

Сколько компрессоров должно быть в кондиционере?

Мицубиси Электрик приступила к поставкам VRF-систем Сити Мульти, использующих хладагент R410A. Одна из идей, которая четко прослеживается в новых моделях, – минимизация количества компрессоров и вентиляторов. Теперь системы до 45 кВт строятся по однокомпрессорной схеме и имеют один вентилятор, а системы до 90 кВт содержат всего 2 компрессора и 2 вентилятора.

Житейский опыт подсказывает, что более надежной будет та система, которая содержит большее количество однотипных компонентов. К такому же выводу приходит автор статьи «Надежность VRF-систем кондиционирования воздуха» С.В. Брух (АВОК 2004. №7), рассуждая об оптимальном с точки зрения надежности количестве компрессоров в мультизональных системах.

Возникает вопрос: почему вывод автора противоречит генеральной линии, избранной разработчиками VRF-систем Мицубиси Электрик? То ли инженеры конструкторского бюро слабо разбираются в теории надежности, или, может быть, создав модель на 10HP по однокомпрессорной схеме, они просто продолжают упорствовать в своем заблуждении, стремясь уменьшить количество компрессоров и вентиляторов и в более мощных моделях?

Обратимся еще раз к рассуждениям автора – возможно, в них закралась ошибка. При внимательном рассмотрении оказывается, что рассуждения базируются на неверном начальном предположении. Такие события, как отказ компрессора №1, отказ компрессора № 2 и т.д., входящих в наружный блок не являются независимыми. Объясняется это тем, что компрессоры в VRF-системах соединены в общий гидравлический контур, в котором циркулирует не только хладагент, но и масло.

Отказ компрессора во многих случаях ведет к ухудшению смазывающих характеристик холодильного масла: попадание продуктов сгорания, разгерметизация контура и попадание воздуха и влаги, образование кислоты и т.п. При этом вероятность безотказной работы оставшихся компрессоров становится практически нулевой.

Многие производители, поставляющие многокомпрессорные VRF-системы, заявляют о возможности работы агрегата при неисправности одного или нескольких компрессоров. Беда в том, что пользователи склонны толковать это утверждение буквально: «Систему можно эксплуатировать до тех пор, пока в наружном блоке не закончатся все компрессоры». В действительности, работа блока с неисправным компрессором



Рис. 1
VRF-система
Mitsubishi Electric
производительностью
до 45 кВт



Рис. 2
VRF-система
Mitsubishi Electric
производительностью
до 90 кВт

События могут быть зависимыми и независимыми. Смысл независимости заключается в том, что вероятность появления одного события не зависит от того, произошло или не произошло другое событие.

Теорема умножения вероятностей

Вероятность произведения (совместного появления) двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого при условии, что первое событие произошло

$$P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B|A) = P(B) \cdot P(A|B) \cdot (1)$$

Только для независимых событий A и B формула (1) упрощается и принимает частный вид: вероятность одновременного появления A и B (произведения событий) равна произведению вероятностей каждого из них:

$$P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B) \cdot (2)$$

Теорема сложения вероятностей

Вероятность появления хотя бы одного из двух событий равна сумме вероятностей этих событий минус вероятность их совместного появления

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(A \cdot B) \cdot (3)$$

в контуре – это аварийный режим, пользоваться которым можно только в исключительных случаях, и только после тщательной проверки физико-химических свойств масла. Если дать возможность эксплуатирующей службе заказчика самостоятельно принимать решение об эксплуатации системы в таком режиме, то выход из строя остальных компрессоров не заставит себя долго ждать.

В свете вышесказанного скорректируем решение задачи, приведенной в статье. Пусть вероятность безотказной работы любого компрессора в исправной системе равна 0,99. Исходные данные нужно дополнить условными вероятностями. Для того чтобы избежать споров, предположим, что вероятность безотказной работы одного компрессора при неисправности другого снижается до 0,5, а при неисправности двух – до 0,25. То есть в половине случаев компрессор выходит из строя «аккуратно», и его можно оставить в системе, не опасаясь отказа остальных. Введем обозначения для следующих событий:

- O** – наружный блок может работать;
- A** – компрессор №1 исправен;
- B** – компрессор №2 исправен;
- C** – компрессор №3 исправен;
- $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ – противоположные события, то есть компрессоры 1, 2, 3 неисправны.

Составим, к примеру, событие «обеспечение 50% мощности в трехкомпрессорной системе». Цитируем автора: «Нормальная работа системы будет наблюдаться при работе всех трех компрессоров, при выходе из строя компрессора №1, при выходе из строя компрессора №2, при выходе из строя компрессора №3, при одновременном выходе из строя компрессоров №2 и №3». Запишем это в наших обозначениях (индексы указывают последовательность событий):

$$O = A_1 B_2 C_3 + \bar{A}_1 B_2 C_3 + \bar{B}_1 A_2 C_3 + \bar{C}_1 A_2 B_3 + \bar{B}_1 \bar{C}_2 A_3.$$

Тогда запишем вероятность события O и преобразуем, используя теорему сложения вероятностей для несовместных событий:

$$P(O) = P(A_1 B_2 C_3 + \bar{A}_1 B_2 C_3 + \bar{B}_1 A_2 C_3 + \bar{C}_1 A_2 B_3 + \bar{B}_1 \bar{C}_2 A_3) = P(A_1 B_2 C_3) + P(\bar{A}_1 B_2 C_3) + P(\bar{B}_1 A_2 C_3) + P(\bar{C}_1 A_2 B_3) + P(\bar{B}_1 \bar{C}_2 A_3).$$

Первое слагаемое – безусловная вероятность, поэтому

$$P(A_1 B_2 C_3) = P(A_1) P(B_2) P(C_3) = 0,993 = 0,970299.$$

Остальные слагаемые – условные вероятности, поэтому они определяются по теореме умножения вероятностей:

$$P(\bar{A}_1 B_2 C_3) = P(\bar{A}_1) \cdot P(B_2 | \bar{A}_1) \cdot P(C_3 | B_2 \bar{A}_1) = (1 - 0,99) \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 0,0025.$$

Аналогично:

$$P(\bar{B}_1 A_2 C_3) = 0,0025;$$

$$P(\bar{C}_1 A_2 B_3) = 0,0025;$$

$$P(\bar{B}_1 \bar{C}_2 A_3) = P(\bar{B}_1) \cdot P(\bar{C}_2 | \bar{B}_1) \cdot P(A_3 | \bar{B}_1 \bar{C}_2) = (1 - 0,99) \cdot (1 - 0,5) \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 0,00125.$$

В результате:

$$P(O) = 0,970299 + 0,0025 + 0,00125 = 0,974049.$$

Произведя аналогичные вычисления для всех задач, рассмотренных в статье, мы свели их в таблицу 1.

Система	Однокомпрессорная	Двухкомпрессорная	Трехкомпрессорная
Обеспечение 100% мощности	0,99	0,9801	0,9801 (так как обеспечивает 100% на двух компрессорах)
Обеспечение 75% мощности	0,99	0,9801	0,975299
Обеспечение 50% мощности	0,99	0,9901 (может работать только на одном компрессоре, даже на безынверторном)	0,974049

Таблица 1.
Вероятности безотказной работы для n-компрессорных систем

Итак, из приведенного расчета следует вывод. Компрессоры в VRF системах не являются независимыми, поэтому уменьшение числа компрессоров в установке ведет к увеличению ее надежности (вероятности безотказной работы). Выводы автора рассматриваемой статьи были бы справедливы, если каждый из компрессоров имел бы собственный гидравлический контур. Для VRF-систем это невозможно, но в полупромышленных кондиционерах Mr. Slim Мицубиси Электрик с успехом использует данную идею и делит гидравлический контур мощных канальных систем и крышных кондиционеров на две части. [9]