

## МЕТОДИКА ТА ПРИСТРІЙ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТЕСТУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОГО ХОЛОДИЛЬНОГО ПРИЛАДУ

Байдак Ю.В., канд. техн. наук, доцент  
Одеська державна академія холоду, м. Одеса

*В роботі наведена математична модель методики тестування енергетичної ефективності холодильного приладу, яку покладено в основу виготовленого пристрою його випробувань за місцем використання.*

*The mathematical model of refrigeration unit energy efficiency testing methods, which served the basis for manufacturing of testing device intended for tests conducting on the place of refrigeration unit application is given in the article.*

Ключові слова: компресійний холодильний прилад, холодильна машина, енергетична ефективність, тепловий потік.

**Вступ.** Останнім часом проблема з удосконалення нормативної бази ЄС від 1992 року за якою здійснюється маркування енергоспоживання побутовими компресійними холодильними приладами (КХП) та встановлення класу їх енергетичної ефективності (ЕЕ) залишається не вирішеною. Європейська асоціація виробників побутових холодильних приладів (CECED) вказує, що, незважаючи на введення нових маркувань класів енергоспоживання, значна частина споживачів не сприймає їх і, тому, потрібно наново переглядати існуючі можливості щодо його визначення та проведення [1]. З метою гарантувати ефективність енергетичного маркування холодильних приладів, ЄС пропонує проведення повторних і навіть регулярних визначень класів енергетичної ефективності холодильних приладів безпосередньо за місцем їх використання у споживача. В умовах постійного зростання вимог щодо підвищення енергетичної досконалості побутових холодильних приладів, як потужних споживачів електрики, Європейським парламентом у 2008 році передбачено зменшення ними енергоспоживання на 20 % до 2020 року порівняно з 1990 роком і, у першу чергу, шляхом покращення ефективності її використання [2]. Відповідні кроки прийняті і Україною, як членом Всесвітньої Організації Торгівлі [3]. Причому обидві сторони визнають, що встановлення класу ЕЕ холодильного приладу повинно проводитись за обмеженою сукупністю його показників, які легко отримати без втручання у герметичну систему холодильних машини (ХМ) із зовні, тобто за непрямыми ознаками.

**Аналіз попередніх досліджень.** Огляд фахових джерел інформації щодо вирішення проблеми із визначення впливових параметрів, критеріїв ЕЕ КХП, розробки інженерної (спрощеної) методики чисельного розрахунку, наприклад — питомого електричного холодильного коефіцієнту ХМ із герметичним компресором за непрямыми ознаками її роботи, і, тим більше, побудови портативного пристрою — тестера, придатного для проведення випробувань за місцем використання КХП, вказує на її складність і невирішеність. Найбільш перспективним з відомих розглядається метод непрямого визначення ЕЕ КХП через відношення холодильної продуктивності компресора

$$Q_k = \int_0^{\tau} G_a q_0 d\tau,$$

де  $G_a, q_0$  — масова витрата і холодильна продуктивність хладону, до споживаної двигуном компресора електричної енергії  $W = \int_0^{\tau} P_1 d\tau$  за визначений проміжок часу  $d\tau$ .

Заснований на сукупності параметрів, які можливо отримати тільки шляхом розгерметизації ХМ, метод постає незручним при застосуванні масово. Інші методи, запропоновані у ДСТУ та впроваджені у виробництві, потребують складних приладів і лабораторних умов щодо їх проведення. До того ж вони також потребують розгерметизації ХМ. Слід зауважити, що розгерметизацію ХМ, із вилученням шкідливого хладону, здійснюють для встановлення датчиків тиску на окремих її ділянках. У подальшому, для проведення випробувань ЕЕ КХП, герметизацію відновлюють та завантажують новий об'єм хладону. Таким чином випробування ЕЕ здійснюватимуть вже на іншому КХП, який дещо відрізнятиметься від його прототипу. Після завершення випробувань, КХП відновлюють у зворотному порядку.

**Мета роботи.** Визначення питань, які впливають на показник енергоспоживання КХП тісно пов'язане з аналізом природної досконалості його компонентів — холодильної машини (ХМ), товщини і типу використаної теплоізоляції шаф охолодження, ЕЕ застосованого хладону та виконання споживачем умов експлуатації приладу. Що ж стосується ЕЕ КХП, то питання дещо складніше. На наступний час відсутні методика і пристрій з енергетичного тестування КХП за непрямыми ознаками його роботи без розгерметизації ХМ. Метою роботи є усунення визначених недоліків існуючих методик випробувань ХМ шляхом їх удосконалення та розробка на її підставі пристрою енергетичного тестування КХП.

**Матеріал і результати досліджень.** ХМ — головна складова КХП яка здійснює незворотний процес відбору і трансформації теплового потоку із ізольованої за теплом об'єму шафи охолодження у більш тепле зовнішнє середовище при відповідних змінах температур. Тому саме температура і має бути прямою ознакою для визначення ЕЕ КХП. Оскільки при дослідженні ЕЕ ХМ обов'язковим постає визначення величини продуктивності компресора  $Q_k$ , яка є мірою пересування компресором маси хладону у холодильній машині за допомогою роботи електричного двигуна, то до загальної кількості теплового потоку, вилученого із замкненого об'єму холодильника  $Q_{заг} = Q_0 + Q_{ен}$ , потрібно додавати втрати потужності у електричному двигуні  $Q_{АД} = P_1 (1 - \eta_{АД})$  ХМ і, після цього, в обсязі  $Q_k = Q_{заг} + Q_{АД}$  він вже відводиться у зовнішнє середовище теплообмінним конденсатором. У виразах застосовані:  $Q_0$  — загальний приток тепла із оточуючого середовища до ізольованих за теплом шаф охолодження;  $Q_{ен}$  — приток тепла від об'єкту охолодження в шафах та на мережі трубопроводів тепломеханічної системи (як правило не перевищує  $0,5 Q_0$ );  $P_1$  — активна потужність спожита електричним двигуном із мережі живлення;  $\eta_{АД}$  — коефіцієнт корисної дії електричного двигуна привода компресора. На підставі наведених теоретичних відомостей, припустимо вважати основним показником енергетичної досконалості ХМ питомий електричний холодильний коефіцієнт, або — коефіцієнт корисної дії холодильного циклу  $\epsilon_e = \frac{Q_{заг}}{P_1}$ .

Чим коефіцієнт більше, тим досконаліше ХМ та КХП.

Оскільки загальний приток тепла із оточуючого середовища до корисного об'єму шаф охолодження потрапляє у випарник ХМ та паром хладону переносяться до теплообмінного конденсатора при працюючому —  $\Delta Q_p$  і вимкненому —  $\Delta Q_n$  компресорі, можна записати, що  $Q_0 = \Delta Q_p + \Delta Q_n$ . Теоретично приток тепла до випарника і пару хладону, за рис. 1, становить

$$\Delta Q_p = k_p F \left[ (t_{об} - t_{бал}) \int_0^{\Delta \tau_p} dt - (t_1 - t_{бал}) \int_0^{\tau_p} e^{\alpha_p \tau} d\tau \right] = k_p F \left[ (t_{об} - t_{бал}) \Delta \tau_p - \frac{1}{-\alpha_p} (t_1 - t_{бал}) (1 - e^{\alpha_p \Delta \tau_p}) \right],$$

$$\Delta Q_n = k_n F \int_0^{\Delta \tau_n} (t_{об} - t_2) e^{\alpha_n \tau} d\tau = \frac{k_n F}{\alpha_n} (t_{об} - t_2) (1 - e^{\alpha_n \Delta \tau}).$$

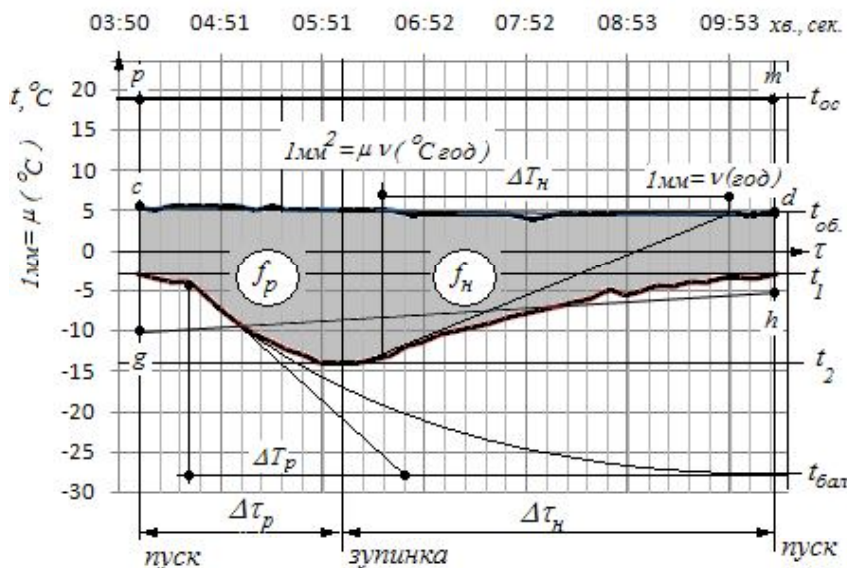


Рис. 1 – Цикл роботи ХМ типу КШ-160 в упорядкованому режимі, отриманий експериментально

Визначення складових теплового потоку передбачає заздалегідь відомі значення сталих часу перехідного процесу зміни температури на робочій  $\frac{1}{-\alpha_p} = T_p$  і неробочій  $\frac{1}{\alpha_n} = T_n$  ділянках циклу охолодження холодильної машини, працюючої в упорядкованому режимі. В свою чергу, сталі часу

$$T_p = \frac{Gc}{\Delta Q_{зас}^p + k_p F}, \quad T_n = \frac{Gc}{k_n F},$$

де  $\Delta Q_{зас}^p$  — загальна кількість тепла, яке притікає до випарника і примусово висмоктується компресором на протязі робочої частини циклу ХМ (збурена роботою компресора);

$c, F, G$  — питома теплоємність, площа поверхні і вага випарника відповідно є залежними величинами від коефіцієнтів тепловіддачі  $k_p$  і  $k_n$  із повітря холодильних шаф у випарник, які до того ж складним чином пов'язані із властивостями матеріалу, формою та поверхнею випарника і суттєво залежать від його температури.

Виходячи з математичного пояснення сталої часу, яка дорівнює піддотичній до графіку зміни температури, її визначення можливо здійснити графоаналітичним методом із застосуванням результатів моніторингу температури  $t_2$  в реперній точці у морозильній шафі і на протязі одного циклу роботи холодильної машини, рис. 1. Такий підхід дещо складний і впливає на теоретичні засади щодо обґрунтування методу за яким повинен працювати стаціонарний прилад визначення питомої електричної холодильної продуктивності КХП і, тому, потребує аналітичного розв'язання.

Відомо, що рівняння теплового балансу, складене для внутрішнього об'єму випарника відносно його температури в упорядкованому режимі на інтервалі часу від початку включення компресора і до моменту його вимкнення — при температурі  $t_2$ , рис. 1, має рішення виду

$$t = t_1 e^{-\frac{\tau}{T_p}} + t_{\text{бал.}} \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T_p}} \right), \quad (1)$$

де  $t_1$  — значення температури у реперній точці морозильної камери на початку включення компресора;

$t_{\text{бал.}}$  — значення температури поверхні випарника на ділянці випаровування хладону в момент вимкнення компресора;

$\tau$  — час перехідного процесу.

Оскільки сталі часу більшості КХП пропорційні масі, питомої теплоємності об'єктів охолодження та зворотно пропорційні коефіцієнту тепловіддачі у випарник і його поверхні охолодження, то вони відносно тривалі. Стала температура охолодження може бути досягнутою через багато годин та при відсутності терморегулятора.

З метою скорочення часу дослідження, яке до того ж не може бути більше ніж тривалість робочого циклу компресора, сталу температуру можна приблизно визначити за початковою ділянкою кривої охолодження. Для цього доцільно скористатися розрахунком залежності  $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = f(\tau)$ . Так, після диференціювання рівняння (1), отримуємо залежність швидкості зміни температури у реперній точці морозильної камери виду

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{t_{\text{бал.}} - t_1}{T_p} e^{-\frac{\tau}{T_p}}, \quad (2)$$

в якому, з того ж виразу (1)

$$t_{\text{бал.}} - t = (t_{\text{бал.}} - t_1) e^{-\frac{\tau}{T_p}}. \quad (3)$$

Здійснюючи підстановку (3) у (2), отримаємо

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{t_{\text{бал.}} - t}{T_p}, \quad \text{звідки } t = t_{\text{бал.}} - T_p \frac{dt}{d\tau}. \quad (4)$$

Рівняння (4) показує, що температура  $t$  знаходиться у лінійній залежності від швидкості її зміни  $\frac{dt}{d\tau}$  і

$$T_p = \frac{t_{\text{бал.}} - t}{\frac{dt}{d\tau}}, \quad \text{або чисельно}$$

$$T_p = \frac{t_{об.} - t_2}{t_2 - t_1} \tau_p, \quad (5)$$

у якому  $\tau_p$  — тривалість робочого циклу компресора.

Аналогічно до виразу (5) визначається стала часу охолодження у морозильній камері під час неробочого циклу компресора

$$T_n = \frac{t_{об.} - t_2}{t_2 - t_1} \tau_n, \quad (6)$$

де  $t_{об}$  — температура об'єкту охолодження у холодильній шафі;

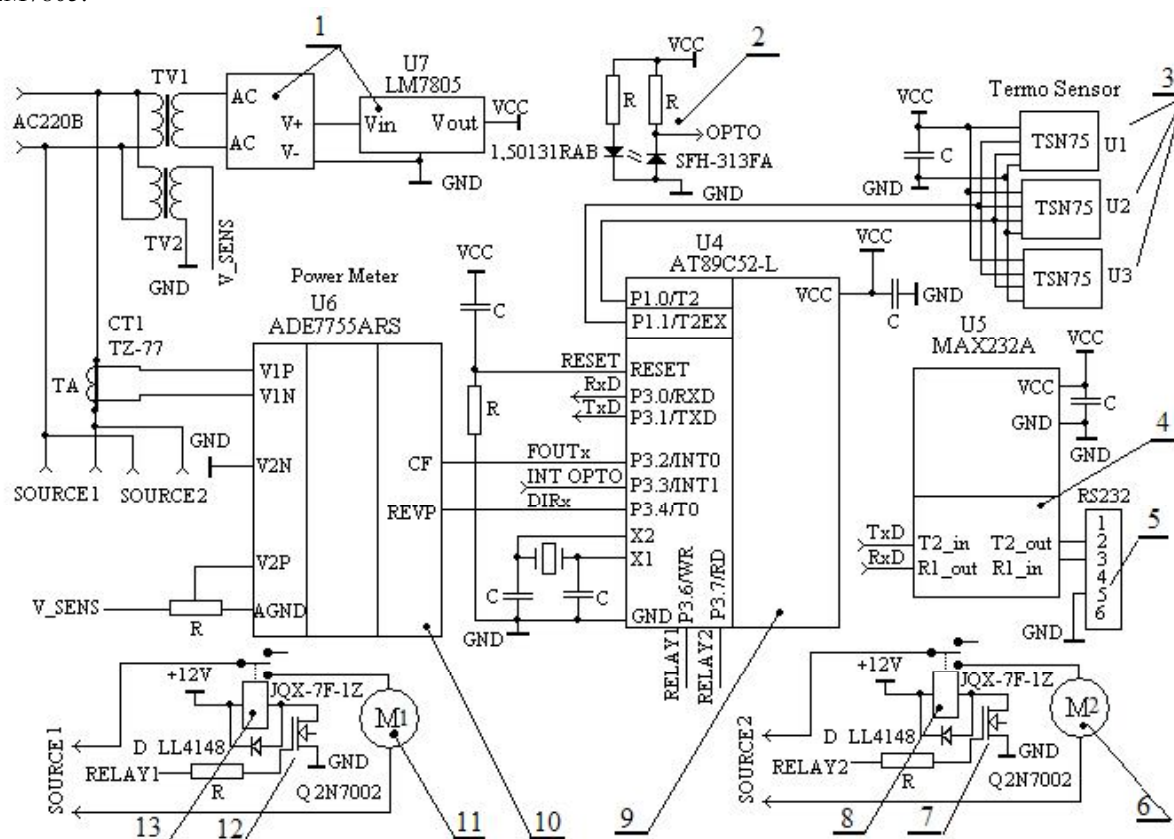
$t_2$  — значення температури у шафі морозильника на початку виключення компресора;

$t_1$  — температура у морозильній шафі на початку наступного циклу включення компресора;

$\tau_n$  — тривалість неробочого циклу компресора.

Як видно з виразів (5) і (6), для визначення сталих часу перехідного процесу охолодження на протязі одного циклу роботи ХМ за непрямим методом, аналізатору ЕЕ КХП трьох датчиків температури, що вимірюватимуть  $t_{об}$ ,  $t_{об.}$ ,  $t_2$ , та лічильник потужності, споживаної електричним двигуном.

Аналізатор ЕЕ КХП, принципова електрична схема якого наведена на рис. 2, має три цифрові програмовані датчики температури 3 типу ТСN75, програмований мікроконтролер 9 типу АТ89С52-Л з двома малопотужними транзисторними ключами 7, 12, виконаними на базі транзистору 2N7002, які навантажено на котушки проміжних електромагнітних реле 8, 13 постійного струму типу JQX-7F-1Z, що вмикають двигун 11 компресора та вентилятора 6 примусового охолодження, лічильник активної потужності 10, виконаний на мікроконтролері типу АDE7755ARS, електронну оптичну пару 2 із датчиком 1.50131RAB та приймачем SFH-313FA і комбінований порт RS232 підключення до комп'ютера 5 через драйвер 4 типу MAX232A, а також малопотужний блок живлення 1, виконаний на регуляторі напруги LM7805.



**Рис. 2 – Принципова електрична схема аналізатора енергетичної ефективності холодильного апарату**

Аналізатор ЕЕ КХП працює таким чином. До включення ХМ три датчики температури 3 встановлюються вручну по одиниці на ділянці випарування хладону у випарнику щільним приляганням до його поверхні, всередині об'ємів холодильної шафи і морозильної камери. Одночасно комбінований порт 5

приєднується до ПЕОМ в середовищі EXCEL якої повинна бути встановлена відповідна керуюча випробуваннями та розрахунками енергетичних показників КХП програма написана на мові Visual Basic Application. Після вмикання аналізатору ЕЕ до однофазної мережі живлення її напруга потрапляє до малопотужного блоку 1, живлячому постійним струмом всі ланки пристрою на рівнях  $\pm 5$  В та  $\pm 12$  В, і, одночасно, до електричного двигуна 11 приводу компресора холодильної машини та 6 — приводу вентилятора примусового охолодження. Запуск програми моніторингу значень температури та споживаної КХП електричної енергії і їх відлік починається відразу, як то передбачено програмою теплових випробувань, із видачею результатів на монітор комп'ютера та оформленням контрольного протоколу тестування. Таким чином забезпечується синхронність початку випробувань ХМ із початком вимірювання її енергетичної досконалості. ХМ починає відпрацьовувати розбіжність температури в неупорядкованому режимі роботи, яку встановлено в шафах КХП за допомогою власного парового терморегулятора або за допомогою програмованих датчиків температури 3, тимчасово виконуючих функцію терморегулятора та, поступово, виходить в упорядкований режим роботи.

Випробування ЕЕ КХП починається автоматично з моменту виходу його ХМ в упорядкований режим роботи, за умови, що тривалість часу циклів між послідовними включеннями двигуна компресора не відрізняється більш ніж на 5 %, або у напівавтоматичному режимі — оператором, який уручню запускає програму випробувань, кликнувши кнопкою миші на строчці «Пуск» керуючої програми. Тестування ЕЕ у автоматичному режимі роботи аналізатора починається в мить часу включення двигуна приводу компресора для циклу, який тестується та закінчується у наступну мить включення двигуна компресора, тобто на протязі одного повного циклу роботи компресора. Заздалегідь запрограмований, мікроконтролер 9 встановлює послідовність і швидкість зчитування вимірюваних показників та їх передачу до ПЕОМ а саме: поточного часу, температур датчиків, інформації про відкриття дверей холодильної шафи яка надходить від електронної оптичної пари 2, величини споживаної потужності, електричної енергії, що надходить від лічильника 10. По закінченню одного циклу роботи ХМ, яка тестується, програма випробувань КХП завершується із видачею його робочих характеристик на екрані монітору та у контрольному протоколі. Виготовлення аналізатору ЕЕ КХП згідно до опису, і його застосування при проведенні випробувань на моделі побутового холодильника типу КШД-160, підтвердили означені у опису його переваги порівняно із існуючими методами випробувань, а також надійність у роботі.

### Висновки

Запропонований метод придатний до його реалізації у будь-яких умовах застосування КХП і не потребує розгерметизації ХМ, застосування складного обладнання, вимірювальних приладів і каталожних даних компресора та двигуна ХМ. Виготовлений тестер відноситься до приладів вимірювальної техніки і призначений для перевірки ЕЕ КХП при проведенні їх теплових випробувань, дозволяє у реальному часі отримувати значення температур в шафах холодильника, визначати холодильну продуктивність, потужність споживану електричним двигуном із мережі живлення та розраховує питомий холодильний електричний коефіцієнт апарату, а також може бути застосованим у якості основного пристрою при проведенні технічного нагляду за дотриманням вимог стосовно ефективності використання КХП електричної енергії за місцем його встановлення.

### Література

1. Council Directive 92/75EEC of 22 September 1992 on the indication by labeling and standard product information of the consumption of energy and other resources by household appliances // Official Journal. – 1992. – L. 297. – 14 October. – P. 0016-0019.
2. Commission Regulation (EC) No 1275/2008 of 17 December 2008 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to eco design requirements for standby and off mode electric power consumption of electrical and electronic household and office equipment // Official Journal. – 2008. – L. 339. – 18 December. – P. 0045-0048.
3. Постанова Кабінету Міністрів України № 787 від 3 вересня 2008 року. Про затвердження Технічного регламенту максимально дозволених споживання електроенергії холодильними приладами.