

THE METHODS OF COOLING CAPACITY REGULATION OF STATIONS WITH RECIPROCATING COMPRESSORS

O. Riabchuk, M. Miroshnyk, V. Boiko, R. Gryshchenko

National University of Food Technologies

V. Pavlichenko

LTD "BMSERVICE"

Key words:

*Reciprocating compressor
Refrigeration station
Cooling capacity
regulation*

Article history:

Received 08.07.2020

Received in revised form
23.07.2020

Accepted 07.08.2020

Corresponding author:

O. Riabchuk

E-mail:

elektrik-ugpp@ukr.net

ABSTRACT

The theoretical and practical results of comparison the various methods of cooling capacity regulation of stations with reciprocating compressors are presented in the article.

The aim of this work was to compare the methods of cooling productivity regulation of existing stations with reciprocating compressors and determination of optimal regulation method that can be recommended for the refrigerating stations project designing.

Data for comparison the regulation methods were obtained at operating refrigerating stations of foodstuff hypermarkets during the last 2 years of their work.

The electricity meters were installed in the power cabinets of the refrigerating stations that made it possible to obtain indications of electricity consumption and to compare them for similar periods of time.

Data of the refrigerating stations' operation was recorded remotely using the monitoring system Carel by Boss company production.

This equipment was installed at three sites: — with stepwise regulation of the central channel operation; — with frequency converters installed on the main compressors of the central channels and replacement of condensers' AC-fans by EC fans; — with IQ-modules and CRII installed on the central channel's compressors and replacement of condensers' AC-fans by EC-fans.

During the observations, it was found out that stepwise regulation affects negatively the energy consumption of the aggregate as a whole, significant pressure surges occur with respect to set by the controller; the implementation of two more modern methods of reciprocating compressors refrigerating capacity regulation and controlling the speed of condenser fans rotation ensured a smooth equipment operation and smaller deviations relative to the parameters set by the controller.

That is the implementation of these regulatory methods affected positively the operation of refrigeration aggregates.

An analysis of obtained data as well as other authors' data allowed to determine the optimal method for regulating the cooling capacity of reciprocating compressors. The represented results can be used for designing of refrigeration stations.

СПОСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ХОЛОДОПРОДУКТИВНОСТІ СТАНЦІЙ З ПОРШНЕВИМИ КОМПРЕСОРАМИ

О. М. Рябчук, М. М. Мирошник, В. О. Бойко, Р. В. Грищенко

Національний університет харчових технологій

В. А. Павліченко

ТОВ «БМСЕРВІС»

У статті наведено теоретичні та практичні результати порівняння різних способів регулювання холодопродуктивності станцій з поршневыми компресорами та визначено оптимальний спосіб регулювання, який можна рекомендувати для проектування холодильних станцій.

Дані для порівняння методів регулювання отримані на працюючих холодильних станціях продуктових гіпермаркетів протягом двох років їх роботи. В силових щитах холодильних станцій були встановлені лічильники електроенергії, що дало змогу отримати покази споживання електроенергії та порівняти їх за аналогічні проміжки часу.

Дані роботи холодильних станцій знімалися віддалено з допомогою системи моніторингу Boss від компанії Carel. Обладнання було встановлено на трьох об'єктах: із ступінчастим регулюванням роботи централі; з установленими частотними перетворювачами на ведучі компресори централей та заміною АС-вентиляторів конденсаторів на ЕС-вентилятори; з установленими ІQ-модулями та СРІ на ведучі компресори централей із заміною АС-вентиляторів конденсаторів на ЕС-вентилятори.

У ході проведених спостережень було виявлено, що ступінчасте регулювання негативно впливає на енергоспоживання установки в цілому, відбуваються значні скачки тисків, якщо порівняти із заданими контролером. Реалізація двох більш сучасних методів регулювання холодопродуктивності поршневих компресорів і регулювання швидкості обертання вентиляторів конденсатора забезпечили плавну роботу обладнання та менші відхилення стосовно заданих контролером параметрів. Тобто реалізація запропонованих методів регулювання позитивно вплинула на роботу холодильних установок.

Аналіз отриманих даних, а також даних інших авторів дав змогу визначити оптимальний спосіб регулювання холодопродуктивності поршневих компресорів. Надані результати можна використовувати при проектуванні холодильних станцій.

Ключові слова: поршневий компресор, холодильна станція, способи регулювання холодопродуктивності.

Постановка проблеми. Системи холодопостачання проектуються на максимально можливі навантаження. При експлуатації обладнання працює в проміжних режимах. Для забезпечення відповідності між необхідною і робочою холодопродуктивністю станцій потрібно передбачати комплекс заходів для регулювання їхньої продуктивності.

Якщо холодильна станція має декілька компресорів, найпростішим способом регулювання є ступінчате вимикання компресорів. Однак головним недоліком такого підходу є виникнення значних коливань температури на стороні вторинного контура, що негативно впливає на ефективність системи, особливо при нетривалих робочих періодах; «просідання» напруги при частих запусках, підвищене енергоспоживання станції. Короткочасна робота обладнання з частими включеннями-виключеннями може викликати проблему з поверненням масла із системи. Для стабільної роботи обладнання ступінь зниження холодопродуктивності обмежений мінімальним робочим часом, який задається системою управління холодильної установки.

Сучасні холодильні станції проектуються з використанням систем регулювання холодопродуктивності. Для порівняння методів регулювання можна використовувати такі показники: точність регулювання; холодильний коефіцієнт, тобто ефективність системи; вартість системи; експлуатаційна надійність [1].

Мета дослідження: порівняти способи регулювання холодопродуктивності станцій з поршневыми компресорами та визначити оптимальний спосіб регулювання, який можна рекомендувати для проектування холодильних станцій.

Матеріали і методи. Експериментальні дані для порівняння методів регулювання отримані на працюючих холодильних станціях продуктивних гіпермаркетів протягом двох років роботи. Ці об'єкти були вибрані з огляду на те, що робота холодильного обладнання на таких об'єктах триває цілий рік. Опис обладнання наведено в табл. 1 і 2.

У силових щитах холодильних станцій були встановлені лічильники електроенергії, що дали змогу отримати покази споживання електроенергії та порівняти їх за аналогічні часові періоди.

Теоретичні матеріали зібрані з профільних публікацій заводів-виробників обладнання.

Таблиця 1. Холодильні станції і конденсатори, де встановлені частотні перетворювачі та ЕС-вентилятори

Поз.	Модель обладнання (компресор/конденсатор)	Номинальна потужність одиниці обладнання, кВт	Кількість одиниць у складі холодильної станції/конденсатора, шт	Кількість регульованих одиниць обладнання, шт	Сумарна встановлена потужність обладнання, кВт
ХМ1	D6DJ4-400X	47	5	1	235
ХМ2	D4DT4-220X	22,5	4	1	90
ХМ3	4NES-20Y-40P	19	3	1	57
ХМ4	ZB75KCE-TWD-551	12	3	1	36
КД 3	GVHX071.1A/3-MD.E	2,59	3	3	7,77
КД 4	GVH067C/3	4,48	3	3	13,44

Таблиця 2. Холодильні станції і конденсатори, де встановлені ІQ-модулі та ЕС-вентилятори

Поз.	Модель обладнання (компресор/конденсатор)	Номінальна потужність одиниці обладнання, кВт	Кількість одиниць у складі холодильної станції/конденсатора, шт	Кількість регульованих одиниць обладнання, шт	Сумарна встановлена потужність обладнання, кВт
ХМ1	4J-22.2Y-40P	21,5	1	1	21,5
ХМ2	4H15.2Y	19,3	2	1	38,6
ХМ3	4H15.2Y	19,3	5	1	96,5
ХМ4	4H15.2Y	19,3	3	1	57,9
КД 1-3	GVH 080.3A/ 2x4-N(D).E	2,59	6	4	15,54
КД 4	GCHC RD 050.3/ 13-51-0003872M	4,48	3	3	13,44

Результати і обговорення. *Методи регулювання холодопродуктивності поршневих компресорів.* Найпростішим методом регулювання є метод періодичних пусків і зупинок компресорів холодильної станції, але його можна використовувати при умовно постійному навантаженні, де ці запуски та зупинки будуть не частими і за умови достатньої кількості компресорів у складі станції, або системами з високою акумулюючою здатністю.

Значно кращі методи регулювання також супроводжуються великими змінами навантаження (паралельна робота декількох компресорів, тандем компресорів або поділ системи на кілька незалежних контурів). Однак подібні рішення також не виключають значного числа циклів регулювання (або при дуже високих вимогах до точності регулювання, або при дуже швидкій зміні необхідної холодопродуктивності). У таких випадках необхідне поєднання з механічним регулюванням холодопродуктивності компресора (ступінчастим або плавним) відповідної системи управління.

До механічного регулювання їх холодопродуктивності (вбудовані регулятори) можливі різні підходи, які можуть докорінно відрізнятися залежно від типу компресора.

Для поршневих компресорів передбачені такі варіанти: віджимання всмоктуючих клапанів; внутрішній перепуск пари; зміна мертвого об'єму циліндра; скорочення ходу стиснення; блокування всмоктуючих каналів окремих циліндрів або груп циліндрів; зміна частоти обертання [1].

Критерії вибору способу регулювання холодопродуктивності. Залежно від конкретної холодильної системи вимоги до регулювання можуть істотно відрізнятися, причому слід ретельно розглянути такі критерії: характеристика регулювання (грубе або точне, ступеневе або плавне); енергоспоживання (холодильний коефіцієнт); вартість обраного рішення; експлуатаційна надійність; область застосування компресора; мінімальний час роботи компресора; навантаження електромережі.

Відомо, що повне енергоспоживання холодильної установки, системи кондиціонування повітря або теплового насоса протягом терміну служби є значною

статтею витрат, найчастіше багаторазово перевищує початкові капіталовкладення. Як наслідок і з урахуванням непрямого впливу на навколишнє середовище (викиди CO₂ при виробленні електроенергії) оптимальне регулювання холодопродуктивності має бути направлено на точну відповідність потреби в холоді. Залежно від акумулюючої здатності системи і змін навантаження методи, засновані на ступінчастому регулюванні, можуть бути достатніми, але із суто енергетичних міркувань плавне регулювання є найбільш прийнятним.

У стаціонарних умовах роботи при різних навантаженнях істотні відмінності між ступінчастим і плавним регулюванням не завжди можна помітити з першого погляду. Але порівняльні дослідження показали, що динамічні властивості і кінцева ефективність системи істотно залежать від способу регулювання. При грубому ступінчастому регулюванні зниження холодопродуктивності викликає значне падіння температури конденсації, що веде до часткового випаровування холодоагенту при все ще високому рівні температури. Наслідки включають збої в регулюванні надходження холодоагенту у випарник, а також негативно відбиваються на холодопродуктивності й ефективності. Так само різке підвищення холодопродуктивності призводить до різких коливань у ланцюзі регулювання, включаючи значне зниження температури кипіння, часто супроводжується недостатнім перегрівом всмоктуваного газу. Як правило, з плином часу це призводить до значних відхилень від оптимальних робочих умов.

Однак обмеження, що стосуються часткових навантажень, поширюються навіть на системи з дуже хорошими характеристиками регулювання. Наприклад, оптимальне надходження холодоагенту у випарник з безпосереднім кипінням не гарантоване при низьких масових витратах. У таких випадках нижче певного навантаження необхідно, щоб система періодично працювала з мінімальною холодопродуктивністю (через робочі характеристики розширювального вентиля і для забезпечення надійної подачі масла). Більше того, ефективне регулювання при частковому навантаженні також вимагає контрольованого зниження тиску конденсації і збільшення тиску всмоктування. Крім того, енергоспоживання допоміжних приводів (вентилятори, насоси) має бути точно визначено, а значить, для цих елементів також буде потрібна ефективна система регулювання [1].

Поршневі компресори з механічним регулюванням холодопродуктивності. Для такого типу компресорів насамперед використовуються методи «розвантаження циліндра», що вимагають відносно низьких витрат і прийнятні для багатциліндрових компресорів. Досяжна градація холодопродуктивності залежить від конструкції компресора. У разі 4-, 6- і 8-циліндрових компресорів, зазвичай, відключають два циліндри на кожному ступені навантаження, що дає змогу регулювати холодопродуктивність з інтервалами (25)—50—(75)—100% або 33—66—100%. У комбінації з тандем-компресорами або з паралельною роботою компресорів можлива навіть більш тонка градація.

Для великих промислових компресорів застосовуються системи віджиму всмоктуючих клапанів (кільцеві клапани) з використанням гідравлічного масляного приводу. Газ, що всмоктується відповідними циліндрами, при нагнітанні надходить на сторону всмоктування. При цьому циліндр працює практично на

холостому ходу. Такий метод регулювання може також застосовуватися для розвантаженого пуску компресора. Метод високоефективний, втрати енергії виникають лише внаслідок механічної роботи тертя кілець й опору у всмоктуючому клапані.

Для напівгерметичних компресорів часто використовувалися рішення із застосуванням вбудованого перепускного контуру. При цьому між порожнинами високого і низького тиску циліндрів, які необхідно розвантажити, в перепускному каналі встановлюється регулюючий клапан (байпас), що перериває потік газу. Додатковий зворотний клапан на боці високого тиску запобігає протитечії вже стисненого газу. Таке конструктивне рішення просте але недостатньо ефективно через значні втрати при роботі байпасу. До того ж термічна напруга компресора при часткових навантаженнях дуже висока, що значною мірою обмежує діапазон застосування методу.

Іншим варіантом регулювання є зміна мертвого об'єму циліндра. Головка циліндра оснащена додатковою камерою високого тиску, яка за допомогою керуваного клапана може бути з'єднана з циліндром, що збільшує його мертвий обсяг. У процесі стиснення частина газу відводиться в ту ж камеру, звідки він повертається в циліндр під високим тиском при зворотному ходу поршня. Це дає змогу значно зменшити обсяг циліндра при нормальній роботі компресора. Така система застосовується на компресорах з числом циліндрів менше чотирьох. Однак високі втрати при зворотному розширенні призводять до істотного падіння ефективності при частковому навантаженні. Більш того, діапазон регулювання істотно залежить від ставлення тисків. Так, при невеликих відносинах тисків можливо лише незначне зменшення холодопродуктивності.

Для герметичних компресорів також використовується інше рішення — механічно змінюваний хід поршня (скорочення ходу стиснення).

Найбільш поширеним методом механічного регулювання холодопродуктивності компресорів для комерційного холоду є метод відключення циліндрів шляхом блокування всмоктуючих каналів окремих циліндрів або груп циліндрів. Ця концепція була розроблена BITZER у 70-і роки ХХ ст. і завдяки постійному вдосконаленню досягла неперевершеного рівня.

У режимі повного навантаження працюють усі циліндри компресора; соленоїдний клапан відключений. Як наслідок, усі газові канали в клапанній дошці і голові циліндра, а також поршень відкриті.

При роботі в режимі часткового навантаження включається соленоїдний клапан, його якір піднімається. В результаті регульований поршень виявляється під дією високого тиску, рухається вниз і закриває загальний впускний канал у клапанній дошці. Надходження газу припиняється, і відповідні поршні працюють у режимі «холостого ходу». Цей метод регулювання надзвичайно ефективний, оскільки втрати обмежуються лише механічним тертям поршнів. У широкому робочому діапазоні енергоспоживання електродвигуна при частковому навантаженні зменшується майже пропорційно зниженню холодопродуктивності.

Завдяки відносній простоті і надійності конструкції число циклів регулювання може бути відносно великим, що забезпечує його високу точність. Через високу

ефективність компресори з такою системою регулювання можуть використовуватися в широкому діапазоні [1].

Паралельна робота компресорів в одному холодильному контурі. Класичне паралельне з'єднання включає одночасну роботу декількох компресорів на загальний контур циркуляції. Необхідна холодо- або теплопродуктивність розподіляється по компресорам, причому можливо їх об'єднання як за однаковими, так і за різними потужностями. За допомогою інтелектуальної стратегії управління можна забезпечити високий рівень регулювання холодопродуктивності системи. До типових прикладів систем з паралельно працюючими компресорами відносяться системи холодопостачання супермаркетів, в яких необхідне навантаження може змінюватися в широкому діапазоні. Устаткування компресорів механічними (вбудованими) системами регулювання холодопродуктивності залежно від потреби в холоді, а також частоти циклів або значних змін робочих умов можливе або навіть необхідне.

Зміна частоти обертання є ще однією можливістю регулювання, яка може використовуватися, наприклад, тільки на одному з компресорів, забезпечуючи безперервний контроль навантаження, так само, як і вирівнювання змін, спричинених включенням/виключенням окремих компресорів.

Загалом, усі конструкції компресорів добре працюють при паралельному підключенні, причому вимоги до розподілу мастила між окремими компресорами можуть істотно відрізнитися (зокрема, при з'єднанні компресорів різних потужностей). Ґрунтуючись на проведених випробуваннях, BITZER розробив для кожного типу компресорів рішення, що характеризуються простотою і високою експлуатаційною надійністю.

Альтернативним рішенням у регулюванні холодопродуктивності є застосування поршневих тандем-компресорів. У цьому разі вирівнювання рівня мастила забезпечується конструктивно, тому додаткові заходи, зазвичай, не потрібні. BITZER пропонує широку гаму тандем-компресорів для малих описаних обсягів (починаючи з 2—11,4 м³/год). Навіть невеликі 4-циліндрові моделі Octagon® (починаючи з 2—18 м³/год) забезпечують можливість установки регулятора для відключення циліндра, за допомогою якого можливо здійснити ступеневу зміну холодопродуктивності: 25—50—75—100% [1].

Зміна частоти обертання вала компресора. Цей метод регулювання холодопродуктивності вже протягом багатьох років застосовується в компресорах об'ємного типу, причому в основному у відкритих компресорах, що приводяться через передачу із змінним передавальним числом, або в компресорах, оснащених спеціальними двигунами зі швидкісною модуляцією. Однак такі концепції приводу були здебільшого винятком і використовувалися лише у випадках, коли класичне регулювання холодопродуктивності було неможливим або існували спеціальні вимоги.

Лише після появи перетворювачів частоти (частотних перетворювачів), щоб регулювати швидкість асинхронних двигунів, цей метод стали широко використовувати в різних галузях [1].

Регулювання зміною частоти обертання — метод, який може бути використаний в переважній більшості технологічних процесів. Його використання забезпечує такі переваги: плавний пуск — відсутні кидки струму, знижуються механічні зусилля; точне регулювання тиску — частота обертання компресора, а отже, подача, регулюється відповідно до споживання в мережі, в результаті зменшується амплітуда коливань тиску і зменшується необхідна ємність ресиверів; оптимальний ККД — робота без втрат тиску в мережі, що, відповідно, зменшує втрати енергії.

Регулювання зміною частоти обертання можливе при паралельній роботі компресорів [2].

Сучасні частотні перетворювачі оснащені багаторівневими ступенями захисту двигунів, що підключаються до них, завдяки чому вдається досягти максимального захисту двигуна компресора від перевантаження, стрибків напруги та інших факторів. Крім того, нові моделі частотних перетворювачів дають змогу виконувати плавний пуск компресорів, що збільшує їхній моторесурс.

Управляючий сигнал 0—10 В або 4—20 мА надходить від контролера холодильної установки на частотний перетворювач. Причому регулювання продуктивності компресорів можливе від 20 до 110%, якщо верхню межу дозволяє завод-виготовлювач. Ця особливість при незначному збільшенні навантаження дає змогу, не вмикаючи наступний компресор станції, збільшити продуктивність регульованого компресора більше за номінальне (заводське) значення.

Розвиток механічного регулювання продуктивності поршневих компресорів BITZER. Механічна система CR регулювання продуктивності поршневих компресорів BITZER була розроблена і почала застосовуватись ще з чотирьох та шести циліндровими компресорами серії BHS. Завдяки простій і надійній конструкції ця система чудово зарекомендувала себе як недороге і водночас досить ефективне рішення. Основним елементом системи був соленоїдний CR-клапан, який монтувався на пристосованій для цього кришці головки циліндрів. CR-клапан при подачі на нього електроживлення відкривав канал для газу високого тиску нагнітання, під дією якого переміщався внутрішній виконавчий поршень і закривав вікно всмоктування на клапанній дошці. Так пара циліндрів головки, на якій було встановлено такий клапан, виключалася з роботи нагнітання компресора, і його об'ємна продуктивність відповідно зменшувалася.

Поряд із незаперечними перевагами цієї системи, такі як простота, надійність і дешевизна, вона мала також і деякі недоліки. Регулювання продуктивності виходило виражено ступінчастим: 100—50%, або 100—66—33%. При переході на нижчий ступінь регулювання скорочувалася область допустимого застосування компресора, знижувалася максимальна допустима температура конденсації t_c при низьких температурах кипіння t_o . Крім того, категорично не допускалася робота системи СІС одночасно з включенням клапана CR.

Нині для поршневих компресорів BITZER стала доступна нова опція — модернізована система механічного регулювання продуктивності CRII. Основним елементом нової системи CRII також є модернізований соленоїдний CR-клапан, конструкція якого схожа з конструкцій CR-клапана старої системи.

Працює новий CR клапан так само, як і старий. При подачі живлення на соленоїд відкривається перепускний канал, по якому газ високого тиску з порту нагнітання перетікає у внутрішній циліндр клапана. У ньому під дією газу нагнітання переміщається виконавчий поршень і закриває вікно всмоктування на клапанній дошці.

Новий CRII клапан має ще більш високу надійність, більший ресурс включень. Він пристосований для частого включення/вимикання, тобто для функціонування в пульсуючому режимі.

Нова система CRII увібрала в себе все позитивне, що було у CR: простоту конструкції, надійність, а також відносно низьку вартість. При цьому система CRII забезпечує глибину регулювання продуктивності поршневого компресора 1:10. Це значно більша глибина регулювання, ніж та, що досягалася за допомогою старої системи CR.

Крім того, нова система CRII дає змогу зробити регулювання продуктивності поршневого компресора квазіплавним (Quasi-stepless or Virtually stepless), тобто ніби безступінчатим. Забезпечується такий режим регулювання за рахунок наявної у CRII клапана можливості функціонувати тривалий час у пульсуючому режимі: тривалий час часто включатися і вимикатися з мінімальним періодом 10 с — 5 с — «включений», 5 с — «вимкнений».

Розглянемо специфічні особливості функціонування системи CRII на прикладі чотирьох-і шестициліндровий компресорів.

На відміну від старої системи CR, нова система передбачає установку CRII клапана на кожну головку циліндрів: два клапани на чотирициліндрові і три — на шестициліндрові компресори.

Як бачимо на прикладі чотирициліндрового компресора, що оснащується двома клапанами CRII, при необхідній його продуктивності 100% обидва клапана вимкнені. При необхідній продуктивності, що знаходиться в діапазоні 100%...50%, починає імпульсно включатися клапан CRII (1). А при необхідній продуктивності компресора, що знаходиться в діапазоні 50%...10%, включається постійно клапан CRII (2) і починає імпульсно включатися клапан CRII (1).

В аналогічному алгоритмі задіюються і клапани CRII на шестициліндровому компресорі. При необхідній його продуктивності 100% всі три клапани вимкнені. При необхідній продуктивності компресора, що знаходиться в діапазоні 100%...66%, починає імпульсно включатися клапан CRII (1). При необхідній продуктивності, що знаходиться в діапазоні 66%...33%, клапан CRII (1) залишається вимкненим, включається постійно клапан CRII (3) і починає імпульсно включатися клапан CRII (2). А при необхідній продуктивності, що знаходиться в діапазоні 33%...10%, включаються постійно клапани CRII (1) і CRII (2) і починає імпульсно включатися клапан CRII (3).

Системою CRII оснащуються і восьмициліндрові компресори BITZER. Вони можуть бути оснащені тільки двома клапанами CRII (1) і CRII (2), що встановлюються на протилежні одна одній бічні головки циліндрів. З їхньою допомогою забезпечується можливість квазіплавного регулювання продуктивності в діапазоні 100%...50%.

Очевидно, що всі клапана CRII, незалежно від того, в якому режимі включення — пульсуючому або тривалому дискретно вони функціонують, ідентичні за конструкцією. У зв'язку з цим для забезпечення рівномірного витрачання їх ресурсу доцільно налаштувати систему управління таким чином, щоб через певні періоди роботи компресора вони змінювала режим включення клапанів CRII.

Частота включень і тривалість фаз циклу «включення/вимикання» для клапана, що працює в пульсуючому режимі, визначається поточному значенням необхідної продуктивності компресора.

З міркування надійності і довговічності як клапана CRII, так і двигуна компресора визначено мінімальний час включення клапана — 5 с і мінімальний час вимикання — 5 с.

Поточне значення продуктивності компресора при такій системі регулювання визначається як інтегральне значення, яке визначається співвідношенням часу включення і часу виключення працюючого в пульсуючому режимі клапана CRII, а також часу включення і виключення клапанів, які працюють у дискретному режимі за певний період роботи компресора. Чим ближче до заданого контролером значення підходить поточна величина відслідковуваного параметра, тим менша потрібна продуктивність компресора, і включення його пульсуючого клапана CRII відбувається на більш тривалий проміжок часу. Після того, як компресор пропрацює з усіма включеними CRII клапанами, тобто з нульовою продуктивністю, 2 хв відбувається його виключення. При цьому кількість включень і виключень двигуна компресора на годину буде залишатися в допустимій кількості, що забезпечує безпечний режим його роботи. Більш того, такий алгоритм регулювання дає змогу оперативно коригувати раптові або різкі пікові зміни робочих параметрів роботи установки.

Компанія Carel виготовляє контролери CAREL pR300 для управління клапанами-регуляторами продуктивності CRII [3]. Проте при тестуванні контролерів було виявлено, що в них не передбачено ротації CRII клапанів, що є суттєвим недоліком алгоритму роботи цих контролерів і може призвести до виходу з ладу компресора.

CM-RC-01. Інтелектуальний модуль. Починаючи з 2015 р., поршневі компресори BITZER стали опційно оснащуватися інтелектуальними модулями захисту й управління CM-RC-01.

За зовнішньою скромністю цього пристрою ховається його могутній функціонал. Смарт-пристрій CM-RC-01 здатний не тільки захистити компресор у нестандартній ситуації, а й керувати ним, фактично виконуючи функції електронного контролера холодильної установки.

Нині інноваційними пристроями CM-RC-01 поршневі компресори BITZER оснащуються тільки на заводах-виробниках BITZER GmbH. Ці пристрої встановлюються в клемні коробки компресорів і підключаються до датчиків температур і тисків, електромоторам і зовнішньої автоматиці компресорів. На заводах зібрані системи перевіряються і налаштовуються на спеціальних стендах.

У модуля CM-RC-01 є роз'єм для підключення зовнішнього запобіжного пресостата високого тиску. Таке підключення забезпечує економію на довжині кабелів і на компонентах щита управління, а також спрощення електричної схеми.

Модуль оснащений додатковим датчиком температури NTC, інформація з якого зберігається в журналі даних, і не впливає на систему управління й моніторингу. Установка датчика на лінію всмоктування компресора дасть змогу отримувати значення перегріву всмоктуваних парів онлайн при підключенні BEST Software або Modbus або при подальшому аналізі журналу даних.

Можливе опційне встановлення датчиків-трансмітерів високого і низького тиску. У разі застосування трансмітера низького тиску відпадає необхідність у застосуванні пресостата низького тиску. Захисні функції модуля CM-RC-01 зводяться не тільки до контролю критичних значень параметрів стану компресорів, він також контролює знаходження робочої точки (t_o/t_c) в межах області допустимого застосування. Крім функції захисту, модуль CM-RC-01 має функції управління. За допомогою вбудованого мікропроцесора модуль вмикає і вимикає такі периферійні елементи компресора:

- до трьох котушок соленоїдних клапанів регулювання продуктивності CRP — інтегральне рішення, що дає змогу адаптувати продуктивність компресора до поточного навантаження подібно частотному перетворювачу. Управляючий сигнал 0—10 В або 4—20 мА надходить від контролера холодильної установки на модуль через Modbus;

- підігрів масла в картері відключається після зупинки компресора;

- модуль управління запускає вентилятор обдуву за температурою з датчика PT1000 на нагнітанні;

- котушки магнітних пускачів компресорів, що запускаються за схемою «зірка»/«трикутник»;

- котушку соленоїда передпускової розгрузки SU;

- котушку імпульсного соленоїда СІС модернізованої системи рідинного вприскування для роботи на R407A і R407F;

- регулятор рівня масла в картері, що включає в себе датчик рівня OLC-D1.

Модуль також проводить комплексну діагностику роботи компресора, завдяки чому при його встановленні завод збільшує гарантію на обладнання.

Модуль має власну пам'ять, в якій зберігаються 19 важливих робочих параметрів компресора, що записувались протягом останніх двох тижнів його роботи: мотогодини роботи; кількість пусків; робочі умови — температура та тиск; статистика навантаження компресора; критичні попередження про порушення роботи — перевантаження двигуна, подачі масла, температура парів, що нагнітаються, перевищення тиску конденсації, вихід з робочої області тощо.

Інноваційний захисно-діагностичний смарт-модуль CM-RC-01 передбачає можливість комунікації з усіма структурами вищого порядку, що беруть участь в управлінні роботою компресора, в який цей модуль встановлений.

Для проведення сервісних заходів і аналізу режимів роботи компресорів безпосередньо на місці установки холодильного агрегату фахівці сервісної служби можуть переглянути зміст журналу даних DataLog, підключивши свій ноутбук або планшет з відкритою на ньому програмою BEST software безпосередньо до модуля CM-RC-01 або через BEST адаптер [4].

Аналіз проведених досліджень. Дані роботи холодильних станцій упродовж двох років знімалися віддалено з допомогою системи моніторингу Boss від компанії Carel.

З наведених графіків (рис. 1, 2) видно, що при наявності лише ступінчатого регулювання роботи централі відбуваються значні скачки тисків порівняно із заданими контролером.

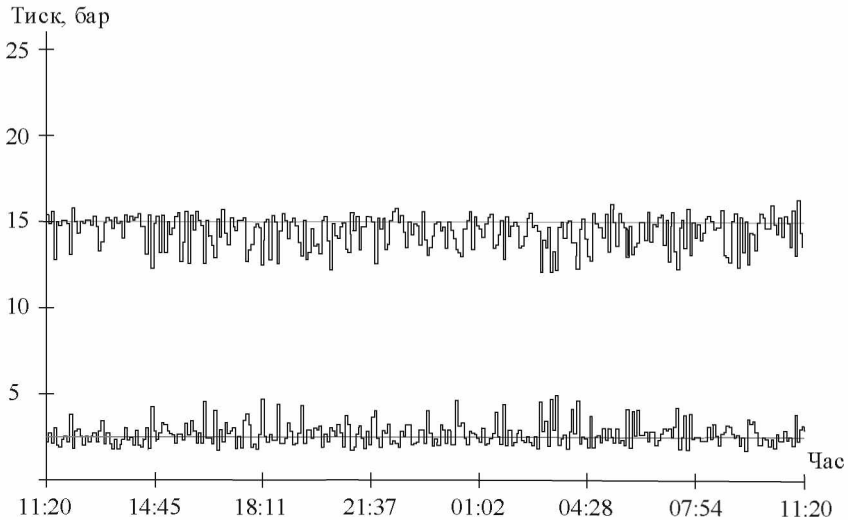


Рис. 1. Графік роботи холодильної станції (4 компресори) із ступінчатим регулюванням холодопродуктивності та конденсатора з АС-вентиляторами:
верхня крива — тиск кипіння; нижня крива — тиск конденсації;
прямі лінії — задані значення тиску кипіння та конденсації

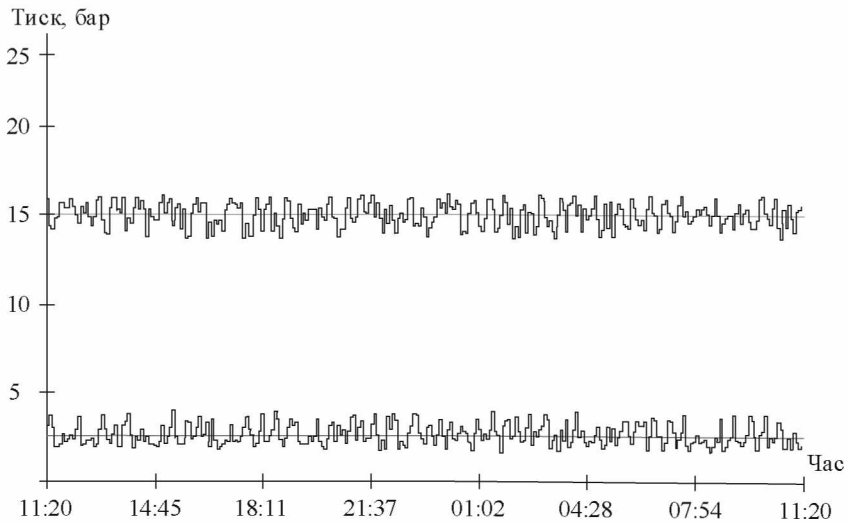


Рис. 2. Графік роботи холодильної станції (3 компресори) із ступінчатим регулюванням холодопродуктивності та конденсатора з АС-вентиляторами:
верхня крива — тиск кипіння; нижня крива — тиск конденсації;
прямі лінії — задані значення тиску кипіння та конденсації

Ступінчасте регулювання негативно впливає на енергоспоживання установки в цілому.

Для досягнення стабільної роботи холодильної установки були реалізовані два проекти: встановлені частотні перетворювачі на ведучі компресори централей із заміною АС-вентиляторів конденсаторів на ЕС-вентилятори. Також встановлені ІQ-модулі та СРІІ на ведучі компресори централей із заміною АС-вентиляторів конденсаторів на ЕС-вентилятори.

Як видно з графіків роботи централей (рис. 3, 4), реалізація цих методів регулювання холодопродуктивності поршневого компресора та регулювання швидкості обертання вентиляторів конденсатора забезпечили більш плавну роботу обладнання та менші відхилення стосовно заданих контролером параметрів. Тобто реалізація цих методів регулювання позитивно вплинула на роботу холодильних установок.

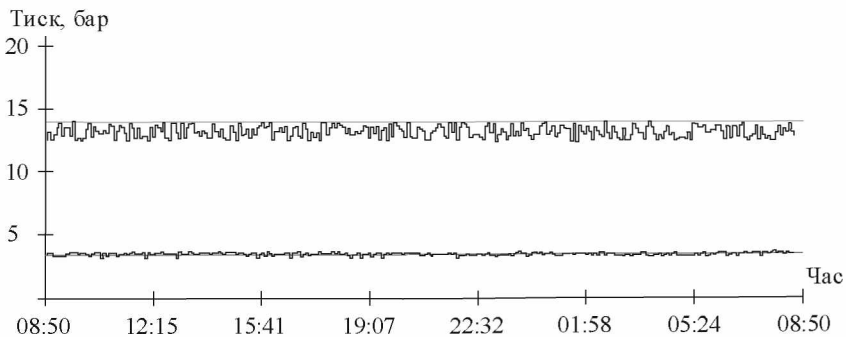


Рис. 3. Графік роботи холодильної станції з плавним регулюванням холодопродуктивності (встановлений частотний перетворювач) та конденсатора з ЕС-вентиляторами:

верхня крива — тиск кипіння; нижня крива — тиск конденсації;
прямі лінії — задані значення тиску кипіння та конденсації

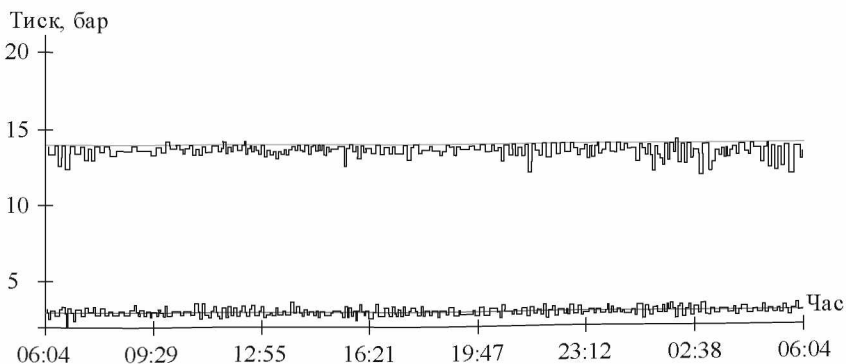


Рис. 4. Графік роботи холодильної станції з регулюванням холодопродуктивності за допомогою ІQ-модуля та конденсатора з ЕС-вентиляторами:

верхня крива — тиск кипіння; нижня крива — тиск конденсації;
прямі лінії — задані значення тиску кипіння та конденсації

У табл. 3, 4 і на рис. 4, 2 наведено споживання електроенергії холодильним обладнанням за два роки. Перший рік знімались покази на існуючому обладнанні, потім була проведена модернізація холодильних станцій з встановленням на одному об'єкті частотних перетворювачів на ведучі компресори станцій, а на іншому IQ-модулі (СМ-RC-01) та СРІІ також на ведучі компресори станцій. На обох об'єктах була проведена повна або часткова заміна АС вентилятори конденсаторів на ЕС.

Таблиця 3. Холодильні станції і конденсатори, де встановлені частотні перетворювачі та ЕС-вентилятори

Поз.	Модель обладнання (компресор/конденсатор)	Кількість одиниць у складі холодильної станції/конденсатора, шт	Кількість регульованих одиниць обладнання, шт	Сумарна спожита електроенергія за рік, до модернізації, кВт	Сумарна спожита електроенергія за рік, після модернізації, кВт
ХМ1	D6DJ4-400X	5	1	1909992	1626526
ХМ2	D4DT4-220X	4	1		
ХМ3	4NES--20Y-40P	3	1		
ХМ4	ZB75KCE-TWD-551	3	1		
КД 3	GVHX071.1A/3-MD.E	3	3		
КД 4	GVH067C/3	3	3		

Таблиця 4. Холодильні станції та конденсатори, де встановлені IQ-модулі та ЕС-вентилятори

Позн.	Модель обладнання (компресор/конденсатор)	Кількість одиниць у складі холодильної станції/конденсатора, шт	Кількість регульованих одиниць обладнання, шт	Сумарна спожита електроенергія за рік, до модернізації, кВт	Сумарна спожита електроенергія за рік, після модернізації, кВт
ХМ1	4J-22.2Y-40P	1	1	1041735	831730
ХМ2	4H15.2Y	2	1		
ХМ3	4H15.2Y	5	1		
ХМ4	4H15.2Y	3	1		
КД 1-3	GVH 080.3A/2x4-N(D).E	6	4		
КД 4	GCHC RD 050.3/13-51-0003872M	3	3		

Як видно з рис. 5 і 6, завдяки реалізації проектів вдалося досягти значної економії в споживанні електроенергії холодильних установок.

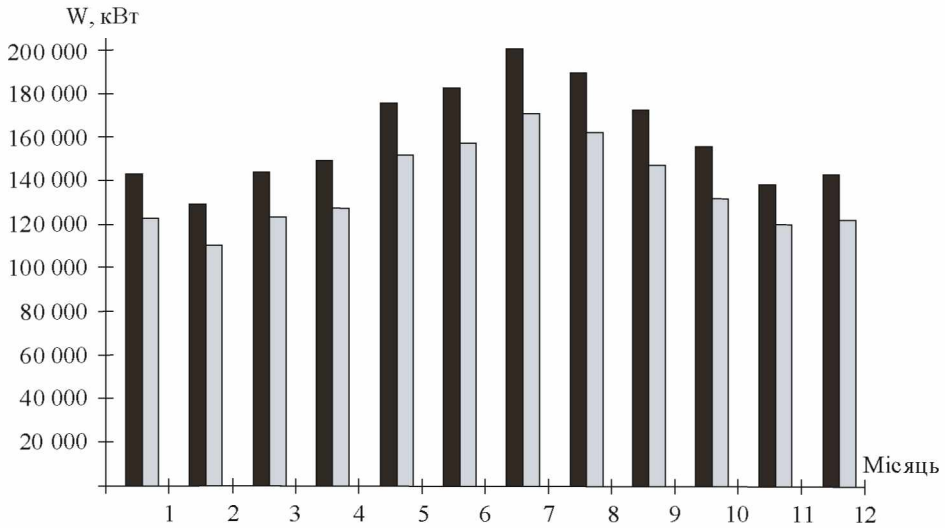


Рис. 5. Річний графік споживання електроенергії холодильних станцій і конденсаторів, де встановлені частотні перетворювачі та ЕС-вентилятори: чорний — кВт/місяць до модернізації; сірий — кВт/місяць після модернізації

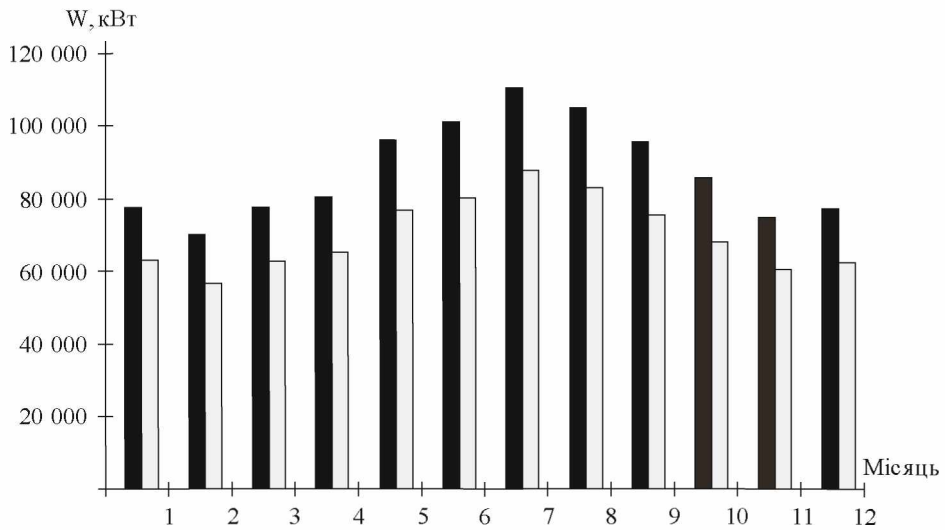


Рис. 6. Річний графік споживання електроенергії холодильних станцій і конденсаторів, де встановлені IQ-модулі перетворювачі та ЕС-вентилятори: чорний — кВт/місяць до модернізації; сірий — кВт/місяць після модернізації

У табл. 5 і 6 наведені техніко-економічні показники роботи холодильних станцій до та після модернізації.

Завдяки використанню сучасних методів регулювання холодопродуктивності поршневих компресорів досягається не лише інженерна мета — працювати, дотримуючись заданого навантаження з мінімальними відхиленнями, але й економічна та екологічна — економія коштів, природних ресурсів і зменшення впливу на навколишнє середовище.

Таблиця 5. Холодильні станції і конденсатори, де встановлені частотні перетворювачі та ЕС-вентилятори

Сумарна спожита електроенергія за рік, кВт	1626526
Сумарна економія електроенергії за рік, кВт	283466
Відсоток зменшення електроспоживання, кВт	14,8%
Вартість електроенергії, грн/кВт з ПДВ	2,15
Економія фінансів, грн/рік	609450,99
Сума капіталовкладень, грн з ПДВ	1651027,02
Період окупності, рік	2,71

Таблиця 6. Холодильні станції і конденсатори, де встановлені ІQ-модулі та ЕС-вентилятори

Сумарна спожита електроенергія за рік, кВт	831730
Сумарна економія електроенергії за рік, кВт	210005
Відсоток зменшення електроспоживання, кВт	20,2%
Вартість електроенергії, грн/кВт з ПДВ	2,15
Економія фінансів, грн/рік	451511,42
Сума капіталовкладень, грн з ПДВ	1351092,40
Період окупності, рік	2,99

Термін окупності проектів менше трьох років, що дає змогу рекомендувати впровадження таких технологій як в існуючі об'єкти, так і використання їх при проектуванні нових.

Висновки

1. Електронний модуль CM-RC-01 з підключеними до нього датчиками та CRII, що встановлені на компресорі, дають змогу збільшити його термін експлуатації, захистити від аварійних ситуацій, розширити межу плавного регулювання та записати параметри його роботи з можливістю віддаленого доступу.

2. Сервісне обслуговування компресорів значно спрощується і прискорюється. Більш того, воно може проводитися дистанційно. Модуль CM-RC-01 наочно демонструє поточний стан компресора як через інтерфейс програми BEST, так і сигналами свого світлодіодного індикатора. Завдяки збереженню в його пам'яті журналу даних DataLog пошук і усунення помилок прискорюється.

3. Використання CM-RC-01 модуля забезпечує ще більш високу надійність і ефективність всієї системи та зменшує енергозатрати холодильної установки.

4. При частотному регулюванні продуктивність компресора відповідає необхідному навантаженню. До переваг використання частотного перетворювача можна віднести: відсутність стрибків тиску, середні значення тиску кипіння і конденсації нижче, ніж при ступінчастому регулюванні; плавна зміна продуктивності при меншому числі компресорів в централі; повна відповідність необхідної продуктивності (як наслідок, економія споживаної двигуном компресора електроенергії); стабільний тиск всмоктування; збільшення ресурсу

компрессора (менше число пусків, плавний пуск, багатоступеневий рівень захисту двигуна); зменшення навантаження на електричну мережу (плавний пуск) [5].

Література

1. Сравнение способов регулирования холодопроизводительности компрессоров: Технические публикации Bitzer. URL: http://bitzer.ru/sravnenie_sposobov_regulirovaniya_holodoproizvoditelnosti_kompressorov.

2. Энергоэффективность: преимущества применения частотно-регулируемого привода в насосных, вентиляционных и компрессорных установках. *Технические публикации Schneider Electric*, 2009. Выпуск 27. URL: <http://www.netkom.by/docs/N27-Energoeffektivnost-s-primeneniem-PCh.pdf>.

3. CRII — Новая ступень в развитии механического регулирования производительности поршневых компрессоров Bitzer: Технические публикации Bitzer. URL: http://bitzer.ru/CRII_novaya_stupen_v_razviti_mehaničeskogo_regulirovaniya_proizvoditelnosti_porshnevih_kompressorov_bitzer.

4. CM-RC-01. Интеллектуальный модуль, мониторинга, защиты и управления поршневых компрессоров Битцер: Технические публикации Bitzer. URL: http://bitzer.ru/CM-RC-01_intellektualnii_modul_monitoringa_zashiti_i_upravleniya_porshnevih_kompressorov_bitzer.

5. REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING. Частотные преобразователи для холодильной техники. Серии AKD 2800 и AKD 102: Технические публикации Danfoss. URL: <http://adapcool.com/files/pdf/AKD.pdf>.