

А.Ф. ДАНИЛЕНКО, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
А.Г. ДЬЯКОВ, канд. техн. наук, ХГАТП (г. Харьков)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

Розглянуто підхід що до підвищення ефективності роботи холодильного устаткування на базі використання агрегатів з регулюванням продуктивності. Для регулювання продуктивності пропонується використання частотного управління швидкістю обертання валу компресора із застосуванням мікроконтролера. Одержані основні співвідношення, що дозволяють визначити вимоги до апаратури управління.

Approach is considered for the increase of efficiency work refrigeration equipment on the base of the use aggregates with adjusting of productivity. Adjusting is executed with the use of frequency management by speed of rotation billow compressor. The management is carried out with the use of microcontroller. Basic correlations are got, for determination of requirements to the apparatus of management.

Постановка проблеми. В настоящее время большое внимание уделяется повышению эффективности работы различного технологического оборудования. Одним из таких видов оборудования являются холодильные агрегаты, которые работают практически круглосуточно. Поэтому вопрос повышения эффективности их работы путем снижения потребления электроэнергии является актуальной задачей.

Существующие методы повышения эффективности их работы можно разделить на две группы: повышение эффективности за счет применения эффективных конструктивных решений и применение микропроцессорной техники для реализации эффективных законов управления двигателем компрессора. Недостатком первого метода может быть существенное усложнение конструкции холодильного агрегата. Более перспективным является внедрение рациональных алгоритмов управления холодильными агрегатами на базе широкого использования микропроцессорной техники, в частности, микроконтроллеров [1, 2].

Анализ литературы. Теоретической базой разработки и внедрения алгоритмов управления двигателями холодильных агрегатов (в них используются асинхронные двигатели переменного тока) являются работы Ю.П. Петрова по разработке оптимальных алгоритмов частотного управления двигателями переменного тока [3]. В данной работе на основе применения вариационного исчисления, обоснованы и получены оптимальные алгоритмы управления разгоном асинхронного двигателя по критерию минимума нагрева обмоток двигателя. В этом случае мощность, потребляемая двигателем при разгоне, является минимальной, а время разгона остаётся достаточно малым. Подобный подход можно применить для существующих холодильных

агрегатов, которые используют повторно-кратковременный режим работы. Примерная структура системы управления приведена на рис. 1.

Введение в систему управления микроконтроллера позволяет уменьшить гистерезис срабатывания датчика температуры, и обеспечить более качественный температурный режим хранения продуктов.

Известно, что при частотном управлении необходимо одновременно изменять амплитуду напряжения питания и его частоту с целью недопущения достижения током двигателя критических значений. Однако, учитывая, что диапазон изменения частоты незначительный, можно предложить следующий подход. Питание двигателя осуществлять прямоугольными импульсами напряжения с целью упрощения схемной реализации системы управления. На основной частоте питания двигателя (50 Гц) при заданном напряжении длительность прямоугольных импульсов, подаваемых на двигатель, выбирается из значения его номинального тока. Нижняя граница регулирования по частоте напряжения питания выбрана равной 10 Гц. При неизменной длительности импульсов питания значение тока в обмотках двигателя превышает номинальное значение в несколько раз. Однако для асинхронных двигателей это не является существенным ограничением, поскольку они допускают многократные перегрузки при пуске. Точное определение допустимых значений токов зависит от параметров конкретного двигателя и обычно уточняется на стадии проведения необходимых предварительных исследований.

Вторым направлением исследований по повышению эффективности работы холодильных агрегатов является применение микропроцессорной техники для частотного управления электродвигателем компрессора. Учитывая современный уровень исследований в этом направлении, можно отметить следующее: для изменения производительности холодильного агрегата в соответствии с требованиями обеспечения необходимого температурного режима лучше использовать частотный метод управления скоростью вращения электродвигателя [3, 4]. Необходимость изменения частоты при этом обусловлена следующими причинами: холодильные агрегаты обычно рассчитывают на максимальную тепловую нагрузку, поэтому при сезонных колебаниях температуры они редко работают на полную мощность. Установлено, что в среднем около 65% времени холодильные установки работают с частичной нагрузкой. Поэтому малую нагрузку агрегата компенсируют применением повторно-кратковременного режима работы электродвигателя компрессора либо реализацией конструктивных изменений холодильной камеры.

Решение проблемы. Наиболее эффективное решение данной задачи управления производительностью компрессора – регулирование частоты вращения электродвигателя. Благодаря возможности увеличения частоты можно подбирать компрессоры меньшего типоразмера по сравнению с компрессором с фиксированной частотой вращения. Используя подобные

компрессоры можно легко регулировать холодопроизводительность применительно к реальной тепловой нагрузке. Структурная схема системы управления для этого случая изображена на рис. 1.

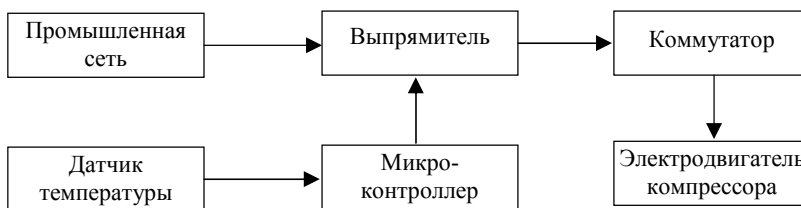


Рис. 1. Структурная схема системы управления

С помощью микроконтроллера реализован закон изменения частоты питающего напряжения электродвигателя компрессора холодильного агрегата. Питающее напряжение после выпрямителя поступает на коммутатор, который позволяет изменять частоту тока, подаваемого на двигатель. Закон изменения частоты определяется аналитическим соотношением, коэффициенты которого определены с учетом технических характеристик электродвигателя и механической нагрузки компрессора и занесены в память микроконтроллера.

Возможность реализации подобного подхода основана на следующих предварительных оценках. Основные расчетные соотношения для двигателя агрегата ДХМ следующие: номинальное напряжение $U_n = 220$ В, номинальный ток $I_n = 1,26$ А, активное сопротивление обмотки двигателя $R = 37,5$ Ом, индуктивность обмотки $L = 170,5$ Гн. Произведя необходимые расчеты для значений частот: 30, 50, 90 Гц, получим, что полное сопротивление обмоток для выбранных частот составит соответственно: $Z(30) = 109$ Ом, $Z(50) = 174$ Ом и $Z(90) = 310$ Ом. Исходя из необходимости обеспечения номинального тока при любых частотах, действующие значения напряжения должны быть следующими: $U(30) = 138$ В, $U(50) = 220$ В, $U(90) = 390$ В. Из полученных соотношений следует, что для диапазона с трехкратным изменением частоты напряжение питания должно изменяться только в 2,85 раза.

Рассмотрим возможность применения частотно-импульсного управления применительно к тому же агрегату. После выпрямления напряжения сети 220 В на выходе выпрямителя будет получено постоянное напряжение 310 В. Из этого напряжения сформируем переменную импульсную последовательность с периодом 11 мс при длительности импульса 5,4 мс. Выполнив анализ формы напряжения с помощью рядов Фурье, были определены коэффициенты гармонических составляющих, используя которые можно определить форму тока двигателя при негармоническом воздействии. На рис. 2 приведены исходные расчетные соотношения и результаты гармонического анализа импульсной последовательности применительно к

частоте 90 Гц выполненные при моделировании системы управления в MathCad. Длительность импульса принималась равной 5,5 мс.

$$b1_n = \frac{2}{5,5} \int_0^{5,5} (f1(x, a_1, a_2) \sin\left(\frac{\pi n x}{5,5}\right)) dx; \quad F1(x) = \sum_{n=1}^k b1_n \sin\left(\frac{\pi n x}{5,5}\right)$$

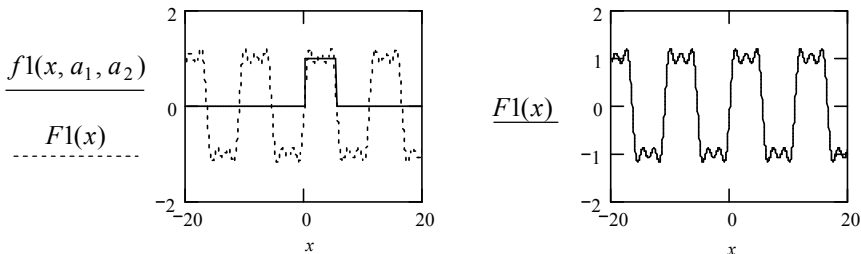


Рис. 2. Исходные соотношения и результат гармонического анализа исследуемой импульсной последовательности

На рис. 3 приведены графики первой гармоники прямоугольного сигнала и суммарного сигнала, полученного путем разложения и суммирования первых пяти гармоник.

Коэффициенты разложения для данного сигнала имеют следующие значения: $b1 = 1,27$; $b3 = 0,418$; $b5 = 0,244$. Исходя из полученных результатов, следует отметить, что в данном разложении присутствуют только нечетные гармоники, а гармониками выше пятой можно пренебречь ввиду их малости. Используя полученные данные определено действующее значение тока двигателя, которое составляет $I(90) = 0,9$ А и меньше требуемого номинального значения. Произведя аналогичные расчеты для частот 30 Гц и 50 Гц, получим $I(30) = 1,216$ А; $I(50) = 1,203$ А.

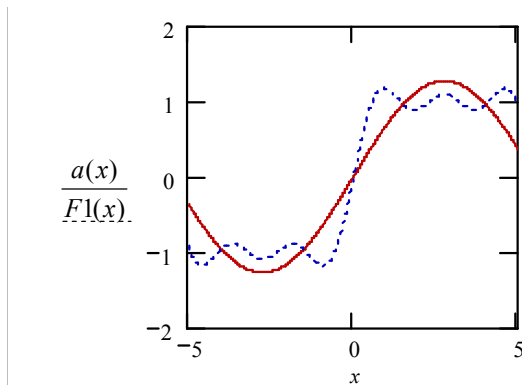


Рис. 3. Пример разложения прямоугольного сигнала

Имея полученные гармонические составляющие для токов можно смоделировать вид суммарного сигнала действующего на обмотки двигателя. На рис. 4 показаны полученные расчетным путем графики тока, протекающего через обмотку двигателя, при различных значениях питающей частоты. Сигнал изменения тока электродвигателя – $I_1(x)$ соответствует частоте 90 Гц, $I_2(x)$ – частоте 50 Гц, $I_3(x)$ – частоте 30 Гц.

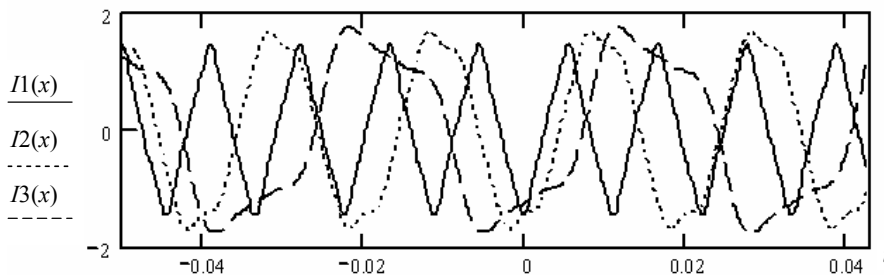


Рис. 4. Форма токов в обмотке двигателя при различной частоте питания

Проанализировав сигналы из полученных графиков можно сделать заключение, что наибольшее отклонение сигнала от синусоидальной формы имеет место на частоте 30 Гц. Однако, учитывая постоянные времени двигателя и компрессора можно предположить, что на колебаниях скорости данные искажения не будут проявляться. В целом проведенный анализ показал, что предложенный способ управления в целом может обеспечить выполнение требований, предъявляемых к холодильным установкам.

Выводы. Полученные предварительные расчеты показывают, что при данном питающем напряжении достичь номинального значения тока двигателя невозможно. Применение микроконтроллера в системе управления позволяет легко реализовать динамический разгон электродвигателя компрессора, что значительно снижает энергозатраты и повышает надежность оборудования. Для окончательного выбора технических решений по использованию частотного регулирования скорости вращения двигателя компрессора необходимо провести дополнительные исследования современными методами математического моделирования [6, 7] в следующих направлениях.

В первую очередь необходимо проанализировать реальную нагрузку на двигатель при различных режимах работы компрессора (пуск агрегата, увеличение хладопродуктивности, поддержание заданного значения температуры, степень загрузки холодильного агрегата). Для этого необходимо получить и проанализировать механическую характеристику компрессора

(зависимость момента сопротивления от частоты вращения) в зависимости от температуры.

Целесообразно проведение исследований по повышению величины питающего напряжения и уточнению длительности подаваемых импульсов.

Необходимо также оценить сложность и целесообразность схемотехнических решений при использовании широтно-импульсной модуляции. Возможным направлением упрощения её применения является определения некоторого дискретного числа частот, в пределах которых длительность питающего импульса остаётся неизменной.

Если допустимо ограничиться снижением верхнего диапазона частоты до 75 Гц, то можно подобрать длительность импульсов, при которых I_n практически будет равен заданному значению.

В целом применение частотного регулирования для управления холодильными установками позволит значительно повысить экономическую эффективность их работы, что и показало данное исследование.

Список литературы: 1. Сучасні рішення регулювання продуктивності // Холод М+Т. – 2006. – № 3. – С. 24–25. 2. Компресори з регульованою частотою обертання // Холод М+Т. – 2006. – № 36. – С. 32–33. 3. Петров Ю. П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву. – Л.: Энергия, 1971. – 144 с. 4. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Техническая кибернетика. Книга 3. Исполнительные устройства и сервомеханизмы. Под. ред. д-ра техн. наук проф. В.В. Солодовникова. – М.: "Машиностроение", 1976. – 352 с. 5. Приборы и устройства промышленной электроники / В.С. Руденко, В.И. Сенько, В.В. Трифонюк (Б-ка инженера). – К.: Техніка, 1990. – 368 с. 6. Математическое моделирование / Под. ред. Дж. Эндрюса и Р. Мак-Лоуна. – М.: Мир, 1979. – 278 с. 7. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

Поступила в редакцию 30.09.2007