

Список літератури

1. Нашта А. Н. Как создать конкурентноспособный продукт? Пельмени. Равиоли / А. Н. Нашта // Мясное дело. – 2006. – № 9. – С. 15–19.
2. Дейниченко Г. В. Оборудование предприятий питания : справочник. В 3 ч. Ч. 1 / Г. В. Дейниченко, В. А. Ефимова, Г. М. Постнов. – Х. : Мир Техники и Технологий, 2002. – 256 с.
3. Дейниченко Г. В. Оборудование предприятий питания : справочник. В 3 ч. Ч. 2 / Г. В. Дейниченко, В. А. Ефимова, Г. М. Постнов. – Х. : Мир Техники и Технологий, 2003. – 380 с.
4. Компания «Новатор» представляет: пельменный аппарат ПП-05 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <<http://pelmen.vgrad.ru>>.
5. Оборудование для производства замороженных полуфабрикатов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <<http://pelmeni.at.ua/index>>.

Отримано 01.11.2013. ХДУХТ, Харків.

© Н.О. Афукова, Ж.Ж. Стародуб, 2013.

УДК 621.565.83

О.Г. Дьяков, доц.

Ж.В. Воронцова, доц.

В.В. Качалов, ст. викл.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ХОЛОДИЛЬНИХ АГРЕГАТІВ НА БАЗІ КОМПРЕСОРІВ ІЗ РЕГУЛЬОВАНИМ ЧИСЛОМ ОБЕРТІВ

Розглянуто підхід до підвищення ефективності роботи холодильного устаткування на базі використання агрегатів із регулюванням продуктивності. Для регулювання продуктивності пропонується використання частотного керування швидкістю обертання компресора. Отримано основні співвідношення, що дозволяють оцінити вимоги до апаратури керування.

Рассмотрен подход к повышению эффективности работы холодильного оборудования на базе использования агрегатов с регулированием производительности. Для регулирования производительности предлагается использование частотного управления скоростью вращения компрессора. Получены основные соотношения, позволяющие оценить требования к аппаратуре управления.

Improve the efficiency of refrigeration equipment based on the use approach units with capacity control. To control the performance we propose using frequency control speed compressor. We obtain the basic relations that assess the requirements for instrumentation control.

Постановка проблеми у загальному вигляді. У наш час велика увага приділяється питанням підвищення ефективності роботи технологічного устаткування на основі оптимізації споживання енергії холодильними установками, збільшення терміну служби компресора, підвищення холодильного коефіцієнта системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний підхід до вирішення даної проблеми базується як на вдосконаленні контрольно-вимірювальної апаратури, так і на широкому використанні універсальних контролерів, що, дозволяють реалізувати будь-які режими роботи холодильних агрегатів [1]. У сучасних холодильних агрегатах малої та середньої потужності найбільш широке застосування має релейний режим керування, що, не відповідає сучасним тенденціям розвитку холодильних установок та стримує зростання ефективності їхнього застосування. Сучасна тенденція вдосконалення систем керування холодильними агрегатами ґрунтується на використанні компресорів із регульованою продуктивністю. Звичайно компресор холодильного агрегату підбирається відповідно до максимально можливого навантаження системи, що змінюється протягом роботи. Статистичні дослідження, проведені в цьому напрямі, показують, що в середньому 85% часу система працює з частковим навантаженням [2]. Приводом компресора є асинхронний електродвигун. Ураховуючи, що електродвигун холодильного агрегату є індуктивним навантаженням, то недовантаження його за потужністю призводить до зменшення коефіцієнта потужності живильної енергосистеми і, як наслідок, призводить до зниження економічних показників. Традиційні методи компенсування надлишкової потужності компресора шляхом застосування релейного регулювання не відповідають сучасним підходам у теорії керування. Тому дослідження питання регулювання продуктивності компресорів є актуальною проблемою.

Мета та завдання статті – аналіз можливостей підвищення ефективності роботи холодильних агрегатів на основі застосування компресорів із регульованою продуктивністю та визначення орієнтовних кількісних характеристик для створення системи керування холодильного агрегату.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основним елементом, що визначає швидкість обертання компресора холодильного агрегату і, відповідно, його продуктивність є електродвигун. У компресорах, виходячи з умов їхньої роботи,

застосовуються переважно асинхронні двигуни. Застосування двигунів постійного струму або крокових двигунів не доцільно з економічних міркувань. Однак існуючі технічні рішення регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів досить складні й вимагають застосування спеціальних пристроїв.

Аналіз літературних джерел показує, що питання підвищення ефективності роботи компресорів у переважній більшості розглядаються для компресорів великої потужності [3], [4]. У [5] розглянуто загальні принципи використання частотно-регульованих приводів для регулювання шахтних повітряно-компресорних станцій. Для керування приводом компресора використовувався промисловий перетворювач який змінював частоту живлення електропривода у межах 30...50 Гц. У праці [6] розглянуто питання щодо дослідження роботи приводу в разі змін напруги живлення (за постійної частоти) методом математичного моделювання. Як джерело живлення електричного двигуна використовують інвертори, що побудовані на сучасній мікропроцесорній базі [7–11].

Розглянемо проблеми, пов'язані з регулюванням швидкості обертання асинхронного двигуна. Для асинхронних двигунів варто розрізнити частотне керування, коли регулюються як частота живильної напруги двигуна, так і її амплітуда, та амплітудне керування [7]. За амплітудного керування регулюється тільки амплітуда прикладеної до статора напруги за незмінної частоти та контролю струму двигуна. Реалізація амплітудного керування значно простіша ніж реалізація частотного керування. Однак амплітудне керування не дозволяє одержати швидкість обертання двигуна вище за номінальне значення. Тому основну увагу буде приділено питанням реалізації частотного керування.

Відомо, що швидкість обертання асинхронного електродвигуна визначається швидкістю обертання магнітного поля статора n_0 , що виражається такою формулою [7], [9], [10]:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (1)$$

де f – частота живильної мережі, p – число пар полюсів статора двигуна.

Швидкість обертання ротора n_p визначається з виразу

$$n_p = \frac{60f}{p}(1-s), \quad (2)$$

де s – ковзання ротора, обумовлене виразом $s = \frac{n_0 - n_p}{n_0}$.

Зі співвідношення (2) бачимо, що можливі три прийоми регулювання швидкості обертання електродвигуна: зміною частоти живлення f , зміною кількості пар полюсів p або зміною ковзання s . Розглянемо ці способи:

а) регулювання частоти обертання двигуна шляхом зміни кількості пар полюсів дає можливість одержати незначне дискретне число швидкостей (не більше чотирьох значень швидкості обертання);

б) регулювання величини ковзання s можливе тільки у двигунах з фазним ротором, що, не використовуються в холодильних установках;

в) найбільш перспективним напрямком вирішення проблеми регулювання числа обертів електродвигуна є зміна частоти живильної мережі. Однак застосування даного методу викликає певні складнощі.

На сьогодні, існують два підходи під час використання частотного керування напругою живлення двигуна: частотний та частотно-струмовий метод. За частотного методу керування частота напруги живлення електродвигуна є незалежним параметром, що, задається вхідним сигналом приводу змінного струму [7–9]. Необхідність зміни величини живильної напруги зумовлена зміною комплексного опору двигуна, що залежить від частоти. Тому кутова швидкість обертання визначається частотою живлення, що є вхідним керуючим сигналом. Механічні характеристики приводу із частотним керуванням – жорсткі. Зрівноважування моменту навантаження на валу електродвигуна відбувається за рахунок зміни струму ротора завдяки саморегулюванню, що, властиве всім електричним машинам.

Таким чином, за частотного керування формують частоту й амплітуду живильної напруги, але лише частота є незалежним параметром. Основне застосування даних приводів – розімкнуті системи керування регулюванням швидкості.

За частотно-струмового керування незалежним параметром є амплітуда струму, що, живить електродвигун. Частота зміни струмів двигуна не є незалежним параметром, а утворюється за рахунок зворотного зв'язку за кутовою швидкістю або ротора, або магнітного потоку, або електрорушійна сила [7–10].

Механічні характеристики приводу із частотно-струмовим керуванням – м'які. Основне застосування приводів із частотно-струмовим керуванням – замкнуті швидкісні й позиційні системи керування.

Відповідно до проведеного аналізу й цілей дослідження необхідним для вирішення поставленого завдання є застосування частотного керування електродвигуном. Це зумовлено тим, що

основне завдання, поставлене під час вирішення даної проблеми, – плавне регулювання швидкості обертання компресора холодильного агрегату у разі можливої зміни моменту навантаження.

Розглянемо більш докладно процеси, що відбуваються в електродвигуні під час частотного керування.

У першому наближенні асинхронний двигун може бути представлений у вигляді послідовного з'єднання активного опору R і індуктивності L . Отже, повний комплексний опір двигуна $Z(f)$ залежить від частоти й визначається виразом

$$Z(f) = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2} . \quad (3)$$

Тому, під час реалізації частотного керування двигуном необхідно одночасно із частотою змінювати й напругу, що, подається на електродвигун. Величина напруги, що, має живити двигун, залежить від номінального струму I_n , який не повинен бути перевищений у всьому частотному діапазоні регулювання. Дійове значення напруги визначається виразом

$$U(f) = I_n \cdot Z(f) . \quad (4)$$

Сучасний підхід побудови систем частотного регулювання заснований на використанні автономних інверторів, що, перетворюють постійну напругу на змінну з регульованою частотою. При цьому в більшості випадків для зміни величини живильної напруги використовується широтно-імпульсне керування, оскільки, безпосереднє одержання синусоїдальної напруги вимагає значного схемного ускладнення перетворювача [8]. При цьому форма напруги із змінною частотою живильного двигуна має прямокутний вигляд. Особливістю роботи холодильних агрегатів є те, що необхідний діапазон зміни швидкості обертання, за літературними джерелами, не перевищує трьох [2]. Реальний діапазон частот, який необхідно перекрити, – 30...90 Гц. У цьому випадку можна використати більш прості схемні рішення побудови перетворювача частоти.

Розглянемо основні розрахункові співвідношення на прикладі двигуна агрегату ДХМ. Вихідні дані такі: номінальна напруга $U_n = 220$ В, номінальний струм $I_n = 1,26$ А, активний опір обмотки двигуна $R = 37,5$ Ом, індуктивність обмотки $L = 0,55$ Гн. Одержимо необхідні розрахункові співвідношення для наступних значень частот: 30, 50, 90 Гц. Повний опір обмоток для даних частот дорівнює: $Z(30) = 109$ Ом,

$Z(50) = 174 \text{ Ом}$, $Z(90) = 310 \text{ Ом}$. Виходячи з необхідності забезпечення номінального струму дійове значення напруги має бути таким: $U(30) = 138 \text{ В}$, $U(50) = 220 \text{ В}$, $U(90) = 390 \text{ В}$.

З отриманих співвідношень можна бачити, що для трикратної зміни частоти напруга має змінюватись у 2,85 разу.

Розглянемо можливість застосування частотно-імпульсного керування стосовно того самого агрегату. Після випрямлення напруги мережі 220 В на виході випрямляча буде отримана постійна напруга 310 В. Із цієї напруги сформуємо змінну імпульсну послідовність із періодом 11 мс за тривалості імпульсу 5,4 мс. Розкладання в ряд Фур'є дає можливість одержати коефіцієнти гармонік, використовуючи які можна визначити струм двигуна за негармонійного впливу.

$$b_{1n} = \frac{2}{5.5} \int_0^{5.5} \left(f_{1n} \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{5.5}\right) \right) dx, \quad (5)$$

$$F_{1n} = \frac{2}{5.5} \sum_{n=1}^k b_{1n} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{5.5}\right). \quad (6)$$

На рис. 1 наведені вихідні розрахункові співвідношення та результати гармонійного аналізу імпульсної послідовності стосовно частоти 90 Гц. Тривалість імпульсу прийняли такою, що дорівнює 5,5 мс.

На рис. 2, 3 наведено результати розрахунку в програмі Mathcad, де зображені графіки першої гармоніки прямокутного сигналу та сумарний сигнал, отриманий шляхом розкладання й підсумовування перших п'яти гармонік (6).

Коефіцієнти розкладання для даного сигналу мають такі значення: $b_1 = 1,271$; $b_3 = 0,418$; $b_5 = 0,244$. Виходячи з отриманих результатів, слід зазначити, що в даному розкладанні присутні тільки непарні гармоніки, а гармоніками вище за п'яту можна знехтувати через їхню малість. Використовуючи отримані дані, можна знайти дійове значення струму двигуна, що, дорівнює $I(90) = 0,9 \text{ А}$ та є меншим за необхідне номінальне значення. Зробивши аналогічні розрахунки для частот 30 і 50 Гц, одержимо $I(30) = 1,216 \text{ А}$; $I(50) = 1,203 \text{ А}$.

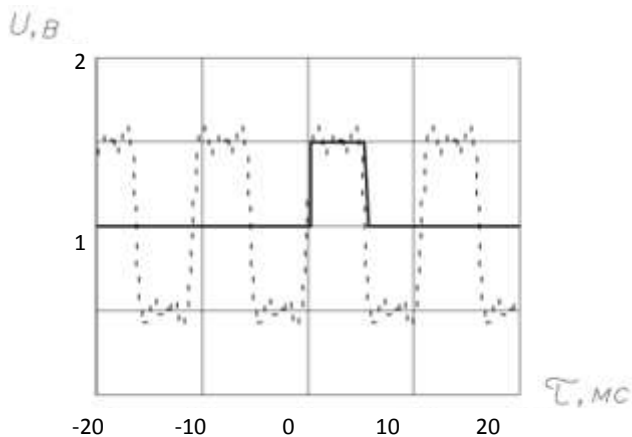


Рисунок 1 – Вихідні співвідношення та результат гармонійного аналізу досліджуваної імпульсної послідовності

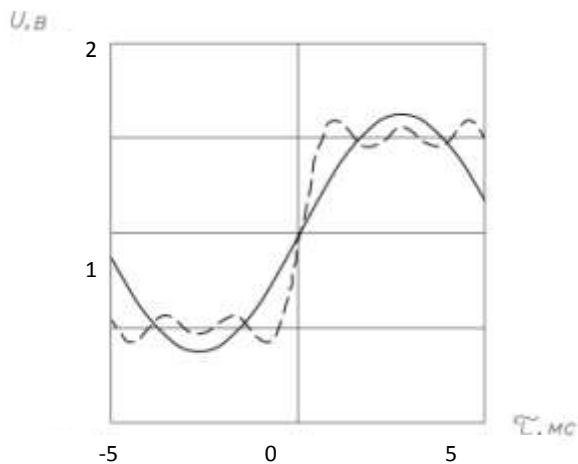


Рисунок 2 – Приклад розкладання прямокутного сигналу

Маючи отримані гармонійні складові для струмів, можна змоделювати вид сумарного сигналу, що діє на обмотки двигуна. На рис. 3 показані отримані розрахунковим шляхом графіки струму двигуна, що протікає через обмотку, за різних значень живильної частоти. Сигнал $I_1(x)$ відповідає частоті 90 Гц, $I_2(x)$ – частоті 50 Гц, $I_3(x)$ – частоті 30 Гц.

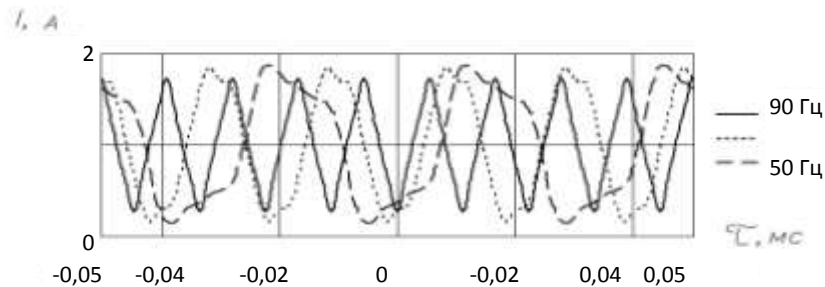


Рисунок 3 – Форма струмів в обмотці двигуна за умови різної частоти живлення

З отриманих графіків можна бачити, що найбільше відхилення від форми синусоїдального сигналу відбувається на частоті 30 Гц. Однак, з урахуванням постійної часу двигуна й компресора можна припустити, що коливання швидкості не будуть проявлятися. У цілому проведений аналіз показав, що запропонований спосіб керування вимірювання досліджуваних значень забезпечить виконання вимог, запропонованих до холодильних установок.

Висновки. Отримані попередні розрахунки показують, що за даної живильної напруги досягти номінального значення струму двигуна неможливо. Для остаточного вибору технічних рішень з використання частотного регулювання швидкості обертання двигуна та компресора необхідно провести додаткові дослідження сучасними методами математичного моделювання в наступних напрямках. У першу чергу, необхідно проаналізувати реальне навантаження на двигун за умов різних режимів роботи компресора (пуск агрегату, збільшення холодопродуктивності, підтримання заданого значення температури, ступінь завантаження холодильного агрегату). Для цього необхідно одержати й проаналізувати механічну характеристику компресора (залежність моменту опору від частоти обертання) залежно від температури. Припустимо, що можна обмежитися зниженням верхнього діапазону частоти до 75 Гц, тоді можливо підібрати тривалість імпульсів, при яких I_n практично буде дорівнювати заданому значенню.

Для дослідження роботи компресора на різних частотах необхідно розробити спеціалізоване вимірювальне устаткування для визначення дійового значення струму. Це зумовлено тим, що існуючі вимірювальні прилади проградуїровані під синусоїдальний струм й іншу форму струму, і тому будуть вимірювати з великою похибкою. Застосування комп'ютерних технологій на початковому етапі досліджень економічно не доцільне, тому основний підхід має

базуватися на розробці й використанні засобів аналогової обчислювальної техніки для побудови вимірювальних пристроїв, що істотно знижують час проведення експериментів.

Доцільним є проведення досліджень з підвищення величин живильної напруги й уточнення тривалості поданих імпульсів. Необхідно також оцінити складність та доцільність схемних рішень під час використання широтно-імпульсної модуляції. Можливим напрямком спрощення її застосування є визначення деякого дискретного числа частот, у межах яких тривалість живильного імпульсу залишається незмінною.

У цілому застосування частотного регулювання для керування холодильними установками дозволить підвищити економічну ефективність їхньої роботи.

Список літератури

1. Сучасні рішення регулювання продуктивності. за матеріалами фірми Danfoss Холод М+Т. – 2006. – № 3. – С. 24–25.
2. Компресори з регульованою частотою обертання. за матеріалами фірми Danfoss Холод М+Т. – 2006. – № 36. – С. 32–33.
3. Refrigeration systems. Energy Efficiency Reference Guide. – 2010. – № 5. – С. 30–31.
4. Tony Evans. The Different Technologies for Cooling Data Centers / Tony Evans // Schneider Electric. Data Center Science Center. – 2012.
5. Зараев В. И. Частотно-регулируемый электропривод – современный путь к совершенствованию установок с объемными компрессорами [Электронный ресурс] / В. И. Зараев, О. Ю. Устюшенкова, Б. С. Хрусталеv. – Режим доступа : <http://vacon.spb.ru/_FileRoot/statja.pdf>.
6. Курляк П. О. Моделювання електромеханічних систем уніфікованим методом bond graph / П. О. Курляк // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : конф. : [матеріали]. – Кременчук : КНУ, 2011. – С. 203–204.
7. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Техническая кибернетика. К 3. Исполнительные устройства и сервомеханизмы / под. ред. д-ра техн. наук проф. В. В. Солодовникова. – М. : Машиностроение, 1976. – 275 с.
8. Руденко В. С. Приборы и устройства промышленной электроники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – К. : Техника, 1990. – 368 с.
9. Фираго Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – М. : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
10. Онищенко Г. Б. Электрический привод / Г. Б. Онищенко. – М., 2003. – 313 с.
11. Electrical Energy Equipment: Compressors and Compressed Air Systems. – 2006. – № 2. – 51 с.

Отримано 01.11.2013. ХДУХТ, Харків.

© О.Г. Дьяков, Ж.В. Воронцова, В.В. Качалов, 2013.