

УДК 621.56-52:004.9

Никольский В.В., Очеретяный Ю.А., Танасийчук М.И.
ОНМА

МОНИТОРИНГ СУДОВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ (ПЛК)

Под энергетической эффективностью понимают рациональное (оно же эффективное) использование (расходование) энергетических ресурсов.

Традиционное определение технического состояния судовой холодильной техники предполагает её остановку и разборку. Это может быть связано со значительными затратами времени и средств, а так же осложняется ограниченными возможностями экипажа, находящегося на большом удалении от береговых и плавучих ремонтных мастерских. Применяя специальные средства диагностирования, позволяющие достоверно определить техническое состояние объекта и его остаточный ресурс без разборки на детали, возможно без выключения холодильной установки из работы по текущим измеренным и, затем определяемым параметрам её эксплуатации. Это может повысить энергетическую эффективность эксплуатации холодильной установки в результате снижения энергетических затрат, материальных ресурсов на техническое обслуживание и ремонт, а так же увеличить надежность за счет ее прогнозирования.

Создание таких систем направлено на решение проблемы, которую условно можно разделить на две части: холодильную и электротехническую. Последняя часть предполагает знание номинальных и измерение текущих значений электрических параметров, а именно, напряжения, тока, активной и реактивной мощности для используемого в установке электрооборудования и не является сложной задачей. Такой подход призван учесть те реальные значения параметров, которые определяют как количество потребленной электроэнергии, так и те, по которым на основе математического моделирования вычисляют мощность на валу компрессора для дальнейшего определения массового расхода хладагента в системе без использования традиционного расходомера. Что же касается холодильной части, то здесь, на основе определений и в соответствии существующими стандартами, нужно разместить датчики и электрически измерить необходимые неэлектрические параметры (давления и температуры),

преобразовать их для ввода в компьютер с последующим вычислением необходимых промежуточных величин и, в конечном счете, количества выработанного холода за обоснованно выбранный определенный интервал времени. Полученные (измеренные) как холодильные, так и электрические величины должны быть соотнесены, определена их динамика, проведено сравнение с данными завода-изготовителя, с нормативными и теоретическими значениями, а затем сделан обоснованный вывод о «качестве» потребления электроэнергии данной холодильной установкой. С точки зрения принятия решений для управления и диагностики этот подход позволит иметь достоверные оперативные данные по холодопроизводительности и количеству выработанного холода, текущему значению потребляемой мощности, количеству и качеству потребленной электрической энергии, а также по её удельному расходу на выработку холода, кроме того, технический менеджер и старший механик судоходной компании получит динамику изменения этих величин за выбранный период времени для решения задач прогностики.

В общем случае для создания подобной системы необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи: разработать математическую модель функционирования объекта диагностирования, позволяющую проверять работоспособность и правильность функционирования по совокупности диагностических параметров; создать производственные модели повреждений и отказов, дающие возможность обнаруживать повреждения и отказы, выявлять причины их возникновения. Далее следует построить сами алгоритмы диагностирования, которые должны включать в себя такой набор элементарных проверок, по результатам которых можно будет в задачах обнаружения повреждений и отказов четко отличить исправное и работоспособное состояние судовой холодильной установки от неисправного. Для построения моделей повреждений и отказов следует использовать производственные и топологические модели в виде деревьев отказов и графиков причинно-следственных связей между техническими состояниями и диагностическими параметрами. Модели объектов диагностирования являются основой для построения самих алгоритмов диагностирования. Построение алгоритмов диагностирования состоит в выборе такой совокупности проверок, по результатам которых можно с уверенностью надежно отличить исправное, работоспособное состояние от неисправного, а также различать виды де-

фактов между собой. С техническим диагностированием связана задача дальнейшего прогнозирования технического ресурса объекта.

Авторами для создания системы мониторинга были получены следующие решения: разработана математическая модель функционирования объекта диагностирования [1, 2]; созданы производственные модели повреждений и отказов [3]; построены алгоритмы диагностирования [4].

Таким образом в ОНМА была создана специализированная система мониторинга для текущей оценки и последующего технического диагностирования судовой холодильной установки на базе персонального компьютера. Однако, эта система работает в «мягком» реальном времени, что не в полной степени отражает объективную оценку состояния судовой холодильной установки, находящейся в реальных условиях эксплуатации.

Были предприняты попытки создания системы, работающей в «жестком» реальном времени. Так в работе [5] приводится описание системы мониторинга на основе DSP процессора TMS320 F24x с минимальной частотой опроса датчиков 1 Гц при 12-ти разрядном АЦП. Однако результаты работы в открытой печати не приводятся, и оценить работу такой системы не представляется возможным.

Авторами была предпринята попытка разработки системы мониторинга, работающей в «жестком» реальном времени. Это стало возможным благодаря появлению новых средств автоматизации – ПЛК. Кроме того, специфика этих средств позволила использовать новые дополнительные функции при мониторинге.

В качестве объекта управления была выбрана лабораторная судовая холодильная установка МАК-ФВ6 в ОНМА, которая используется для охлаждения провизионных кладовых по системе воздушного охлаждения при испарении холодильного агента в воздухоохладителях, представляя собой замкнутую, герметично закрытую систему (рис. 1).

Технические данные компрессора: марка – ФВ6; тип – одноступенчатый поршневой непрямочный вертикальный сальниковый; число цилиндров – 2; диаметр цилиндра – 67,5 мм; ход поршня – 50 мм; холодопроизводительность – 6000 ккал/ч. Холодильный агент – фреон R-134a. Температура кипения -15°C , температура конденсации 30°C (при стандартном режиме). Фреоновая машина рассчитана на охлаждение двух провизионных камер, позволят поддерживать в них разную температуру.

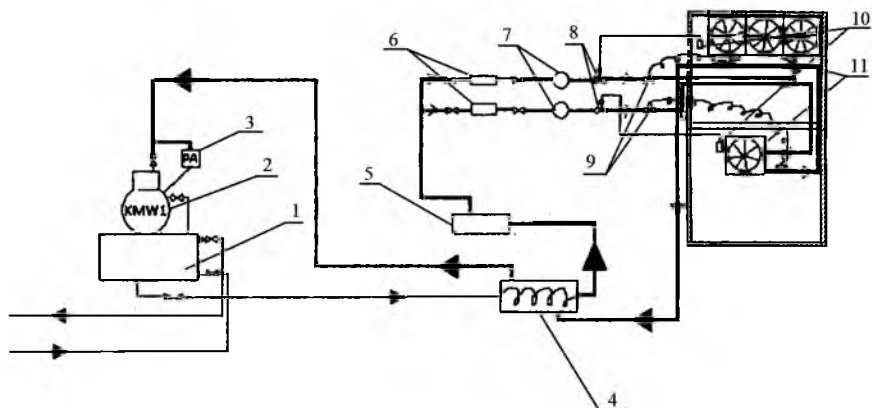


Рис. 1 - Принципиальная схема холодильной установки.

1 – конденсатор; 2 – компрессор; 3 – реле давления; 4 – рекуперативный теплообменник; 5 – фильтр-осушитель; 6 – фильтры; 7 – индикаторы влажности; 8 – соленоидные вентили; 9 – терморегулирующие вентили; 10 – реле температуры; 11 – воздухоохладители.

Для реализации системы мониторинга в “жестком” реальном времени нами был выбран ПЛК серии Inline ILC 130 ETH немецкой фирмы Phoenix Contact, который выполнен в соответствии с общепринятыми стандартами программирования МЭК 61131-3 и технологии передачи данных Ethernet, поддерживает параллельный обмен данными с OPC-серверами и коммуникацию с оконечными устройствами, поддерживающими протокол TCP/IP.

Основные характеристики ПЛК ILC 130 ETH:

скорость обработки 90 мкс на 1000 инструкций для логического типа данных и 1,7 мс на 1000 инструкций для смешанного типа данных;

один INTERBUS интерфейс и один Ethernet интерфейс;

192 Кбайт памяти программ и 192 Кбайт памяти данных, 8 Кбайт энергонезависимой памяти данных;

8 прямых входов и 4 прямых выхода;

максимум 2048 точки ввода/вывода;

питание 24 В;

встроенный web/FTP server;

поддержка OPC.

ILC 130 ETH обладает степенью защиты IP20 и способен функционировать при следующих условиях окружающей среды:

температура окружающего воздуха $-25\text{ }^{\circ}\text{C} - 55\text{ }^{\circ}\text{C}$;

допустимая относительная влажность воздуха 10 % – 95 %;

давление воздуха 70 кПа – 106 кПа (До 3000 м над уровнем моря);

вибрация 5 g.

Для непрерывного измерения давления на стороне всасывания и нагнетания компрессора было использовано два датчика давления EWPA030 фирмы Eliwell Controls srl.

К основным характеристикам датчиков относятся: диапазон измерения 0 – 30 Бар; выходной сигнал 4 – 20 мА; напряжение питания датчика 8 – 28 В; схема подключения двухпроводная; рабочая температура $-20 \dots +80\text{ }^{\circ}\text{C}$; погрешность измерения давления $\pm 1\text{ }%$ при $0 +50\text{ }^{\circ}\text{C}$, и $\pm 2,5\text{ }%$ при температуре ниже 0 и выше $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$; степень защиты IP65;

Для получения информации о температуре в охлаждаемых помещениях, а также в характерных точках цикла холодильной машины были использованы NTC-термисторы фирмы Semitec. Данная модель термистора относится к разряду высокоточных датчиков температуры.

Сопротивление термистора при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 5 кОм.

Диапазон измерения температуры термисторов составляет $-50 + 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В качестве устройства связи с объектами (УСО) для получения информации с датчиков использовался модуль из 8 аналоговых входов IB IL AI 8/SF-PAC фирмы Phoenix Contact. Данный модуль позволяет подключать датчики с токовыми выходами или с выходами по напряжению по двухпроводной схеме (с экранированием).

Особенностями данного модуля являются: высокая точность измерения; чрезвычайно высокая скорость измерения; отличная фильтрация шумов; разрядность АЦП 16 бит.

Для получения информации о состоянии холодильной установки была использована панель оператора WP 04T фирмы Phoenix Contact.

Фронтальная сторона панели имеет степень защиты IP65, а тыльная – IP20. Панель способна функционировать при следующих условиях окружающей среды: температура воздуха (эксплуатация) $0 \dots +50\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура воздуха (хранение / транспортировка) -

25 ...+ 70 °С; влажность воздуха (эксплуатация) 20 % – 85 %; влажность воздуха (хранение / транспортировка) 10 % – 95 %.

Основные характеристики панели сведены в табл. 1.

Функциональная схема системы мониторинга холодильной установки представлена на рис. 2, в которой предусмотрена ещё и возможность управления.

Таблица 1 – Технические характеристики операторской панели WP 04T

| | |
|----------------------|-----------------------------------|
| Экран | 8,9 cm / 3,5"-TFT |
| Разрешение экрана | 320 x 240 Pixel (QVGA) |
| Подсветка | LED |
| Количество цветов | 65,536 |
| Процессор | RISC ARM9™ CPU; 200 MHz |
| RAM | 64 MByte SDRAM |
| Память | 32 MByte flash memory |
| Интерфейсы | 2x USB Host 2.0 |
| Сеть | 1x Ethernet (10/100 MBit/s), RJ45 |
| Операционная система | Windows CE 5.0 |

Для разработки программного обеспечения ПЛК использовалась прикладное программное обеспечение для всех устройств управления Phoenix Contact - PC Worx, характеризующееся широкими возможностями программирования и открытостью в отношении различных протоколов передачи данных.

На рис. 3 представлен фрагмент программы на языке ФБД для контура защиты компрессора.

Программная реализация оперативного контроля системы осуществлена при помощи высокопроизводительного ПО для визуализации Visu+ от фирмы Phoenix Contact, которое также поддерживает функционал SCADA и открыто для всех классов контроллеров и позволяет регистрировать и протоколировать все производственных данные, обмениваться ими с базами данных или системами планирования ресурсов предприятия.

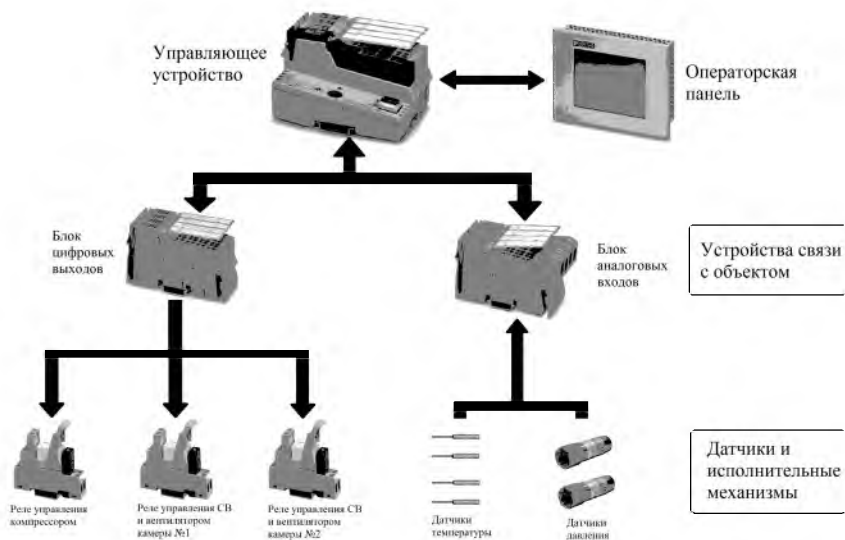


Рис. 2 - Функциональная схема системы управления

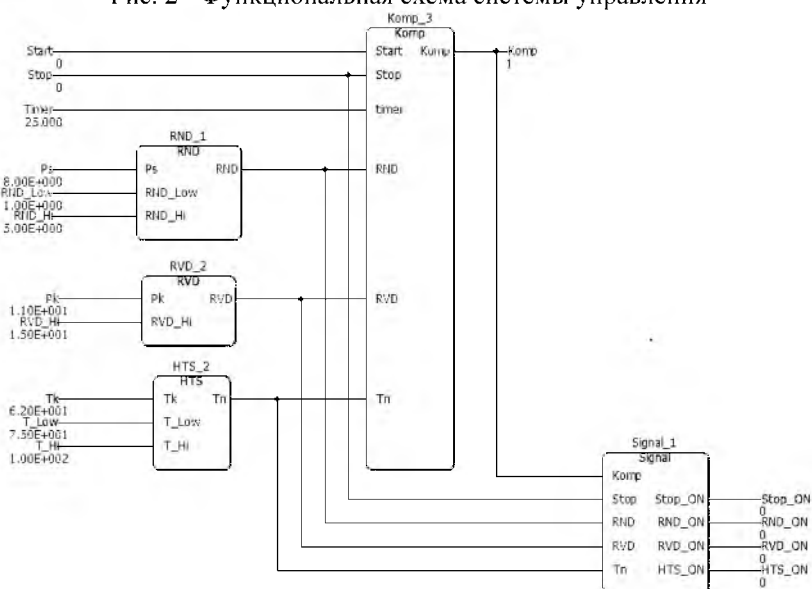


Рис. 3 - Программа работы контура пуска-остановки компрессора совместно с контуром защиты и сигнализации: RND_1 - реле низкого давления (РНД), RVD_2 - реле высокого давления (РВД), HTS_2 реле высокой температуры и термостата (ПВТ), Komp_3 - блок пуска-остановки компрессора; Signal_1 - блок индикации причины остановки компрессора.

В программе Visu+ был разработан графический интерфейс для интуитивного и простого управления холодильной установкой. Посредством него осуществляется обмен информацией между контроллером и оператором.

Оператору, в первую очередь, предоставляется возможность ввести все необходимые уставки (рис. 4, а) для правильного функционирования системы защиты. В перечень этих уставок входят: давление срабатывания РНД; давление отключения РНД; давление срабатывания РВД; температура срабатывания РВТ; температура отключения РВТ.

Страница ввода уставок защиты имеет ограниченный доступ для защиты её от несанкционированного изменения.

Помимо ввода необходимых уставок оператору доступна возможность запуска и остановки компрессора в ручном режиме, используя возможности графического интерфейса (рис. 4, б). В этом же окне выводится информация о текущем состоянии работы компрессора, а также о причине его остановки (вручную оператором или же при срабатывании защиты).

Индикация давления и температуры всасывания, давления и температуры нагнетания компрессора, величины перегрева и переохлаждения хладагента происходит в режиме реального времени (рис. 4, в).

Помимо этого на экран выводятся текущие параметры температуры в провизионных камерах, информация о положении соленоидных вентилей, и работе вентиляторов провизионных воздухоохладителей (рис. 4, г). Так же оператор может задавать значения температур, которые необходимо поддерживать в каждой из провизионных камер.

Для проведения экспериментальных исследований была проведена предварительная подготовка, которая заключалась в проведении индивидуальной тарировки для каждого термистора с целью обеспечения необходимой точности измерений. Это необходимо было выполнить, т.к. во время производства такого типа преобразователей технически невозможно получить два абсолютно одинаковых по характеристикам термистора. В результате для каждого термистора были рассчитаны эмпирические константы a , b , c (табл. 2), которые входят в уравнение Стенхарт-Харта (Steinhart-hart):

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln(R) + c \cdot \ln(R)^2,$$

где T – температура в градусах Кельвина; a , b , c – эмпирические константы; R – сопротивление термистора.

Информация о термодинамических показателях в характерных точках цикла холодильной машины позволяет не только получить данные о перегреве и переохлаждении хладагента, построить действенный цикл СХУ, но и диагностировать техническое состояние холодильной установки в режиме реального времени.

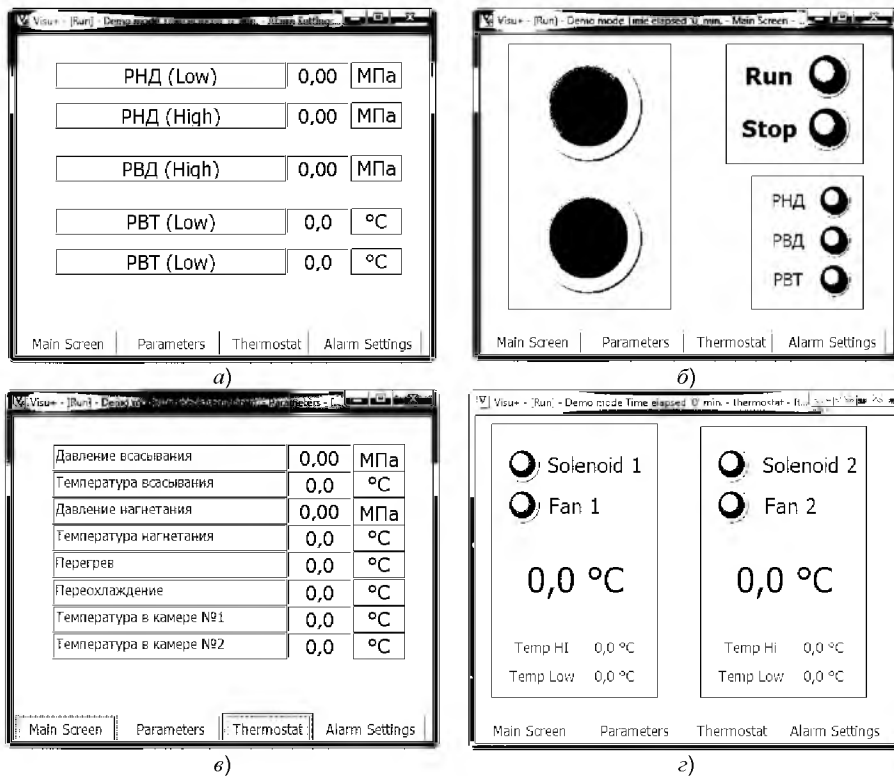


Рис. 4 - Графический интерфейс : а - окно ввода уставок системы защиты; б - главное окно графического интерфейса; в - окно индикации параметров холодильной установки; г - окно работы термостата.

Т.к. в работе рассматривалась холодильная установка с регенеративным теплообменником, цикл которой состоит из 7 узловых точек, то в качестве исходных данных для расчета цикла использовалась информация, полученная с датчиков температуры, установленных на

линиях всасывания и нагнетания компрессора, на выходе из конденсатора, перед ТРВ и на входе в испаритель.

Для каждой точки были рассчитаны: температура, давление, энтропия, энтальпия и удельный объем.

В программе использовались уравнения, составленные на основании экспериментальных данных и ранее разработанных подробных таблиц термодинамических свойств рабочих веществ [6].

Константы уравнений использовались для фреона R134a.

Эти данные служат основанием для расчета машин и аппаратов. По сравнению с традиционным определением параметров цикла по тепловым диаграммам разработанный метод обеспечивает более высокую точность и полную термодинамическую увязку между найденными параметрами состояния.

Таблица 2 – Коэффициенты уравнений состояния хладагентов

| Обозначение | R12 | R134a | R22 | R502 |
|-------------|---------|----------|---------|---------|
| a_0 | -113,54 | -122,996 | -185,35 | -152,28 |
| a_1 | 74,62 | 114,087 | 101,142 | 89,46 |
| a_2 | 0,064 | 0,074 | 0,058 | 0,052 |
| b_0 | 0,47 | 0,561 | 0,537 | 0,562 |
| b_1 | 0,069 | 0,044 | 0,057 | 0,029 |
| b_2 | 0,00035 | 0,00059 | 0,00056 | 0,00069 |
| B_1 | -0,749 | 0,999 | 0,966 | 0,211 |
| B_2 | 0,172 | -0,204 | -0,24 | -0,163 |
| B_3 | -30,215 | -58,026 | -48,674 | -26,872 |
| C_0 | 0,293 | 0,314 | 0,283 | 0,256 |
| C | 0,099 | 0,173 | 0,122 | 0,107 |
| C_1 | 143,15 | 255,42 | 190,15 | 143,97 |
| C_2 | -0,414 | -0,592 | -0,22 | -0,215 |
| D_0 | 8,184 | 11,922 | 10,204 | 9,332 |
| D_1 | -0,0008 | -0,0057 | -0,0036 | -0,0024 |
| D_2 | -2496,7 | -3161,7 | -2706,2 | -2518,6 |
| d_0 | 1,535 | 1,784 | 1,714 | 1,639 |
| d_1 | -1,668 | -2,429 | -2,19 | -1,950 |
| d_2 | 0,0013 | 0,0019 | 0,0016 | 0,0015 |
| R | 0,069 | 0,081 | 0,096 | 0,074 |

По результатам проведенного эксперимента при помощи ПЛК и системы на основе ПК [4] были получены данные динамики изменения температур узловых точек цикла. Совместно с записью темпера-

тур были получены данные о динамике изменения давления конденсации и давления испарения.

По табличным данным из выбранного диапазона были рассчитаны средние значения температур и давлений для двух систем определения эксплуатационных и термодинамических показателей. Полученные данные были сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Расчетные данные цикла холодильной машины

| | Теоретический цикл | ПЛК | ПК |
|-------|--------------------|--------|--------|
| 1 | 8,36 | 9,10 | 5,31 |
| 2 | по циклу | 63,83 | 65,43 |
| 3 | 27,87 | 27,56 | 41,49 |
| 4 | 25,87 | 27,56 | 41,49 |
| 5 | 17,87 | 18,28 | 16,43 |
| 6 | -16,64 | -14,97 | -13,21 |
| 7 | -6,64 | -14,97 | -13,21 |
| P_k | 0,15 | 0,164 | 0,176 |
| P_0 | 0,73 | 0,724 | 1,064 |

По данным табл. 3, используя программный пакет CoolPack, в координатах i - $\lg P$ были построены циклы холодильной машины, представленные на рис. 5.

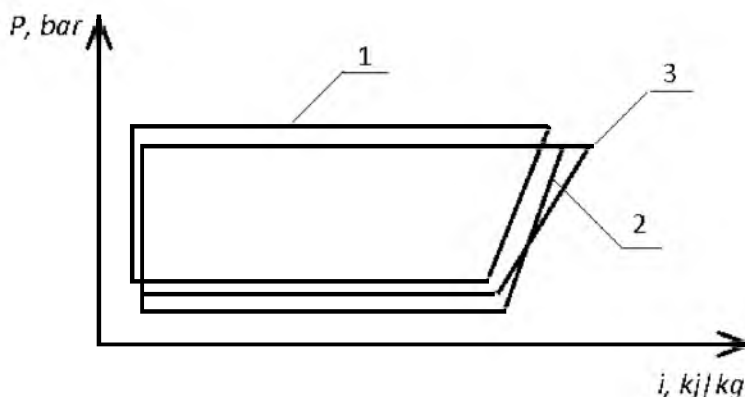


Рис. 5 - Циклы холодильной машины:

1 – цикл, рассчитанный системой на базе ПК; 2 – теоретический цикл; 3 – цикл, рассчитанный системой на базе ПЛК.

Проанализировав диаграмму с изображением холодильных циклов можно сделать вывод, что параметры цикла, рассчитанные системой мониторинга, созданной на базе ПЛК ILC 130 ETH, наиболее

точно соответствует теоретическому циклу холодильной машины, нежели параметры, рассчитанные системой на базе ПК.

Таким образом, использование современных микропроцессорных средств автоматизации для обеспечения необходимого уровня контроля эксплуатационных параметров, их автоматической защиты и регулирования является одним из перспективных направлений повышения мониторинга текущей оценки и последующего технического диагностирования судовой холодильной установки в “жестком” реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Очеретяный Ю.А., Живица В.И., Белый В.Н., Онищенко О.А., Вайнфельд Э.Й. Концепция системы компьютерного мониторинга и технической диагностики рефрижераторной установки судна // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. - 2011. - Вып. 28. Одесса: ОНМА - С. 5 - 11.

2. Очеретяный Ю.А. Определение изменений теплотехнических характеристик судовых холодильных установок в процессе эксплуатации // Холодильна техніка і технологія: наук.-техн. журнал. – 2013. – Вип. 2 (142). – Одесса: ОДАХ. - С. 15 - 19.

3. Очеретяный Ю.А. Определение отклонений функционирования судовой холодильной установки в процессе эксплуатации // Холодильна техніка і технологія: наук.-техн. журнал. – 2013. – Вип. 3 (143). - Одеса: ОДАХ. - С. 10 - 14.

4. Очеретяный Ю.А. Разработка системы технической диагностики СХУ // Матеріали II-ї міжнародної науково-технічної конференції Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації, ч. 2. – Миколаїв, 2013. - С. 198 - 201.

5. Очеретяный Ю.А., Живица В.И., Онищенко О.А., Вайнфельд Э.Й., Тюхай Д.С. Разработка системы измерения энергетических показателей компрессионной холодильной установки // Харчова наука і технологія. – 2011. – Вип. 4(17). – Одеса: ОНАХТ. – С. 107 - 109.

6. Очеретяный Ю.А. Определение термодинамических показателей судовой холодильной установки в процессе эксплуатации // Проблеми техніки: наук.-вир. журнал. - 2013. – Вип. 2. – Одеса: ОНМУ, ХНУ. - С. 119 - 125.