поломок через механічні або електричні збої порівняно з традиційними схемами, які можуть бути більш вразливими до несправностей, наприклад, внаслідок перегріву або пошкодження компонентів.

Загальний опис виробу.

Було розроблено спосіб керування двокомпресорним побутовим холодильником Атлант МХМ-1717. Принципову електричну схему представлено на рис. 1. Виробником передбачено керування компресором за допомогою сенсорів реле температури типу ТАМ133-1М-47-1.2-4.8-2-А (холодильна камера, В1) та ТАМ125-2.34.8-9-А (морозильна камера, В2). Внаслідок виходу з ладу реле температури холодильної камери спостерігались типові для компресорних холодильників проблеми – лід на задній стінці холодильника, надмірний час роботи компресора між перервами, як наслідок – підвищене енергоспоживання та надмірне нагрівання компресора.

Для реалізації системи керування було використано мікроконтролер ATmega328P-AU у складі готової плати Arduino Nano V3. Вибір зумовлено виключно наявністю, доступністю цієї моделі, відкритою архітектурою та наявністю готових до використання бібліотек для спрощення програмування, які дозволяють сконцентруватись на основній програмі не відволікаючись на низькорівневе програмування.

У розрив кабелю реле температури (рис. 1, позначка *L *М) було встановлено звичайне електромагнітне реле з напругою котушки 24 В та необхідними допоміжними компонентами: транзисторним ключем, захисним діодом. Реле температури при цьому в складі системи використовується лише в якості вимикача (рис. 1, В1, 6).

Принципова електрична схема пристрою управління представлена на рис. 2. В правій частині схеми в рамках позначені контакти плати Arduino Nano, до яких під'єднуються провідники. Так, DO2 – DO8 є цифровими виходами (digital output) з відповідними номерами, VCC – вихід внутрішнього стабілізатора плати для живлення DHT11.

Живлення реле реалізоване з використанням типової схеми без трансформаторного блоку живлення з конденсатором, що гасить та стабілізує на 24 В. Оскільки використання такого блоку живлення несе певні ризики (відсутність гальванічної розв'язки від мережі змінного струму), для з'єднання з Arduino використовується оптопара. Такий захист є важливим, оскільки реалізація передбачає підключення мікроконтролера через встановлений USB-порт до комп'ютера (без використання програматорів) з метою оновлення прошивки та перепрограмування.

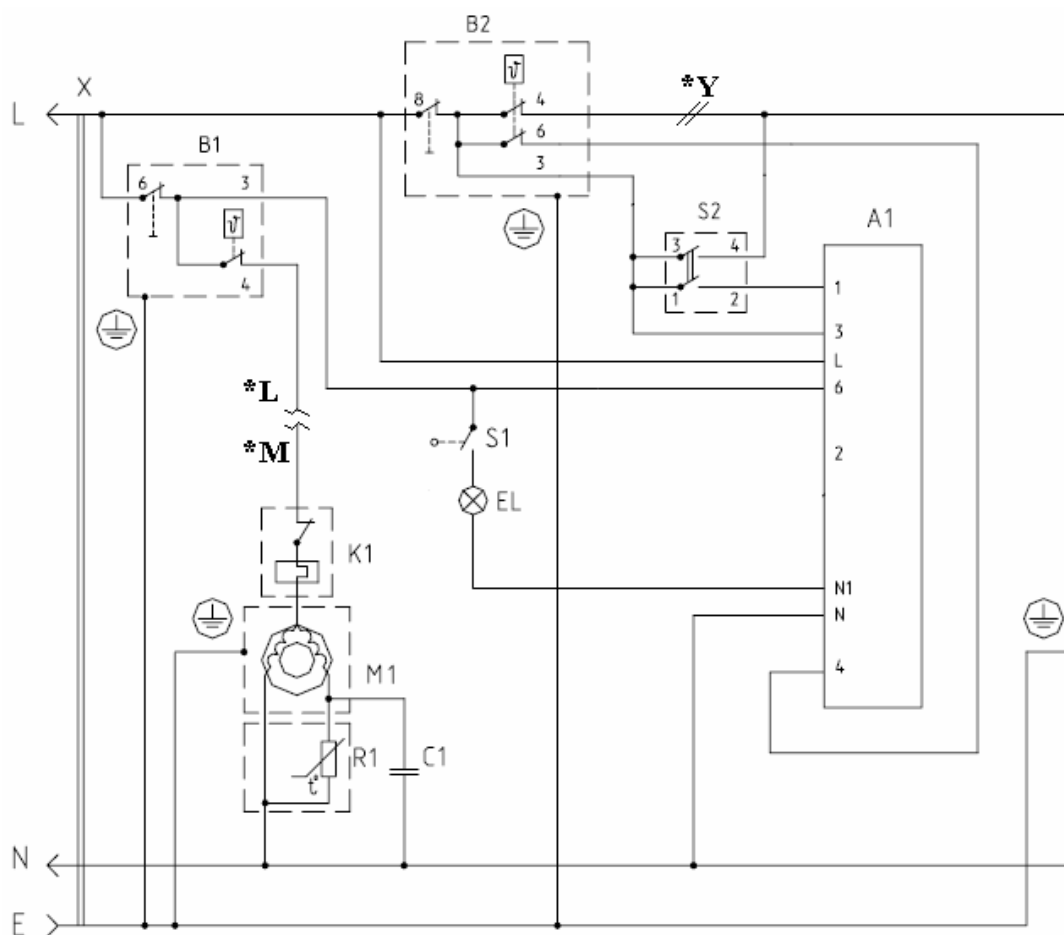


Рис. 1. Принципова електрична схема побутового холодильника

Замість класичного підходу для холодильного обладнання, коли вимірюється температура холодоагента в контурі, для контролю температури було використано стандартний датчик вологості та температури DHT11, заведений в холодильну камеру на плоскому шлейфі. Альтернативним способом доопрацювання існуючих моделей є заведення кабелю датчика температури в холодильну камеру через трубку відведення конденсату. Недоліком цього датчика можна назвати необхідність його калібрування. Перевагою будемо вважати доступність даних щодо температури і вологості одночасно, що дозволяє, наприклад, зробити висновок про відкриття дверей холодильної камери по різкій зміні температури і вологості, не використовуючи окремий датчик відкриття дверей.

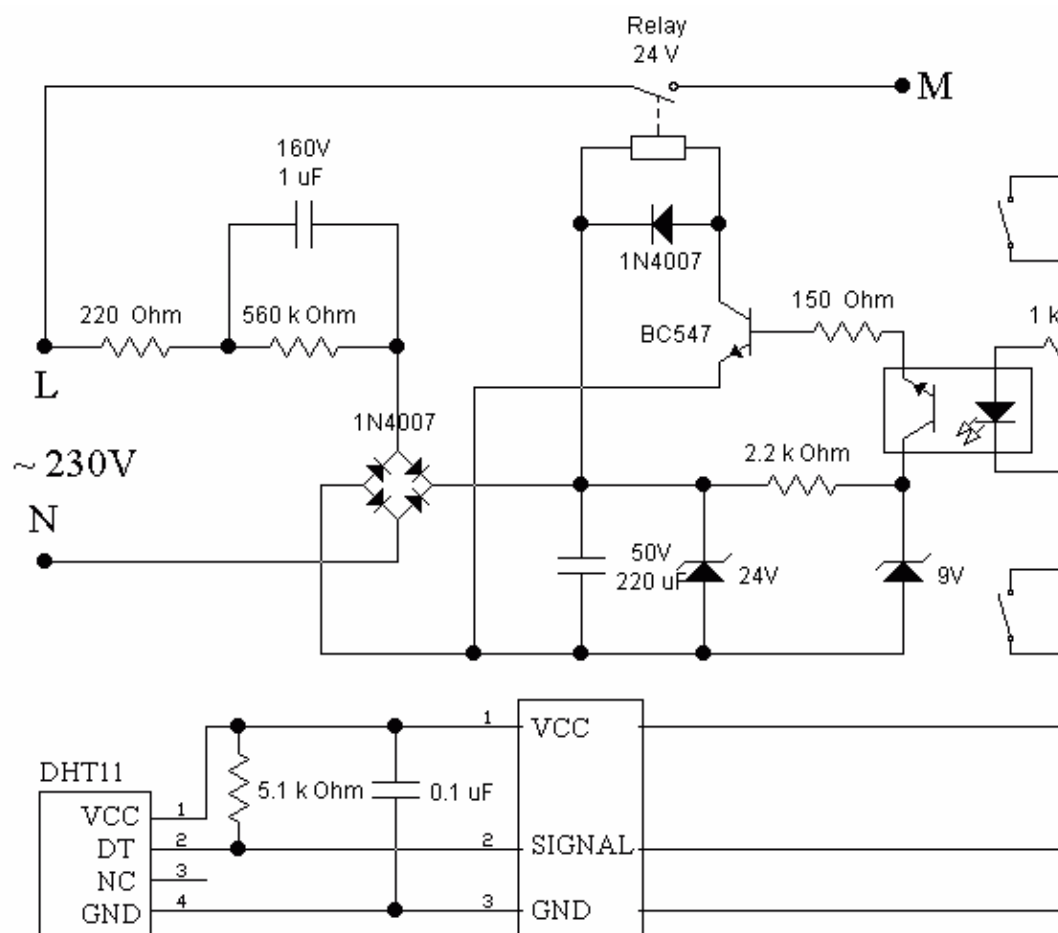


Рис. 2. Принципова електрична схема пристрою управління

Програмний код. Програмний код, розроблений в Arduino IDE, передбачає наступний функціонал:

- контроль температури кожні 2 секунди;
- увімкнення компресора через реле у випадку якщо температура перевищує допустиме значення;
- вимкнення компресора, якщо температура достатньо низька;
- заборону зміни стану реле у випадку якщо після останнього перемикавання минув час менший ніж задане значення;
- робота двох дебаг-режимів «завжди вимкнено» та «завжди увімкнено» у випадку замикавання відповідних контактів мікроконтролера.

Блок-схему алгоритму роботи програми наведено на рис. 3.

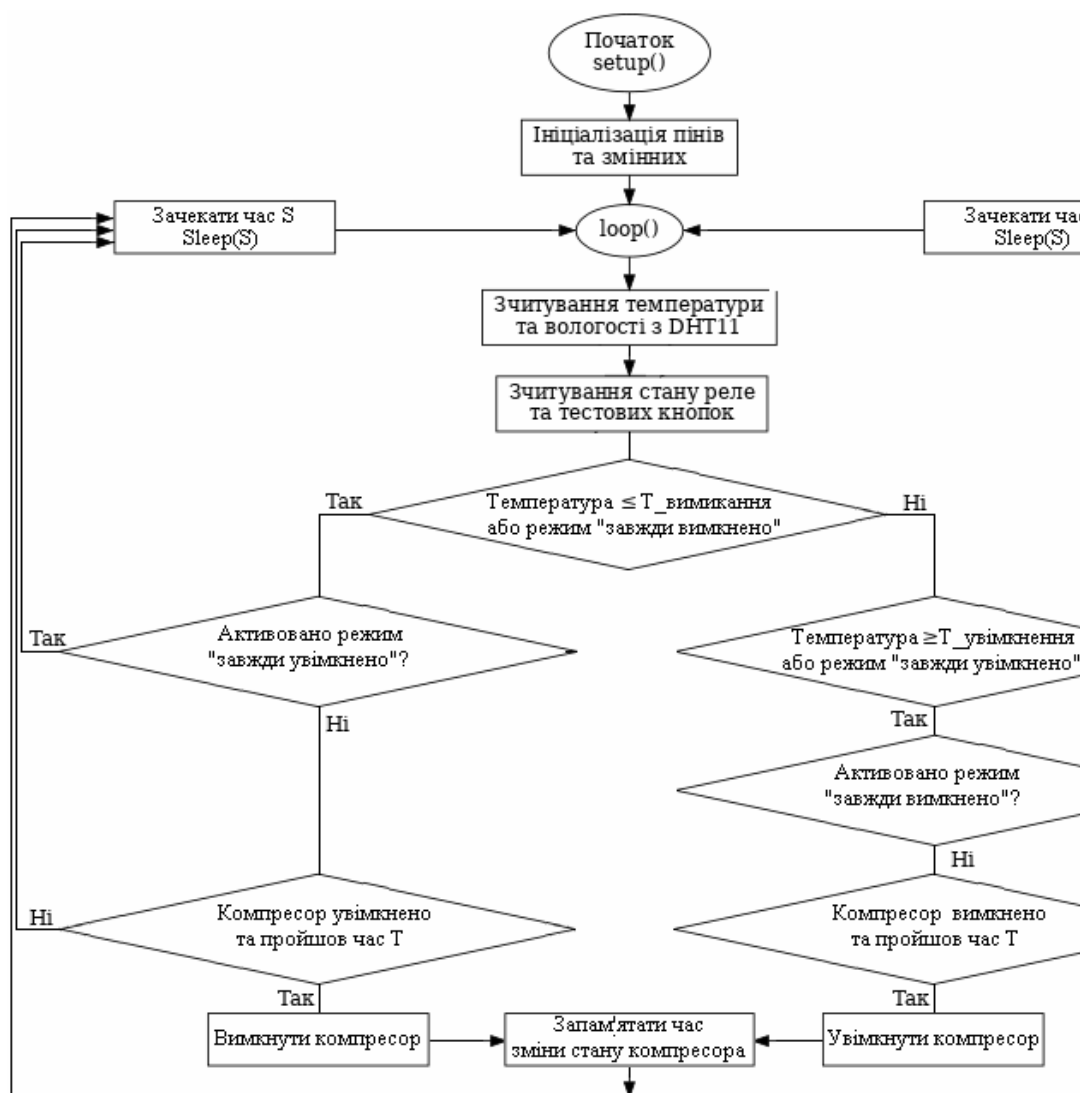


Рис. 3. Блок-схема алгоритму роботи програми

Температура увімкнення $T_{\text{увімкнення}}$ та вимкнення $T_{\text{вимкнення}}$, а також граничний час неперервної роботи компресора T та час затримки між циклами S задається константами у коді програми. Інтервал між температурами має бути не меншим ніж 4-5 градусів для уникнення частого перемикавання.

Аналіз отриманих результатів та можливі шляхи вдосконалення системи. Розроблена система мікроконтролерного керування допускає доопрацювання та масштабування, яке обмежується лише кількістю інтерфейсів обраного мікроконтролера. Для керування одночасно і холодильною, і морозильною камерою достатньо додати ще одне реле в розрив ланцюга увімкнення компресору

морозильної камери (рис. 1, позначка *Y) та завести ще один датчик температури. У зв'язку з великою різницею температури в верхній та нижній частині холодильної камери великих об'ємів (яка може досягати навіть 10 градусів) можна встановити більше датчиків температури.

Розроблена система успішно працює 2,5 роки та показала свою надійність. За час експлуатації було виявлено 2 недоліки: необхідність початкової калібровки термодатчика і налаштування та необхідність зміни констант, які задають температури, двічі на рік для підтримання одних і тих самих температурних умов протягом року.

Доповнення системи модулем годинника реального часу на базі мікросхем DS1302 або PCF8563 дозволить запрограмувати різні режими роботи в залежності від сезону, або навіть часу доби. Доцільним є дослідження можливої економії електричної енергії у випадку використання двотарифного лічильника день/ніч разом з системою керування, запрограмованою на більш інтенсивне споживання в нічні години та менш інтенсивне вдень.

Зменшити витрати електричної енергії можна також шляхом підтримки температуру в холодильнику на оптимальному рівні (більш низька температура вимагатиме інтенсивнішої роботи компресора, що збільшить витрати енергії).

Доповнення системи модулем SD карти пам'яті дозволить записувати показники роботи холодильного обладнання, такі як температура та час фактичної роботи компресора з обраним інтервалом часу для подальшого аналізу. В такому разі доцільним є встановлення цифрового ваттметра змінного струму з метою подальших досліджень кількості фактично використаної електричної енергії в залежності від встановленої температури холодильної камери, температури в приміщенні, часу доби, пори року, тощо.

Доповнення системи модулем комунікації дозволить інтегрувати холодильне обладнання до промислових систем управління або побутових систем «Розумний дім» з можливістю віддаленого керування режимами роботи та автоматичним реагуванням на нештатні ситуації, такі як аномальне збільшення часу неперервної роботи компресора (що може свідчити про проблеми з теплоізоляцією, незакриті двері, несправність самого компресора, тощо). Можливим є інтегрування складних функцій, таких як аналіз даних та адаптивне регулювання, що значно покращує користувацький досвід.

Висновки. Мікроконтролерне управління дозволяє оптимізувати роботу компресора завдяки точнішому контролю температури та знизити енергоспоживання холодильного обладнання. Завдяки можливості програмування, система може адаптуватися до різних умов експлуатації, що дозволяє зменшити частоту пусків і зупинок компресора. Використання мікроконтролера забезпечує високу гнучкість системи, дозволяючи інтегрувати її з іншими технологіями, забезпечивши віддалене керування та моніторинг.

Запропонована розробка дає змогу керувати холодильним устаткуванням в різних режимах роботи, забезпечуючи безперервне підтримання необхідного температурного режиму, дотримання вимог до способів зберігання продуктів харчування, матеріалів, хімічних речовин.

Холодильне обладнання – ключовий елемент в забезпеченні оптимальних умов зберігання продуктів і матеріалів, який використовується в різних сферах діяльності. Результати даного дослідження можуть мати впровадження у виробництво побутових холодильників, у харчовій промисловості, медичній галузі, сфері послуг, торгівлі, обладнання для використання у військових операціях та обладнання для морського рефрижераторного транспорту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тітлов О.С., Горикін С.Ф. Холодильне обладнання підприємств харчової промисловості: Навч. посібник. Львів : Новий світ 2000, 2011. 286 с.
2. Security Electronics Circuits Manual. 1998. ISBN: 978-0750630078
3. Rabaey, Jan M. Digital Integrated Circuits: A Design Perspective. Prentice Hall, 1996. ISBN 978-0131786097.

REFERENCES

1. Titlov O. S., Gorykin S. F. *Refrigeration equipment for food industry enterprises*: Lviv: Novy Svit 2000, 2011. 286 pp.
2. Security Electronics Circuits Manual. 1998. ISBN: 978-0750630078
3. Rabaey, Jan M. Digital Integrated Circuits: A Design Perspective. Prentice Hall, 1996. ISBN 978-0131786097.

Стаття надійшла до редакції 22.09.2025

Посилання на статтю: Бреус В.В. Перспективи використання мікроконтролерного управління для підвищення ефективності холодильного устаткування // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 4 (78). С. 113-122. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-113-122.

Article received 22.09.2025

Reference a Journal Artic: Breus V. Prospects of using microcontroller-based control to improve the efficiency of refrigeration equipment // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 4 (78). P. 113-122. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-113-122.