

# Энергетический анализ методов регулирования производительности компрессорного узла VRF-систем кондиционирования



С. В. Брух, руководитель учебного центра компании «Биоконд»

Компания MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES представляет новую многозональную систему кондиционирования воздуха KX4, развивающую направление VRF-систем и продолжающую традиции МНІ выпускать энергосберегающее и экологически безопасное климатическое оборудование.

**П**отребление электрической энергии системами кондиционирования воздуха в энергетическом балансе здания в теплый период занимает ведущее место. Достаточно отметить, что на кондиционирование 1 м<sup>2</sup> площади здания расходуется от 30 до 70 Вт электроэнергии. Тенденция роста тарифов требует внимательного отношения к расходованию энергии и внедрения различных энергосберегающих технологий в системах кондиционирования воздуха. Мультизональные системы кондиционирования (VRF), как

класс, реализовывают принцип зонного регулирования мощности, поэтому обладают следующими преимуществами, снижающими энергопотребление здания:

- индивидуальное регулирование требуемой температуры внутреннего воздуха;
- возможность отключения местных кондиционеров (внутренних блоков) в помещениях периодического использования;
- регулирование холодопроизводительности в зависимости от теплоизбытков объекта кондиционирования в текущий период времени.

## Принципиальная схема двухтрубных VRF-систем MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES

Критерий энергоэффективности оборудования при выборе системы кондиционирования зачастую становится определяющим. Такой подход обоснован не только экономией энергии в период эксплуатации. Подводимая энергия тратится по назначению, поэтому, как правило, энергоэффективное оборудование отличается лучшими показателями надежности, меньшими уровнями шума и вибрации, большим сроком эксплуатации.



**Максимальная величина холодильного коэффициента**

Для оценки энергоэффективности оборудования систем кондиционирования воздуха применяют обобщенный показатель энергетической эффективности, или эксергетический КПД:

$$\eta_e = \frac{N_e}{N}, \quad (1)$$

где  $N$  – мощность, затрачиваемая на привод установки, Вт;

$N_e$  – эксергетическая (приведенная) мощность, Вт.

Значение  $\eta_e$  во всех случаях показывает степень приближения установки к идеальной, у которой все процессы обратимы, т. е.  $\eta_e = 1$ .

Эксергетическая мощность определяется по формуле:

$$N_e = Q_x \times \tau_e, \quad (2)$$

где  $Q_x$  – расчетная холодопроизводительность установки;

$\tau_e$  – эксергетическая температурная функция (фактор Карно).

$$\tau_e = \frac{(T_x - T_{o.c.})}{T_x}, \quad (3)$$

где  $T_x$  – температурный уровень охлаждения, К;

$T_{o.c.}$  – температура окружающей среды, К.

Для всех холодильных установок  $\tau_e < 0$ . Знак  $N_e$  показывает, что мощность отводится от установки.

Для оценки энергетических характеристик холодильных установок чаще используется холодильный коэффициент  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{Q_x}{N}, \quad (4)$$

и эксергетический холодильный коэффициент  $\epsilon_e$ :

$$\epsilon_e = \frac{Q_x}{N_e} = \frac{1}{\tau_e} = \frac{T_x}{T_{o.c.} - T_x}. \quad (5)$$

Определим эксергетический холодильный коэффициент для температурных параметров систем кондиционирования воздуха. Стандартные температурные условия испытания кондиционеров: температура внутреннего воздуха 27 °С, температура наружного воздуха 35 °С. Отсюда  $\epsilon_e$  вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} \epsilon_e &= \frac{T_x}{T_{o.c.} - T_x} = \\ &= \frac{(273 + 27)}{(273 + 35) - (273 + 27)} = \\ &= 37,5. \end{aligned} \quad (6)$$

Холодильные коэффициенты реальных установок кондиционирования значительно меньше и принадлежат диапазону от 2 до 6 единиц. Причины этого в следующем:

1) энергетические потери из-за необратимого теплообмена между источником низкого потенциала и рабочим агентом в испарителе, а также между рабочим агентом и окружающей средой повышенного потенциала в конденсаторе;

2) замена детандера дроссельным вентилем (капиллярной трубкой);

3) сжатие в компрессоре перегретого пара рабочего агента по необратимой политропе вместо обратимого сжатия пара в идеальной установке.

**Термодинамический цикл одноступенчатой парокомпрессионной установки в осях температура/энтропия**

Рассмотрим процесс охлаждения парокомпрессионной холодильной установки в T-S координатах с точки зрения повышения холодильного коэффициента (рис. 1).

1. Процесс сжатия в компрессоре (1–2) сопровождается увеличением энтропии  $\Delta S_k$ . Чем меньше эта величина при одинаковых величинах развиваемого давления, тем лучше качество компрессора и тем выше КПД кондиционера. Общая длина линии 1–2 показывает величину энергопотребления компрессора.

2. Процесс охлаждения перегретого газа до состояния насыщения (2–3). Происходит по линии постоянного давления. Чем меньше длина этой линии, тем выше КПД.

3. Процесс конденсации насыщенного пара (3–4). Конденсация протекает при постоянном давлении с температурой выше температуры окружающей среды на величину  $\Delta T_k$ . Чем больше величина  $\Delta T_k$ , тем выше давление конденсации, тем больше затраты энергии компрессором на сжатие.

4. Процесс переохлаждения жидкости (4–4.1) по линии постоянного давления. Увеличивает холодопроизводительность кондиционера.

5. Процесс дросселирования жидкости (4.1–5.1). Увеличение энтропии между точками снижает холодопроизводительность.

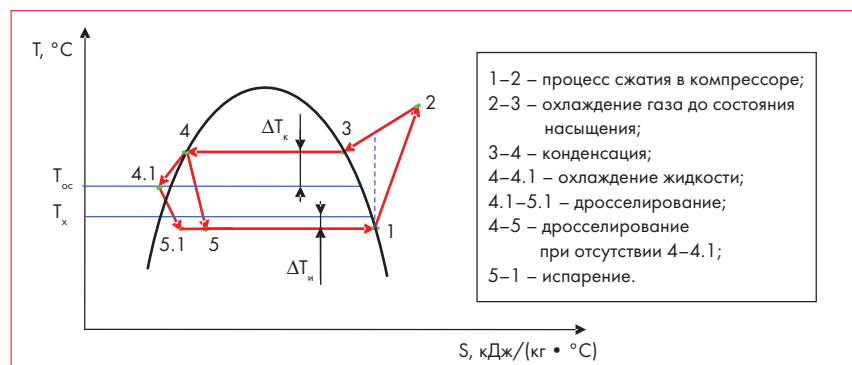
6. Процесс испарения жидкого хладагента (5.1–1). Длина линии пропорциональна величине холодопроизводительности.

Конструкция холодильного контура мультizonальных систем кондиционирования воздуха у различных производителей значительно отличаются друг от друга, что логично приводит к различным энергетическим характеристикам оборудования.

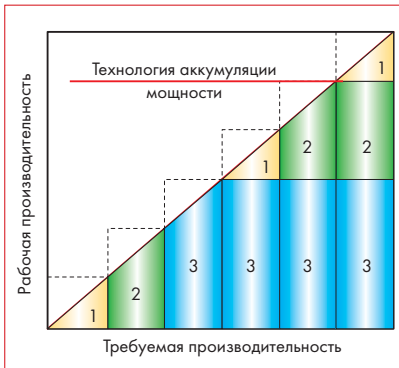
**Методы регулирования производительности компрессоров**

VRF-кондиционеры по назначению являются системами с переменным расходом хладагента. Изменяемая производительность наружного блока – необходимое условие работы мультizonальных систем, подстраивающихся под переменную нагрузку на внутренние блоки. Без сомнения, «сердцем» кондиционера является компрессор, несущий на себе 95 % нагрузки и потребляющий такую же часть электроэнергии. От энергоэффективности и качества данного элемента в первую очередь зависит потребление энергии кондиционера в целом.

Для производителей VRF-систем характерен различный подход к компоновке компрессорного узла наружных блоков и регулированию его



■ Рис. 1. Термодинамический цикл одноступенчатой парокомпрессионной установки



■ Рис. 2. Ступенчатая регулировка производительности в трехкомпрессорной схеме

производительности. На сегодняшний день существуют следующие технологии регулирования производительности наружных блоков VRF-систем: инверторный привод, ступенчатая регулировка с аккумулярованием, байпасирование, импульсная регулировка расстояния между спиральными компрессорами, комбинированный метод. Естественно, каждый способ регулировки характеризуется разными величинами надежности, уровнем шума, уровнем электромагнитных помех, производительности и энергоэффективности кондиционера. Цель данной статьи – оценить именно энергоэффективность VRF-систем с различными конструкциями компрессорного узла и методами его регулировки.

### Ступенчатая регулировка производительности (ON-OFF) компрессоров с блоком аккумулярования

Данный метод регулирования применяется в мультизональных системах кондиционирования серии S компании **FUJITSU GENERAL** (Япония). Суть метода заключается в следующем.

Наружный блок (AOG90R, 10 л. с. или 28 кВт по холоду) содержит три спиральных компрессора с постоянной скоростью вращения (рис. 3). Мощность каждого компрессора различна: 2, 4, 6 л. с. Регулирование мощности наружного блока производится дискретно – комбинированием включения этих компрессоров, и возможна в шести вариантах – 2, 4, 6, 8, 10, 12 л. с. (рис. 2). Диапазон регулирования производительности от 0 до 120 %.

Но потребляемое внутренними блоками количество хладагента изменяется плавно, а не дискретно. Для сглаживания ступеней регулирования применяется технология аккумулярования мощности. Основным элементом регулирования – ресивер, его объем служит разделителем двух потоков жидкого хладагента – «ступенчатый» поток до ресивера и плавный после. Например, внутренние блоки требуют 5 л. с. (14 кВт) холода. Компрессорный

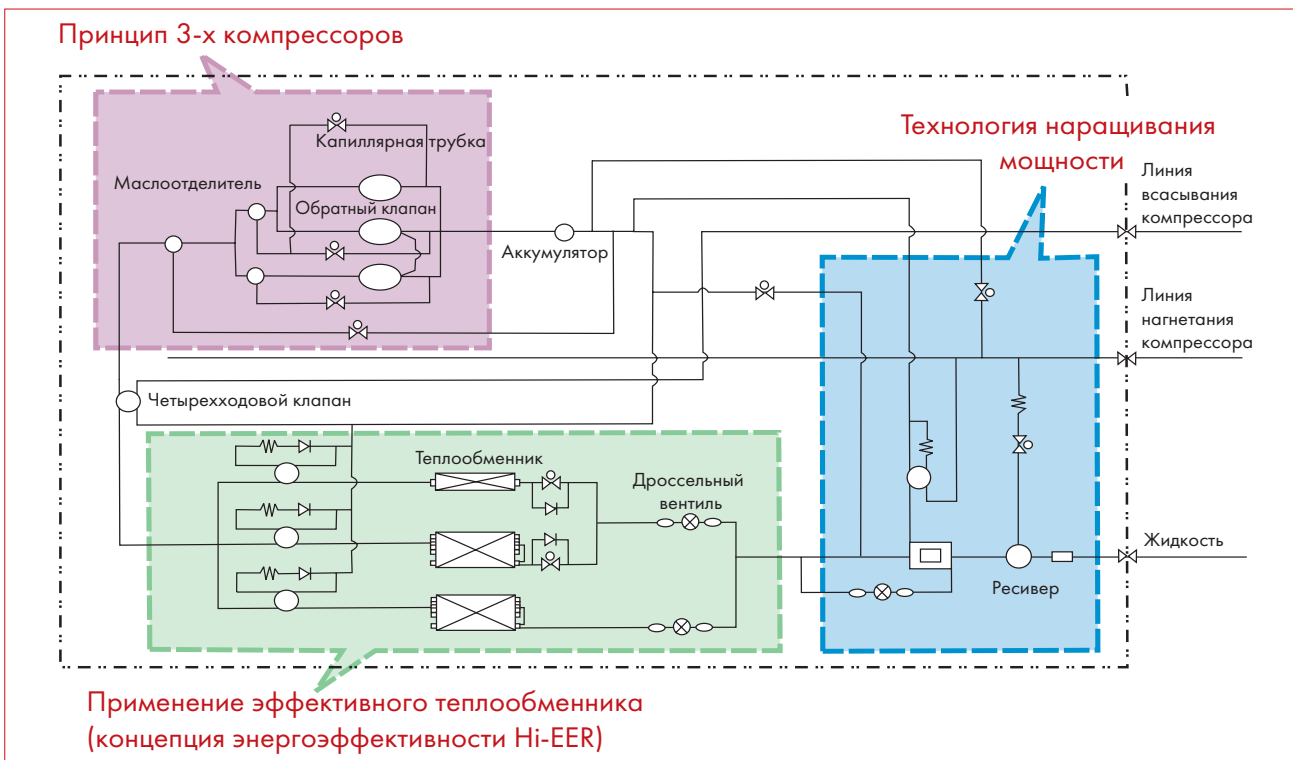
узел может выдать 6 или 4 л. с. Значит, в течение определенного периода времени будет включен один компрессор 6 л. с. и такое же количество времени 4 л. с. В сумме будет выдана требуемая производительность 5 л. с. Пока работает больший компрессор, ресивер накапливает жидкий хладагент, но когда включается компрессор с недостаточной производительностью, ресивер добавляет часть хладагента в систему.

По энергетической эффективности метод ON-OFF регулирования достаточно выгоден. Но изменение холодильного коэффициента носит нелинейный и ступенчатый характер – когда производительность компрессорного узла соответствует суммарной производительности внутренних блоков – холодильный коэффициент максимален, когда попадает в промежуток между ступенями – происходит его снижение (рис. 4).

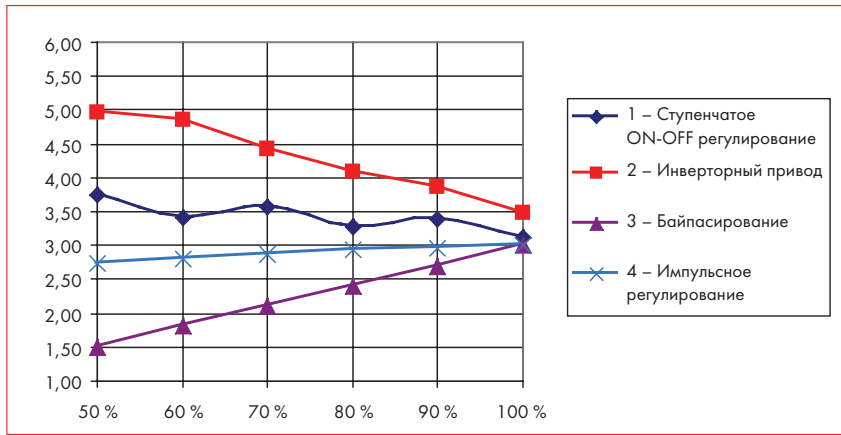
### Регулировка производительности наружного блока с помощью инверторных компрессоров

Только инверторный метод (не комбинированный!) регулирования мощности наружного блока применяется системами кондиционирования серии KX4 **MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES** (Япония).

Вместо периодических запусков и остановок компрессор работает не-



■ Рис. 3. Схема регулирования производительности методом ступенчатого изменения мощности с блоком аккумулярования



■ Рис. 4. Теоретическое изменение холодильного коэффициента при различных методах регулировки производительности компрессоров

прерывно, но с переменной скоростью вращения, из-за чего меняется его производительность. Изменение скорости вращения двигателя компрессора происходит путем изменения напряжения питания двигателя, для чего используется специальное устройство (**инвертор** – частотный преобразователь). Если мощности одного инверторного компрессора не хватает, подключается второй инверторный компрессор, в результате чего нагрузка равномерно распределяется по двум компрессорам.

Инверторное управление компрессорами имеет следующие преимущества:

1. В процессе регулировки производительности исключаются циклы включения/выключения компрессора.
2. Диапазон изменения холодопроизводительности составляет 13–112 % (FDCA450HKXE4 MHI).
3. Пусковые токи уменьшаются до значений меньше рабочих.
4. Уменьшается износ механических деталей компрессора, увеличивается надежность и срок службы кондиционера.
5. Повышается точность поддержания температуры в помещении.

С точки зрения энергетической оценки, изменение частоты вращения компрессора является более выгодным, чем ступенчатое ON-OFF регулирование. Если холодильный коэффициент компрессоров при ступенчатом регулировании практически не изменяется, то при инверторном регулировании компрессора производительность меняется пропорционально скорости вращения. При уменьшении скорости вращения происходит более медленное сжатие газа, процесс сжатия приближается к квазистационар-

ному, возрастание энтропии минимально, следовательно, холодильный коэффициент увеличивается (рис. 3).

### Регулировка производительности наружного блока с помощью байпасирования

Этот способ является самым удобным с точки зрения простоты реализации, но в то же время – самым энергетически неэффективным (рис. 5). При непосредственном перепуске нагретого рабочего вещества на нагнетательной полости во всасывающую (процесс 1–3) резко возрастает температура всасываемого пара, а с ней и температура нагнетания, что вызывает перегрев компрессора. Чтобы избежать этого на всасывании перепускается охлажденный хладагент с конденсатора через дросселирующее устройство (процесс 2–3).

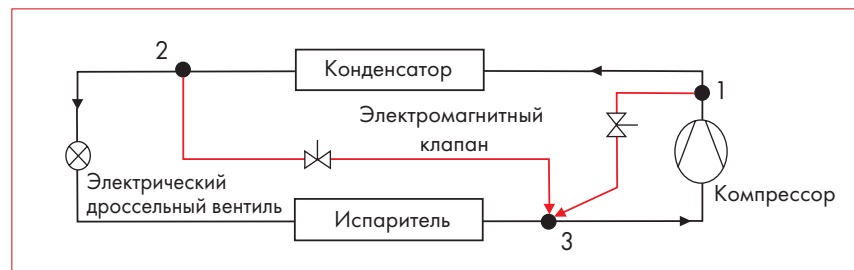
С точки зрения потребляемой энергии компрессором она остается постоянной, т. к. параметры хладагента на всасывании не меняются (расход и давление). А вот производительность наружного блока при регулировке уменьшается. Следовательно, для систем с регулированием производительности байпасированием при уменьшении загрузки на систему холодильный коэффициент падает (рис. 4).

### Регулировка производительности наружного блока импульсной регулировкой расстояния между спиральми компрессора

Компания Copeland (подразделение Emerson Climate Technologies, США) разработала достаточно интересную технологию регулирования производительности компрессоров, суть которой заключается в следующем.

Для регулирования производительности спирального компрессора поднимается верхняя (не вращающаяся) спираль, за счет низкого давления на входе в компрессор, которое как бы подсасывает спираль на 1 мм вверх. Продолжительность разгрузки компрессора регулирует специальный клапан-соленоид, который работает в режиме открыт/закрыт. Производительность компрессора соответствует среднему времени нахождения в нагруженном и разгруженном состоянии. Например, если в 10-секундном цикле нагруженное состояние длится 5 с и разгруженное тоже 5 с, то средняя производительность составит 50 %.

Независимо от нагрузки ротор с нижней спиралью вращается с постоянной скоростью, и при разведенных спиральях (производительность компрессора при этом равна нулю) потребляемая мощность компрессора составляет 10 % от номинальной. Диапазон регулирования производительности наружного блока от 7 до 100 %. С точки зрения потребляемой энергии импульсная регулировка расстояния между спиральми компрессора является более выгодным способом регулирования производительности компрессора, чем байпасирование – нет траты энергии на дросселирование хладагента. Импульсная регулировка очень похожа на другой способ – ON-OFF регулирование компрессоров. И в том и в другом случае производительность компрессора имеет две ступени: 0 и 100 %, а общая производительность зависит от периода времени включения/отключения. Скорость ротора вра-



■ Рис. 5. Схема регулирования производительности наружного блока методом байпасирования компрессора

щения не меняется, поэтому отсутствуют пусковые токи на электродвигателе импульсного компрессора – это несомненное преимущество импульсного регулирования перед ON-OFF регулированием. Но с позиции расхода электроэнергии, чем меньше нагрузка компрессора, тем выгоднее становится ON-OFF регулирование, т. к. в период нулевой производительности по холоду ON-OFF компрессор обладает нулевым потреблением, а импульсный продолжает вращаться и потреблять небольшую часть электроэнергии.

**Регулировка производительности наружного блока комбинированным методом**

Наиболее часто применяемый способ регулирования производительности наружных блоков VRF-систем. Предыдущая серия KX2 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, новая серия V FUJITSU GENERAL и многие другие производители VRF-систем применяют этот метод. В качестве компрессоров, несущих основную нагрузку, применяют компрессора с ON-OFF регулированием, а более точная регулировка осуществляется инверторным компрессором или компрессором с байпасированием хладагента (рис. 6).

В данном случае регулирование производительности наружного блока в зависимости от нагрузки внутренних производится следующим образом. Производительность инверторного (или импульсного) компрессора составляет 40 % от всей мощности наружного блока (в трехкомпрессорной схеме). Производительность двух компрессоров постоянной мощности составляет  $30 \times 2 = 60 \%$  от всей

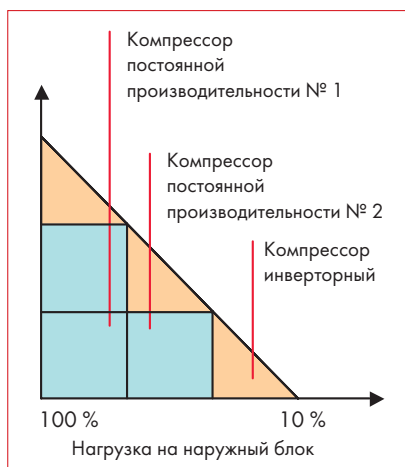


Рис. 6. Изменение холодильного коэффициента наружного блока при регулировке производительности комбинированным методом

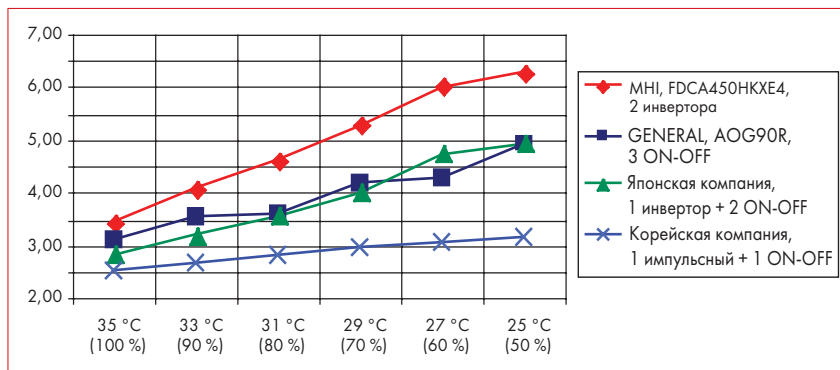


Рис. 7. Изменение холодильного коэффициента наружных блоков VRF-систем различных производителей при уменьшении нагрузки на наружный блок и снижении температуры наружного воздуха

мощности наружного блока. Поэтому при нагрузке до 40 % работает один инверторный компрессор. Когда нагрузка увеличивается, например, до 50 % и мощности инверторного компрессора не хватает, включается компрессор постоянной производительности и частично инверторный (30 + 20 %). При необходимости работы наружного блока на производительность 100 % включаются на полную мощность три компрессора (40 + 30 + 30 %).

Энергетические характеристики комбинированного способа регулирования производительности компрессоров зависят, естественно, от типа управления каждого компрессора. Общая функциональная зависимость является усредняющей для значений холодильного коэффициента каждого способа управления компрессорами наружного блока.

**Фактические величины холодильного коэффициента VRF-систем кондиционирования**

Все рассуждения, приведенные выше, – теоретические, а основное и единственное мерило теории – практика. На энергопотребление реального наружного блока VRF-системы влияет очень много факторов: нагрузка наружного блока, температура окружающего воздуха, конструкция и схема управления компрессорным блоком, относительная площадь поверхности конденсатора, используемый хладагент, алгоритм управления холодопроизводительностью и т. д. Порой одинаковые по схеме управления системы в одинаковых условиях показывают совершенно различные энергетические характеристики. Но тем не менее основные закономерности и теоретические характеристики функционирования компрессорного узла вполне очевидно прослеживаются

на реальном оборудовании. На рис. 7 приведены графики для холодильного коэффициента наружных блоков VRF-систем различных производителей, реализующих выше рассмотренные способы регулирования. (Все технические характеристики взяты из каталогов заводов-изготовителей.)

Резюмируя, можно отметить, что на сегодняшний день однозначный лидер по энергоэффективности – инверторная технология регулирования производительности компрессоров. Наверное, именно поэтому большинство производителей, применявших раньше другие способы регулирования компрессоров, приходят в новом оборудовании к компрессорам с переменной скоростью вращения. Следующий по энергоэффективности способ – ON-OFF регулирование. Применяется большинством производителей в комбинации с инвертором или как самостоятельный метод. Затем идет импульсное регулирование и на последнем месте байпасирование.

Необходимо еще раз отметить, что в данной статье рассматривались методы регулирования компрессоров именно с точки зрения энергоэффективности. Надежность, уровень электромагнитных помех, шум, цена и т. д. не рассматривались – это темы для отдельного исследования.

**Литература**

1. Нимич Г. В., Михайлов В. А., Бондарь Е. С. Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха. – Киев: ТОВ «Видавничий будинок», 2003.
2. INVERTER DRIVEN MULTI-INDOOR UNIT CLIMATE CONTROL SYSTEM. MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES. 04 KXT-092.
3. FUJITSU GENERAL LIMITED. Multi Air Conditioning System for Buildings. Technical data. 2005.

E-mail: bruh@jac.ru