

УДК 621.574.9; 681.5.08

**Е. Л. СНИХОВСКИЙ**, аспирант НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**А. С. КЛЕПАНДА**, канд. техн. наук; зам. директора ООО «Инсолар-Климат», Харьков;  
**И. И. ПЕТУХОВ**, канд. техн. наук, доц.; доц. НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**А. В. ШЕРСТЮК**, аспирант НТУ «ХПИ»

## **К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

Описано состояние проблемы на современном этапе развития диагностики холодильного оборудования. Дано обоснование актуальности применения микроконтроллера в качестве управляющего звена при диагностике холодильного оборудования. Сформирован набор измерительных средств для проведения диагностики. Представлен алгоритм диагностирования пароконденсационной холодильной машины (ПКХМ) на базе терморегулирующего вентиля (ТРВ) с внешним уравниванием. Составлена таблица поведения рабочих параметров ПКХМ при проявлении неисправностей. Сформирована программа диагностирования в расчетной среде *MatLAB Simulink* для программирования микроконтроллера.

**Ключевые слова:** холодильная машина, диагностика, идентификация процессов, автоматизация.

### **Введение**

При правильном подборе оборудования холодильной установки определяющее влияние на энергетическую эффективность, а в ряде случаев и на саму возможность её функционирования оказывает техническое состояние элементов пароконденсационной холодильной машины (ПКХМ). К числу важнейших контролируемых параметров ПКХМ относятся холодопроизводительность и энергопотребление, определяющие холодильный коэффициент. Их изменение вследствие различного рода неисправностей, нарушения настроек и условий эксплуатации оборудования, вследствие изменения свойств и заправки рабочих сред является основным предметом исследования при диагностике технического состояния холодильной установки.

Для диагностики неисправностей всегда решается задача их проявления относительно исправного состояния. В работе [1] для этого использовалась математическая модель, а неисправности моделировались экспериментально. Рассмотрены утечки через клапаны компрессора, ухудшение условий работы конденсатора и испарителя, засорение жидкостной магистрали после конденсатора, недостаточная и избыточная заправки хладагента. Также рассматривалось влияние комбинации из двух вышеперечисленных неисправностей на рабочие параметры системы, однако математическая модель не смогла идентифицировать такие комбинации как недостаточная заправка хладагента и перетечки через клапаны компрессора или засоры на жидкостной магистрали.

Авторами работы [2] рассмотрены следующие неисправности ПКХМ с капиллярной трубкой в качестве дросселирующего устройства: забитая капиллярная трубка, износ деталей компрессора, низкая эффективность двигателя компрессора, загрязненный конденсатор, пониженный расход воздуха через конденсатор, утечки через уплотнения, установленные в холодильной машины (ХМ), утечки через уплотнения в охлаждаемом объеме. Также рассмотрены такие комбинации неисправностей как пониженные расходы воздуха через испаритель и конденсатор, недостаточная

---

© Е.Л. Сниховский, А.С. Клепанда, И.И. Петухов, А.В. Шерстюк, 2014

заправка хладагента и низкий расход воздуха через испаритель или конденсатор.

В работах [3, 4] указывается, что при использовании методики диагностировании ПКХМ на основе сравнения рабочих параметров с параметрами, полученными на основе математической модели, при износе оборудования требуется вводить дополнительные поправочные коэффициенты, учитывающие изменения рабочих параметров.

В работе [5] рассмотрены чиллеры с винтовыми компрессорами. В качестве неисправностей рассматривались недостаточная и избыточная заправки хладагента, недостаточная и избыточная заправки компрессорного масла, загрязнение поверхности теплообмена и недостаточный расход воздуха через конденсатор. Анализ влияния совокупности нескольких неисправностей не проводился.

Помимо этого в данной области существуют системы диагностики механических дефектов. Основным объектом является компрессор. Так фирма *SPM Instrument* (Россия) разработала для этих целей тестер Т30 и программное обеспечение *Condmaster*. Российская фирма *Dynamics* разработала систему компьютерного мониторинга «Компакс» для предупреждения аварий и контроля состояния компрессоров. Данная система диагностирует такие неисправности как: гидроудар, кавитация, прохват, помпаж в компрессоре, дефекты клапанов компрессора, состояние кривошипно-шатунной группы, зазоры в деталях цилиндропоршневой группы. Фирма *Prognost* разработала программный пакет *Prognost-SILver*, который на основе измерений термических и механических параметров диагностирует неисправности подвижных элементов системы: механические дефекты, дефекты уплотнений и засоры клапанов компрессора.

#### **Цель и постановка задачи исследования**

Анализ опубликованных материалов свидетельствует об актуальности задачи диагностики технического состояния холодильных машин и многообразии подходов к этой проблеме. Достаточно универсальным является подход, когда система диагностирования включает ЭВМ и пользователя (эксперта) как конечное звено управления [6]. В этом случае управленческое решение может быть принято всегда, в том числе в условиях значительной неопределенности. В более простых ситуациях функцию управления может выполнить микроконтроллер, а роль пользователя может быть сведена к наблюдению за процессом. Поэтому важным является вопрос структурирования и формализации процедуры диагностики с учетом современного состояния измерительной техники и алгоритмов обработки данных. Для его решения в статье обобщены результаты предыдущих работ в этом направлении, определены диагностические ситуации, требующие дальнейшего изучения.

#### **Материалы и результаты исследования**

В современных системах управления и диагностирования в качестве объекта может выступать любая система, в частности ПКХМ. В работе [6] система диагностирования предполагает наличие ЭВМ и пользователя как конечного звена принятия решения. В случае реализации одиночных неисправностей вместо ЭВМ может использоваться микроконтроллер, и работа пользователя может быть автоматизирована. Вмешательства пользователя потребуют только проявления комплексных неисправностей.

Реализовать указанную автоматизированную систему можно только при наличии определенных датчиков. Их число и стоимость должны быть минимальны, а эксплуатация простой. Как правило, это датчики давления и температуры. Для диагностирования ПКХМ на входе хладагента в испаритель устанавливается датчик

давления, а в потоке воздуха – дифференциальная термопара. На выходе из испарителя и после конденсатора измеряется температура перегретых паров и переохлажденного жидкого хладагента соответственно. Также устанавливается датчик давления конденсации и дифференциальная термопара в поток воздуха через конденсатор.

Рассмотрим алгоритм диагностирования ПКХМ, состоящей из пяти основных элементов (испаритель, конденсатор, компрессор, терморегулирующий вентиль (ТРВ) с внешним уравниванием, ресивер) и жидкостной магистрали между конденсатором и ТРВ [7]. Для случая одиночной неисправности возможно её определение с точностью до элемента системы. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке.

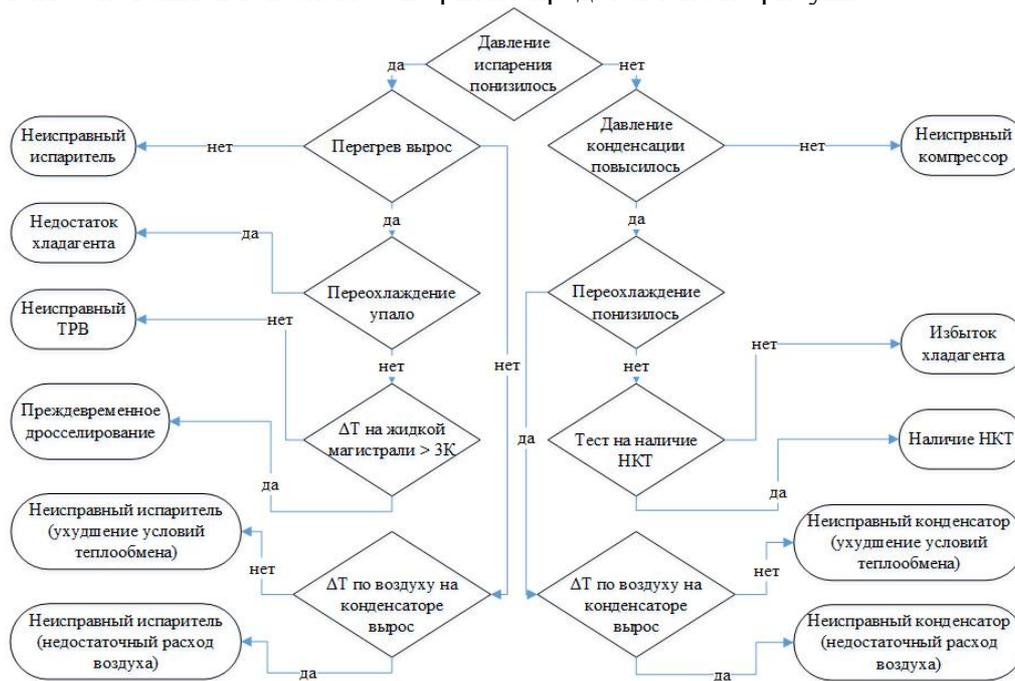


Рис. – базовый алгоритм диагностирования парокомпрессионной холодильной машины

Используя данный алгоритм можно легко запрограммировать микроконтроллер, например в среде программирования C<sup>++</sup>. Основная сложность заключается в обработке сигналов измерительных устройств системы диагностирования, т.к. отсутствует единая система сигналов для датчиков различных фирм, ввиду чего может потребоваться дополнительная калибровка и разработка алгоритма согласования с системой диагностирования каждого датчика.

Приведенный алгоритм является самым простым в использовании, однако он работает в условиях наличия только одной из перечисленных неисправностей. При реализации одновременно двух и более неисправностей требуется более сложный алгоритм, и неисправности могут быть идентифицированы с некоторой долей неопределенности. Это иллюстрирует таблица, сформированная на основе анализа литературных данных [1–3, 7].

Первые два столбца таблицы описывают типичные неисправности ПКХМ, следующие столбцы показывают поведение основных параметров ПКХМ. Для определения конкретной неисправности, если она является единственной, не обязательно проводить полный набор измерений. Обычно хватает анализа поведения трех-четырех параметров. В каждом ряду таблицы, соответствующему конкретной неисправности, серым фоном выделены параметры, которые являются достаточными для идентификации соответствующей неисправности.

Уровень параметров ПКХМ относительно нормы при различных неисправностях

Вид неисправности		Давление испарения	Перегрев	$\Delta T$ воздуха на испарителе	Переохлаждение	$\Delta T$ на жидкой магистрали больше 3 К	Давление конденсации	Тест на НКТ ( $T_s - T(P_s)) < 2$ К	$\Delta T$ воздуха на конденсаторе	Ток, потребляемый компрессором
Неисправный испаритель	Ухудшение условий теплообмена	падает	падает	падает	растет	падает	падает	падает	падает	падает
	Недостаточный расход воздуха	падает	падает	растет	растет	падает	падает	падает	падает	падает
Недостаток хладагента		падает	растет	падает	падает	растет	падает	падает	падает	падает
Неисправный ТРВ		падает	растет	падает	растет	падает	падает	падает	падает	падает
Преждевременное вскипание		падает	растет	падает	растет	растет	падает	падает	падает	падает
Неисправный компрессор		растет	растет	падает	растет	падает	падает	падает	падает	падает
Наличие неконденсирующихся примесей		растет	падает	падает	растет	растет	растет	растет	падает	растет
Избыток хладагента в контуре		растет	падает	падает	растет	падает	растет	падает	падает	растет
Неисправный Конденсатор	Ухудшение условий теплообмена	растет	падает	падает	падает	растет	растет	падает	падает	растет
	Недостаточный расход воздуха	растет	падает	падает	падает	растет	растет	падает	растет	растет

Параметры, без выделения являются вспомогательными. С их помощью можно определить вероятность комбинации неисправностей при реализации в установке нескольких из них. В данном случае получим наложение эффектов от каждой неисправности на конкретный параметр, которое может, как усилить изменение параметров, так и взаимокompенсировать влияние, что нивелирует изменение параметров. Авторами предыдущих работ [1, 2, 5, 8] приведены количественные данные, которые описывают не все неисправности, приведенные в таблице.

Для остальных комплексных неисправностей требуется дополнительный сбор статистики или проведение экспериментов. Среди таких неисправностей, согласно [1], недостаточная или избыточная заправка хладагента в совокупности с неисправным ТРВ, преждевременным вскипанием хладагента на жидкостной магистрали, неисправным компрессором либо наличием неконденсирующихся примесей. Чрезмерная и недостаточная заправки хладагента являются наиболее распространенными неисправностями, поэтому рассмотрение комплексов с наличием этих неисправностей имеет наибольшую практическую и научную ценность.

Согласно [1], идентификация избытка хладагента до переполнения ресивера, если и возможна, то потребует проведения экспериментов с измерением локальных параметров в области ресивера, установления дополнительных зависимостей и доработки математической модели данного элемента.

На основе блок-схемы диагностирования, представленной на рисунке, составлена программа в расчетном пакете *MatLAB Simulink*, допускающем возможность переноса созданных алгоритмов на микроконтроллер типа *Freaduino UNO V1.2*, который имеет 14 аналоговых входов/выходов. Алгоритм программы использует девять входных сигналов, которые переводятся в термодинамические параметры. Диагностика проводится в два этапа. На первом этапе считается, что ПКХМ находится в исправном состоянии. Микроконтроллер считывает термодинамические параметры работающей установки и записывает их в блок памяти на различных режимах работы. На втором этапе, когда база данных исправного состояния готова, микроконтроллер начинает сверять термодинамические параметры ПКХМ, полученные в реальном времени, с параметрами из базы данных. Опорным параметром поиска соответствующих параметров выбрана температура окружающей среды.

Исходя из алгоритма, представленного на рисунке, определяется перепад температур по воздуху на испарителе и конденсаторе, а не значения температур воздуха на входе и выходе. Это позволяет сократить количество сравниваемых параметров на два. В результате имеем семь изменяемых параметров. Каждому из них присвоена своя константа из уникального разряда чисел (1, 10, 100 и т.д.), если параметр вышел за пределы нормы отклонения. Для параметра в пределах нормы константа приравнивается нулю.

Величина уставки, после которой происходит реагирование микроконтроллера на отклонение измеренного параметра от базового, задается индивидуально для каждого параметра. Конечным результатом является суммарная величина всех констант присвоенных каждому параметру. В результате на выходе мы получаем число, состоящее из нулей и единиц, в котором каждый разряд соответствует конкретному параметру, ноль означает, что параметр находится в норме, единица – что параметр вышел за пределы нормы.

Описанный метод формирования данных исправного состояния применим только к оборудованию, для которого диагностическая система используется с момента начала эксплуатации, когда оно находится в исправном состоянии и правильно настроено. Для идентификации неисправностей на уже работающем оборудовании необходима разработка математической модели ПКХМ произвольного состава, как минимум для исправного её состояния.

Сейчас, исходя из номенклатуры измерений и алгоритма диагностирования, можно указать параметры, которые должна описывать такая математическая модель. Это давления кипения и конденсации, перегрев и переохлаждение хладагента, перепады температур по воздуху на теплообменных аппаратах и хладагента на жидкостной магистрали, а также изменение температуры воздуха в охлаждаемом объеме в зависимости от условий работы ПКХМ и уровня заправки хладагента.

### **Выводы**

1) В результате обобщения опубликованных результатов составлена и дополнена таблица поведения рабочих параметров ПКХМ при проявлении определенной одиночной неисправности. Таблица позволяет наглядно представить поведение параметров и является базой для анализа нескольких неисправностей.

2) Определены сочетания из нескольких неисправностей, которые не

рассматривались в предыдущих исследованиях. В их числе: недостаточная или избыточная заправка хладагента в совокупности с неисправным ТРВ, преждевременным вскипанием хладагента на жидкостной магистрали, неисправным компрессором либо наличием неконденсирующихся примесей. Среди других комбинаций неисправностей следует анализировать те, куда входит чрезмерная или недостаточная заправки хладагента, являющиеся самыми распространенными отклонениями от нормы.

3) Обоснован базовый состав измерительных средств для анализа неисправностей.

4) В расчетном пакете *MatLAB Simulink* создана программа, позволяющая переносить алгоритмы диагностирования ПКХМ на микроконтроллер типа *Freaduino UNO V1.2*.

5) Для диагностики комплекса неисправностей предложенный алгоритм не подходит. Требуется применение более сложных методов идентификации, таких как метод Байеса, метод последовательного анализа и другие.

**Список литературы:** 1. *Adam, W.* Fault Detection and Diagnostics for Commercial Coolers and Freezers [Text] / W. Adam, E. James // Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette. – USA. – July 14-17, 2008. – P. 1–10. 2. *Nooman, A. M.* Fault Detection and Diagnosis in Air Conditioners and Refrigerators [Text] / A. M. Nooman, N. R. Miller, C. W. Bullard // Air Conditioning and Refrigeration Center University of Illinois Mechanical & Industrial Engineering Dept. – 1999. – 101 p. 3. *Ефимов, А. В.* Метод построения диагностических моделей оборудования энергоустановок [Текст] / А. В. Ефимов, А. Аль-Тувайни, С. Л. Зевин // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – Вып. 13. – С. 153–157. 4. *Ефимов, А. В.* Идентификация математических моделей технологических процессов в энергетическом оборудовании при решении задач диагностики [Текст] / А. В. Ефимов, А. Аль-Тувайни, Е. Д. Меньшикова и др. // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – Вып. 3. – С. 20–23. 5. *Bailey, M. B.* Results of probabilistic fault detection and diagnosis method for vapor compression cycle equipment [Текст] / M. B. Bailey, J. F. Kreider, P. S. Curtiss // ASHRAE Transactions. – 2000. – Vol. 107. – P. 1–22. 6. *Свиридов, В. Г.* Системы автоматизации теплофизического эксперимента: учебное пособие для вузов [Текст] / В. Г. Свиридов, Н. А. Виноградов, В. В. Гайдученко и др. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 252 с. – ISBN 978-5-383-00120-2. 7. *Сапожников, В. Б.* Пособие для ремонтника [Текст] / В. Б. Сапожников, В. И. Велюханова. – М.: ЗАО «Остров»; Изд-во Московского университета, 1999. 8. *Riemer, P. L.* The Time Element in Chiller Fault Detection and Diagnosis. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science [Text] / P. L. Riemer // University of Wisconsin. – Madison, 2001. – 67 p.

**Bibliography (transliterated):** 1. Adam, W., and E. James. "Fault Detection and Diagnostics for Commercial Coolers and Freezers." *Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, USA.* 2008. 1–10. Print. 2. Nooman, A. M., N. R. Miller and C. W. Bullard. "Fault Detection and Diagnosis in Air Conditioners and Refrigerators." *Air Conditioning and Refrigeration Center University of Illinois Mechanical & Industrial Engineering Dept.* 1999. 3. Efimov, A. V., A. Al-Tuvajni and S. L. Zevin. "Metod postroenija diagnosticheskikh modelej oborudovanija jenergoustanovok." *Vestnik NTU "HPI"*. No. 13. Kharkov: NTU "HPI", 2002. 153–157. Print. 4. Efimov, A. V., et al. "Identifikacija matematicheskikh modelej tehnologicheskikh processov v jenergeticheskom oborudovanii pri reshenii zadach diagnostiki." *Vestnik NTU "HPI"*. No. 3. Kharkov: NTU "HPI", 2003. 20–23. Print. 5. Bailey, M. B., J. F. Kreider and P. S. Curtiss. "Results of probabilistic fault detection and diagnosis method for vapor compression cycle equipment." *ASHRAE Transactions*. Vol. 107. 2000. 1–22. Print. 6. Sviridov, V. G., et al. *Sistemy avtomatizacii teplofizicheskogo jeksperimenta*. Moscow: Izdatel'skj dom MJeI, 2007. ISBN 978-5-383-00120-2. Print. 7. Sapozhnikov, V. B., and V. I. Veljuhanova. *Posobie dlja remontnika*. Moscow: ZAO "Ostrov"; Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1999. Print. 8. Riemer, P. L. "The Time Element in Chiller Fault Detection and Diagnosis. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science." *University of Wisconsin*. Madison, 2001.

Поступила (received) 26.02.2014