

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ХОЛОДИЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Большинство судовых компрессионных холодильных установок (СХУ) малой и средней холодопроизводительности оснащены конденсаторами с водяным охлаждением. Отличительные особенности таких СХУ следующие:

а) компрессор и теплообменные аппараты спроектированы так, что в состоянии обеспечить требуемые температуры в холодильных камерах при максимальной (расчетной) тепловой нагрузке, несмотря на то, что такая нагрузка обычно не превышает одной тысячи часов за год. Соответственно, все остальное рабочее время от СХУ требуется меньшая холодопроизводительность;

б) функционирование СХУ проходит при изменяющейся в широких пределах температуре конденсации, что связано с различными районами плавания и временем года;

в) с целью снижения СХУ энергопотребления в условиях переменных тепловых нагрузок, желательно выдерживать определенное для каждой конкретной установки соотношение между давлением (температурой) конденсации и нагнетания. Традиционно, регулирование температуры конденсации основано на релейном принципе управления насосом водяного охлаждения конденсатора (включено-выключено) и определяется фиксированной задающей уставкой;

г) температура конденсации  $t_K$  хладагента существенно влияет на расход электроэнергии на выработку холода. Так, увеличение температуры конденсации на 1 °С приводит к возрастанию потребляемой компрессором СХУ мощности на 4 – 5 % [1, 2].

Понятно, что при любых условиях эксплуатации СХУ, весьма важно управлять температурой конденсации хладагента. Например, для конденсаторов холодильных установок с воздушным охлаждением замена естественной конвекции воздуха на вынужденную, реализуемую путем обдува активной поверхности теплообмена, позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха до 7 раз по сравнению с режимами естественной конвекции [3, 4]. Именно поэтому производители холодильных установок различного назначения обычно применяют принудительное, различного типа, охлаждение конденсаторов.

Современные СХУ начинают оснащаться системами автоматического управления (САУ) компрессоров, осуществляющих плавное регулирование их холодопроизводительности. Применение таких САУ не только снижает расход электроэнергии на выработку холода, существенно повышая комплексные технико-экономических показатели, но и позволяет получение от СХУ ряда новых потребительских свойств [6, 7], а также обеспечивает реализацию дополнительных, ранее не применявшихся энергоэффективных способов управления СХУ. Для названных САУ СХУ остаются открытыми вопросы повышения качества динамических процессов, снижения энергопотребления, расширения диапазона регулирования холодопроизводительности и многие другие. Таким образом, актуальность решения задач снижения энергопотребления таких массовых потребителей электроэнергии, как СХУ, безусловна и не до конца решена.

В статье предлагается новый, двуканальный, принцип построения САУ компрессионных СХУ малой и средней холодопроизводительности, обеспечивающий *минимизацию* расхода электроэнергии на выработку холода при изменяющихся в широких пределах управляющих сигналов и тепловых нагрузках.

Решение задачи двуканального управления невозможно без создания САУ производительностью насоса, причем мощность насоса водяного охлаждения конденсатора при работе в составе СХУ может быть соизмерима с мощностью тепловых притоков (при частичных тепловых нагрузках) и поэтому должна обязательно учитываться в суммарном расходе электроэнергии СХУ [5]. Принцип работы предлагаемой САУ (рис. 1) основан на одновременном, *двуканальном*, плавном управлении производительностью: первого канала – компрессора и второго канала – системы принудительного водяного охлаждения конденсатора.

Для предварительного анализа работоспособности САУ СХУ, представленной на рис. 1, принят наиболее простой алгоритм управления – взаимодействие двух каналов обеспечивается с помощью экстремального регулятора ЭР.

Регулятор формирует задающую уставку  $t_{к.зад}$  каналу управления насосом охлаждающей воды конденсатора, исходя из обеспечения условия минимума целевой функции – потребляемого из электрической сети одновременно двумя САУ (производительности компрессора и насоса водяного охлаждения) суммарного тока:  $I_K + I_B \rightarrow \min$ .

Структурная схема модели двуканальной системы управления СХУ, с рядом упрощений, приведена на рис. 2.

Считаем, что локальные САУ, содержащие регуляторы температур кипения и конденсации, а также САУ компрессора и насоса настроен-

ны на "симметричный" оптимум (ПИ-регуляторы, обеспечивающие астатические режимы и входные фильтры перед задающими входами – для снижения перерегулирования).

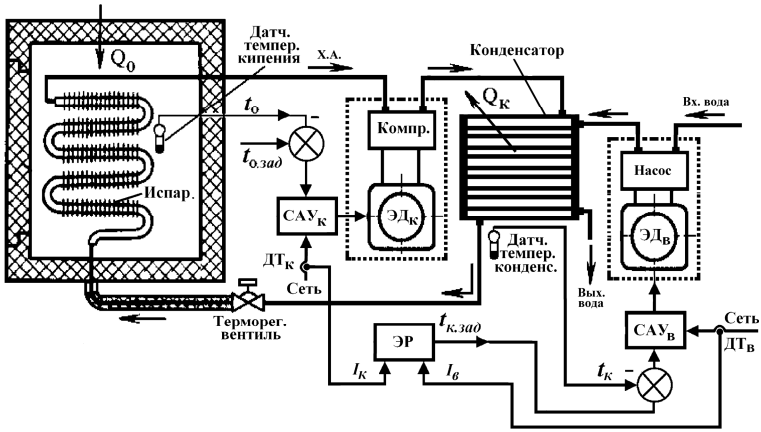


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема двуканальной САУ СХУ: САУ<sub>к</sub>, САУ<sub>в</sub> – системы управления электродвигателями компрессора (ЭД<sub>к</sub>) и насоса системы подачи охлаждающей воды (ЭД<sub>в</sub>) в конденсатор с соответствующими датчиками тока (ДТ<sub>к</sub> и ДТ<sub>в</sub>);  $t_0$ ,  $t_k$ ,  $t_{0,зад}$ ,  $t_{k,зад}$  – соответственно, температуры кипения и конденсации, а также их заданные значения;  $Q_0$  и  $Q_k$  – производительности испарителя и конденсатора;  $I_k$ ,  $I_v$  – токи, потребляемые компрессором и водяным насосом из электрической сети

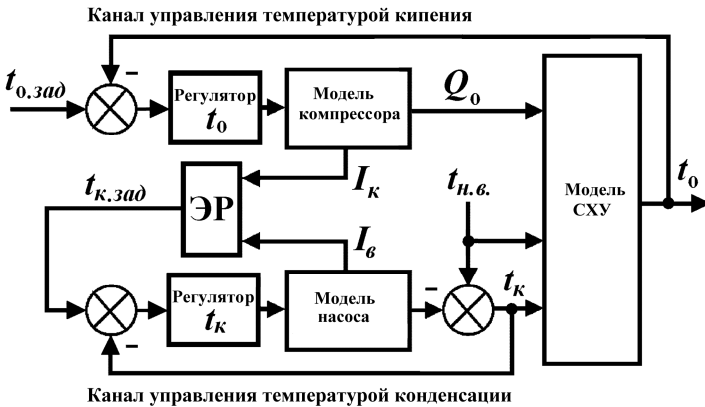


Рис. 2. Упрощенная структурная схема модели двуканальной САУ СХУ

Таким образом, математическая модель (ММ) двуканальной системы управления, созданная согласно рис. 2, кроме модели ЭР содержит субблоки моделей СХУ и локальных САУ производительностью компрессора и насоса [5 – 7].

В качестве примера функционирования двуканальной системы управления, рассмотрена ее работа с параметрами гипотетической СХУ, выраженными в относительных единицах для номинальной холодопроизводительности 90 кВт.

Для оценки режимов энергопотребления в зависимости от изменения температуры охлаждающей воды (+2 ... +40 °С), в ММ САУ характеристики относительной холодопроизводительности компрессора  $Q_0/Q_{0НОМ}$  в функции температур конденсации и кипения (-30 ... +10 °С) аппроксимированы сплайн-функциями. Связь, описывающая снижение температуры конденсации относительно температуры и расхода охлаждающей воды и производительностью  $Q$  насоса принята практически линейной, а тепловая нагрузка на СХУ составляет примерно 75 % от номинальной. Для упрощения анализа и ускорения расчетов в модели двуканальной САУ использованы "гладкие" модели локальных САУ и поэтому не учтены потери в силовых полупроводниковых элементах преобразователей.

На рис. 3 приведены результаты моделирования при поисковом процессе – нахождении системой управления СХУ экстремальной точки, соответствующей практически минимальному для данных условий работы суммарному расходу электроэнергии. Поисковый процесс начинается после выхода СХУ в заданный, установившийся, температурный режим при максимально возможной производительности насоса водяного охлаждения конденсатора и неизменной температуре охлаждающей воды.

Потребляемая мощность насоса при этом максимальна, а мощность компрессора – минимальна. Далее, через определенные промежутки времени, ЭР изменяет задание на скорость (производительность) насоса канала управления температурой конденсации, что вызывает соответствующее изменение скорости (производительности) компрессора. При этом устанавливаются новые статические режимы энергопотребления при прежней, заданной температуре кипения. Поисковый алгоритм ЭР, путем пробных воздействий (метод дихотомии), сравнивает текущее значение энергопотребления с предыдущим.

На этой основе ЭР принимается решение о дальнейшем увеличении или снижении производительности насоса. После ряда итераций САУ находится энергетически наилучший режим, при котором суммарная мощность насоса и компрессора минимальна.

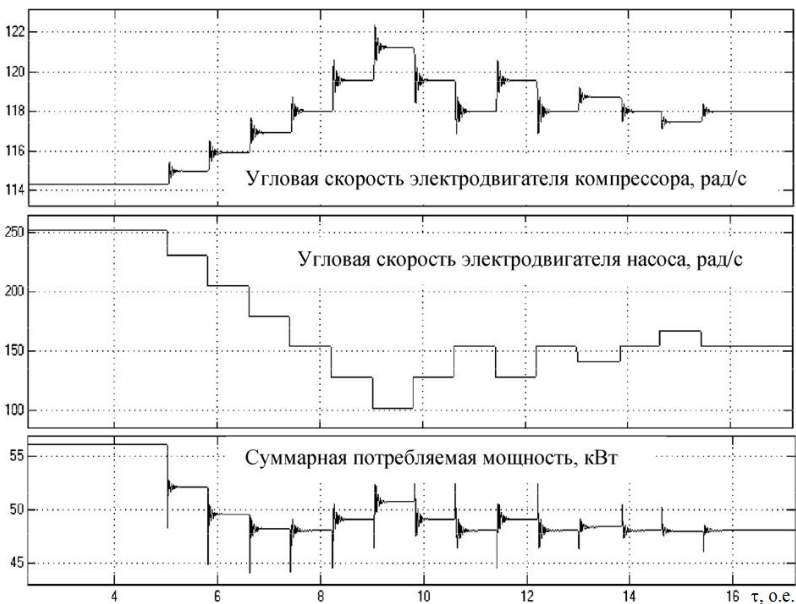


Рис. 3. Процесс нахождения энергетически оптимального режима работы СХУ

С помощью разработанной ММ СХУ исследованы локальные системы управления температурой конденсации хладагента и производительности компрессора. Установлено, что при пробных воздействиях от ЭР, изменения температуры имитаторов продуктов, загруженных в холодильную камеру, не превышали  $\pm 0,5$  °С относительно заданной (+5 °С).

Несмотря на то, что реальное энергопотребление управляемой СХУ следует увеличить относительно расчетных значений, полученных из гладкой ММ, эффективность функционирования предложенной двуканальной системы управления очевидна, а на современном уровне развития управляющего и силового оборудования техническая реализация представленной САУ не вызовет затруднений.

Таким образом, предложен принцип построения, структурная схема и математическая модель экстремальной, по критерию обеспечения минимума энергопотребления, САУ СХУ с конденсатором водяного охлаждения, использующая двуканальный принцип одновременного управления – температурой кипения хладагента и температурой его конденсации.

Моделирование, проведенное на примере предложенной двукан-

нальной системы управления СХУ с локальными САУ производительности компрессора и насоса охлаждающей воды конденсатора подтверждает принципиальную работоспособность системы. Из дополнительного анализа работы двуканальной САУ следует, что при определенных тепловых нагрузках возможно снижение энергопотребления СХУ более чем на 25 %.

Таким образом, несмотря на существенное техническое усложнение, двуканальные САУ могут обеспечивать заметное снижение энергопотребления СХУ в широком диапазоне изменений тепловых нагрузок и температур охлаждающей воды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов / Т.В. Морозюк – Одесса: Негоциант, 2006. – 712 с.
2. Желіба Ю.О. Енергозбереження при виробництві та споживанні холоду (Ч.1 и Ч.2). / Ю.О. Желіба // Холод МТ. – 2004. – №2. – С. 39-43; – №3. – С. 44 – 46.
3. Dossat R.J. Principles of Refrigeration / R.J. Dossat, T.J. Horan. – NY: Prentice Hall Press, 2002. – P. 454.
4. Мааке В. Учебник по холодильной технике / В. Мааке, Г.-Ю. Эккерт, Ж.-Л. Кошпен; пер. с франц. под ред. В.Б. Сапожникова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 1142 с.
5. Онищенко О.А. Электропривод систем температуры конденсации холодильных установок / О.А. Онищенко // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 2006. – №66. – С. 190 – 192.
6. Онищенко О.А. Оценка энергетических затрат на выработку холода бытовым холодильным прибором / О.А. Онищенко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2007. – № 3 (44), ч. 1. – С. 106 – 110.
7. Онищенко О.А. Модель холодильной установки с автоматизированным электроприводом компрессора / О.А. Онищенко // Холодильная техника и технология (прил. к журналу). – 2005. – №5 (97). – С. 120 – 129.