

# Инверторная технология – технология будущего для холодильной техники

**Bonfanti Mauro** (Dorin SpA, Италия),  
**С.М. КАМЗОЛОВ** (Dorin SpA, Россия)

В последние годы как в Европе, так и в России продолжается рост дефицита энергоресурсов и увеличение стоимости энергоносителей на промышленных предприятиях, транспорте, в ЖКХ и т.д. Перед специалистами холодильного машиностроения стоит первоочередная задача – снижение энергопотребления холодильных систем, повышение энергоэффективности холодильного оборудования.

Повышение энергоэффективности холодильных систем достигается широко известными мерами: уменьшением тепловой нагрузки на охлаждаемый объект, использованием энергоэффективных схем холодоснабжения и хладагентов, конструктивными особенностями компонентов, соблюдением условий эксплуатации, применением удаленного мониторинга.

Оптимальное энергопотребление холодильной системы обеспечивается соблюдением уравнения теплового баланса системы «холодильная машина – охлаждаемый объект» (равенством холодопроизводительности компрессора и нагрузки на испаритель). Однако выполнение этого условия довольно проблематично, поскольку при проектировании холодильной установки заведомо закладывается превышение холодопроизводительности. Так, тепловая нагрузка на охлаждаемое помещение рассчитывается для наиболее жаркого месяца года, т.е. без учета сезонности и времени суток; не учитываются нестационарные технологические режимы холодильной обработки пищевых продуктов и т.д. Решение данной эксплуатационной задачи осуществляется путем регулирования производительности компрессора.

Как показали исследования, наибольшая доля энергозатрат в холодильных системах приходится на эксплуатацию компрессора, а именно на регулирование его производительности. Сегодня в холодильной технике хорошо известен ряд методов регулирования производительности с помощью внешних и встроенных конструктивных устройств. Каждый из методов имеет в той или иной степени энергетические потери, приводящие к снижению эффективности.

Проведем сравнение хорошо известных методов регулирования производительности – ступенчато-

го – включением/отключением одного из компрессоров в мультикомпрессорном агрегате (метод ST) и инверторного – изменением частоты вращения вала компрессора (метод INV).

Эксплуатационные испытания агрегатов на базе компрессоров DORIN серии H в составе холодильного оборудования Costan (Италия) показали, что реальное энергосбережение при методе регулирования INV составляет 15 %; уменьшение числа пусков – 87 % (табл. 1).

Таблица 1

Система холодно-снабжения	Метод регулирования производительности	Потребление электроэнергии, кВт·ч	Число пусков компрессора
Среднетемпературная	ST	1647	176
Среднетемпературная	INV	1404	21

При эксплуатационных испытаниях были получены диаграммы колебания давления всасывания (зеленая линия – без инвертора, фиолетовая – с инвертором) и изменения потребляемой мощности (красная линия – с инвертором, синяя – без инвертора) (рис. 1).

Таким образом, применение инверторной технологии в многокомпрессорных холодильных установках приводит к следующим преимуществам:

- ✓ уменьшение энергопотребления (10–40 %) (реальное энергосбережение 15 %);

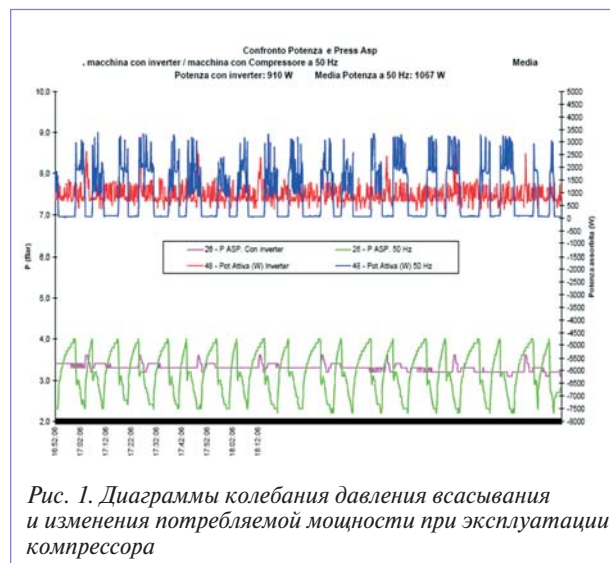


Рис. 1. Диаграммы колебания давления всасывания и изменения потребляемой мощности при эксплуатации компрессора

- ✓ увеличение срока службы компрессора;
- ✓ значительное уменьшение пусков компрессора (на 87 %);
- ✓ повышение надежности компрессора;
- ✓ плавное регулирование мощности компрессора;
- ✓ постоянство давления всасывания;
- ✓ значительное уменьшение времени работы системы при низком давлении всасывания, что дает возможность спроектировать испаритель с более низким значением  $\Delta T$  между температурами охлаждаемого помещения и кипения хладагента;
- ✓ качественное хранение пищевых продуктов (постоянная температура хранения);
- ✓ низкое значение усушки пищевых продуктов;
- ✓ уменьшение шума (особенно в ночное время) благодаря снижению частоты вращения при работе с неполной нагрузкой;
- ✓ снижение толщины ледяной «шубы» на испарителе.

Специалистами Dorin SpA был проведен технико-экономический анализ четырехкомпрессорного агрегата (на R404A) холодопроизводительностью  $Q_o = 200$  кВт ( $t_o/t_k = -10^\circ\text{C}/+45^\circ\text{C}$ ).

Для ступенчатого регулирования был подобран агрегат из четырех стандартных компрессоров DORIN H3400CC (холодопроизводительность компрессора при 50 Гц  $Q_o = 51,12$  кВт, потребляемая мощность  $N = 23,78$  кВт).

#### Технические характеристики агрегата

Максимальная холодопроизводительность, кВт	204,48
Минимальная холодопроизводительность, кВт	51,12
Капитальные затраты, евро (стоимость компрессоров принимается в абсолютных величинах)	14004
Текущие затраты, евро/год	55550

Для инверторного регулирования был выбран агрегат из одного инверторного и трех стандартных компрессоров (INV+A+B+C).

Для обеспечения плавного и непрерывного регулирования (поддержания оптимального значения давления всасывания) рекомендуется принимать  $Q_o$  стандартного компрессора равной 80 % от  $Q_{o\text{ inv}}$  компрессора с инверторным регулированием производительности при 50 Гц.

$$Q_{oA} = Q_{oB} = Q_{oC} = 0,8 Q_{o\text{ inv}}$$

На основании предварительных расчетов был подобран компрессор с инвертором H3400CC (регулирование производительности путем изменения частоты в диапазоне 30...70 Гц, изменение  $Q_{o\text{ inv}}$  от 60 до 140 %);  $Q_{o\text{ inv}} = 51,12$  кВт,  $N = 23,78$  кВт при 50 Гц;  $Q_{o\text{ inv}} = 71,57$  кВт,  $N = 33,29$  кВт при 70 Гц, а также стандартные компрессоры А, В и С модели H3000CC [холодопроизводительность при 50 Гц (100 %),  $Q_o = 42,03$  кВт,  $N = 19,03$  кВт].

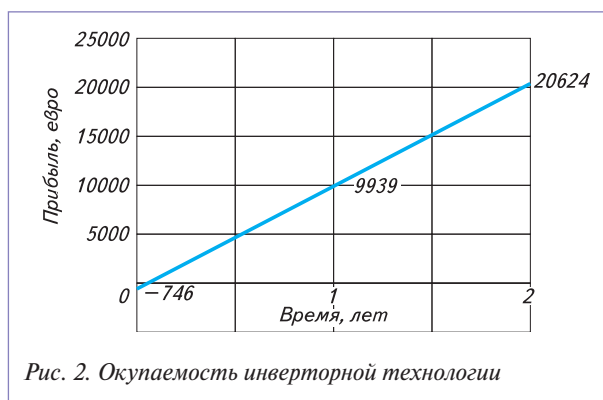


Рис. 2. Окупаемость инверторной технологии

#### Технические характеристики агрегата

Максимальная холодопроизводительность, кВт	197,66
Минимальная холодопроизводительность, кВт	14,27
Капитальные затраты, евро (стоимость компрессоров и инвертора принимается в абсолютных величинах)	14750
Текущие затраты, евро/год	44865

Анализ показал, что единовременное инвестирование в инверторную технологию (746 евро) окупается через 1 месяц (рис. 2).

Поскольку применение инверторной технологии дает существенные преимущества, компания DORIN SpA спроектировала специальную серию компрессоров HI. Благодаря особой конструкции движущихся частей компрессора и применению электродвигателя специального исполнения (230В/3ф/50Гц) компрессоры серии HI могут работать в диапазоне частот сети питания от 20 (холодопроизводительность 40 %) до 90 Гц (холодопроизводительность 180 %). Dorin SpA предлагает 9 моделей компрессоров серии HI: 3 – двухцилиндровые модели и 6 – четырехцилиндровые модели.

#### Особенности конструкции компрессоров серии HI

- ✓ Запорный всасывающий клапан на фланце корпуса компрессора со стороны электродвигателя, обеспечивающий хорошее охлаждение электродвигателя при малых частотах вращения коленвала.
- ✓ Электродвигатель специального исполнения (класс нагрева и стойкость изоляции «F»).
- ✓ Увеличенная камера нагнетания, снижающая пульсации давления при высоких частотах вращения коленвала.
- ✓ Наличие масляного кармана, гарантирующего хорошую смазку системы при малых частотах вращения коленвала.
- ✓ Специальный кинематический аккумулятор/маховик для стабильной работы коленвала при пониженных частотах питающего тока (20 Гц) (за счет инерции маховика). Возможность эксплуатации – не ниже 10 Гц.

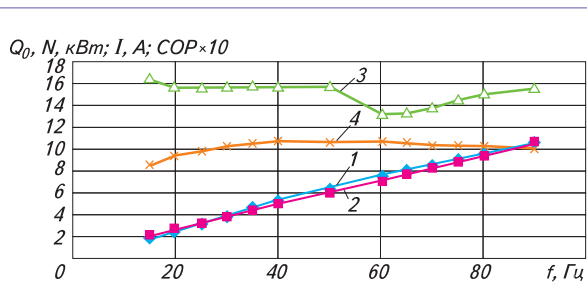


Рис. 3. Изменение параметров компрессора в зависимости от частоты электрического тока: 1 – холодопроизводительность  $Q_o$ , кВт; 2 – потребляемая мощность  $N$ , кВт; 3 – сила тока  $I$ , А; 4 – холодильный коэффициент ( $COP \times 10$ )

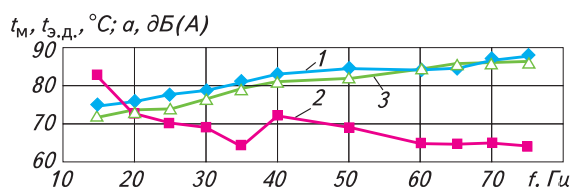


Рис. 4. Изменение температурных и шумовых параметров в зависимости от частоты электрического тока: 1 – температура масла  $t_m$ , °C; 2 – температура электродвигателя  $t_{э,д}$ , °C; 3 – уровень шума  $a$ , дБ (А)

Изменение параметров компрессора HI1500CC с инвертором ( $R404A$ ,  $t_o/t_k = -35/+50$  °C, перегрев 55 K) в зависимости от частоты электрического тока показано на рис. 3 и 4. Отмечено, что COP при частоте электрического тока 40 Гц (холодопроизводительность 80 %) больше на 3 %, чем при частоте электрического тока 50 Гц (холодопроизводительность 100 %).

Компания Dorin SpA разработала 8 моделей компрессоров с конфигурацией «Тандем». Компрессоры серии T-HI представляют собой тандем-компрессоры, состоящие из двух полугерметичных компрессоров: одного серии H и одного серии HI (20...90 Гц).

Специалисты DORIN SpA провели сравнительный технико-экономический анализ компрессоров H и HI ( $R404A$ ,  $Q_o = 50$  кВт при  $t_o/t_k = -15/+45$  °C).

### Ступенчатое регулирование

Многокомпрессорный агрегат из трех компрессоров HI1000CC (производительность 100 % при 50 Гц).

#### Технические характеристики агрегата

Максимальная холодопроизводительность, кВт	49,35
Минимальная холодопроизводительность, кВт	8,22
Потребляемая за год электроэнергия, кВт·ч	143839
Текущие затраты, евро/год	14384
Капитальные затраты, евро	5550

### Инверторное регулирование

Многокомпрессорный агрегат (тандем-компрессор из двух компрессоров – HI1500CC + HI1500CC), модель T-HI 3000CC.

#### Технические характеристики агрегата

Максимальная холодопроизводительность, кВт	20,94 (50 Гц) + + 29,82 (70 Гц) = 50,76
Минимальная холодопроизводительность, кВт	6,2 (20 Гц)
Потребляемая за год энергия (принимаем энергосбережение 15 %), кВт·ч	122268
Текущие затраты, евро/год	12226
Капитальные затраты, евро	5130

Энергосбережение при использовании инверторного компрессора в составе агрегата составляет на сумму 2158 евро в год. Инвестиционные затраты отсутствуют!

\* \* \*

С 2013 г. компания Dorin SpA, предварительно проведя всесторонние испытания, приступает к выпуску компрессоров стандартной серии H с электронно-механическим регулированием (Electronic-Mechanical Control, метод EMC).

Это регулирование производительности компрессора (четырёхцилиндрового – в диапазоне 50–100 %; шестицилиндрового – 33–100 %) путем пульсирующего включения /отключения цилиндров блокировкой всасывающего канала соленоидным клапаном (продолжительность пульсации 20 с). Алгоритм EMC-регулирования производительности четырёхцилиндрового компрессора в диапазоне 50–100 % с помощью пульсирующего включения/выключения одного из соленоидных клапанов таков: 50 % – соленоидный клапан включен; 60 % – 4 с включен и 16 с выключен; 70 % – 8 с включен и 12 с выключен; 80 % – 12 с включен и 8 с выключен; 90 % – 16 с включен и 4 с выключен; 100 % – соленоидный клапан выключен.

При регулировании производительности с интервалом 5 % период включения начинается с 2 с и каждый шаг регулирования увеличивается на 2 с.

В лаборатории Dorin SpA были проведены испытания с целью сравнения инверторного и электронно-механического регулирования для агрегатов с  $Q_o$  до 30, 55 и 80 кВт в режиме  $t_o/t_k = -35/+50$  °C, R404A. Установлено, что холодильный коэффициент (COP) агрегата с инверторным регулированием (линия 1 на рис. 5 и 6) выше на 10–15 % по сравнению с COP агрегата с электронно-механическим регулированием (линия 2 на рис. 5 и 6); капитальные затраты на инверторную технологию меньше, чем на EMC-технологию, благодаря применению компрессора меньшей объемной производительности, но повышенной холодопроизводительности.

Специалистами Dorin SpA был проведен технико-экономический анализ эксплуатации

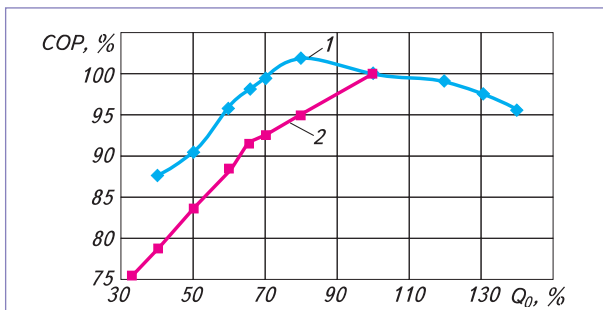


Рис. 5. Процентное изменение COP при регулировании производительности многокомпрессорных агрегатов холодопроизводительностью до 30 кВт: 1 – инверторное регулирование; 2 – EMC-регулирование

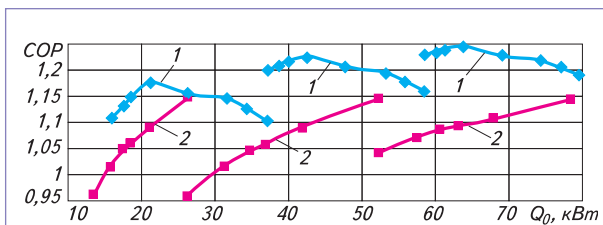


Рис. 6. Изменение COP при регулировании производительности многокомпрессорных агрегатов холодопроизводительностью до 30, 55 и 80 кВт: 1 – инверторное регулирование; 2 – EMC-регулирование

многокомпрессорного агрегата ( $Q_o = 60$  кВт,  $t_o/t_k = -35$  °C/+45 °C, R404A).

Для инверторного регулирования (INV) выбран агрегат из четырех компрессоров (одного с инвертором и трех стандартных А, В, С).

Для инверторного компрессора  $Q_{o,inv} = 52,63$  кВт при 50 Гц. Для плавного и непрерывного регулирования (поддержание оптимального значения давления всасывания) рекомендуется принимать  $Q_o$  стандартного компрессора равной 80 % от  $Q_{o,inv}$ :  $Q_{o,A} = Q_{o,B} = Q_{o,C} = 0,8 Q_{o,inv}$ .

На основании предварительных расчетов были подобраны следующие компрессоры.

Инверторный компрессор H4000CC с регулированием производительности изменением частоты в диапазоне 30–70 Гц (изменение  $Q_o$  от 60 до 140 %:  $Q_o = 16,69$  кВт,  $N = 13,4$  кВт при 50 Гц;  $Q_o = 23,36$  кВт,  $N = 18,76$  кВт при 70 Гц). Стандартные компрессоры А; В;С – H2700CS, производительность при 50 Гц (100 %)  $Q_o = 12,75$  кВт, потребляемая мощность  $N = 10,16$  кВт).

*Технические характеристики агрегата*

Максимальная холодопроизводительность, кВт	61,6
Минимальная холодопроизводительность, кВт	10,01
Капитальные затраты, евро (стоимость компрессоров и инвертора принимается в абсолютных величинах)	15865
Текущие затраты, евро/год	24055

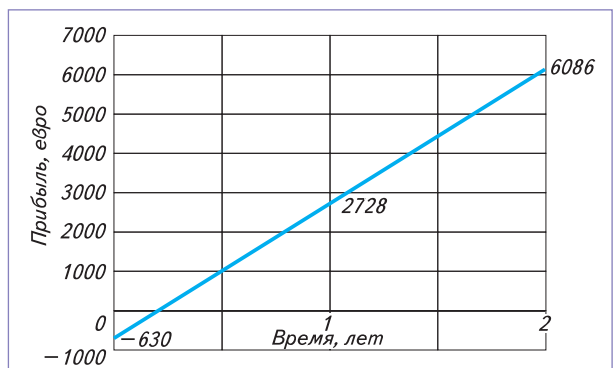


Рис. 7. Окупаемость инверторной технологии

Для электронно-механического регулирования (EMC) выбран агрегат из четырех компрессоров: одного с EMC-регулированием и трех стандартных А, В и С.

Для плавного и непрерывного регулирования (поддержание оптимального значения давления всасывания) рекомендуется принимать  $Q_o$  стандартного компрессора равной 50 % (для четырехцилиндрового), 66 % (для шестицилиндрового) от холодопроизводительности компрессора с EMC-регулированием  $Q_{o,emc}$ .

На основании предварительных расчетов были подобраны: компрессор с EMC-регулированием H4500CS ( $Q_{o,emc} = 21,41$  кВт,  $N = 16,46$  кВт при 50 Гц) и 3 стандартных компрессора H2700CS ( $Q_o = 12,75$  кВт,  $N = 10,16$  кВт при 50 Гц).

*Технические характеристики агрегата*

Максимальная холодопроизводительность, кВт	59,66
Минимальная холодопроизводительность, кВт	7,06
Капитальные затраты, евро (стоимость компрессоров и приборов EMC-регулирования принимается в абсолютных величинах)	15235
Текущие затраты, евро/год	27413

Анализ (рис. 7) показал, что единовременное вложение в инверторную технологию (630 евро) окупается за период до полугода, далее потребитель получает чистую прибыль.

Качество компрессоров DORIN SpA с инверторной технологией оценено такими потребителями мирового холодильного рынка, как «НОРД», «ЛЭНД», «Евростиль» (Россия), Parker Power Pack, Frigo Plus, Erba Kaelte (Германия), Costan, Arneg, Clint, Zanotti (Италия), FREOR (Литва) и т.д.

Таким образом, очевидно, что из всех трех рассмотренных методов регулирования производительности (ST, EMC и INV) явное преимущество как по энергоэффективности (COP), так и по экономическим показателям (стоимость агрегата и эксплуатационные затраты) имеет инверторная технология.