

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ РАБОЧИХ СРЕД И ЭЛЕМЕНТОВ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представлен диагностический подход, основанный на граф-модели, влияние инееобразования и наличия масла в хладагенте при анализе характеристик пароконденсационного термотрансформатора. Рассмотрены причинно-следственные связи проявления различных дефектов и случаи их одновременного возникновения, возможность диагностирования накапливающихся дефектов. Проанализировано влияние инееобразования и наличия масла на процессы теплообмена.

Ключевые слова: тепловой насос, характеристики, реальное рабочее тело, инееобразование, неисправности, диагностика, модель.

Наведено діагностичний підхід, що базується на граф-моделі, вплив утворення інею та присутності мастила у холодоагенті при аналізі характеристик пароконденсационного термотрансформатора. Розглянуто причинно-наслідкові зв'язки прояву різних дефектів та випадки їхнього одночасного виникнення, можливість діагностування дефектів, що накопичуються. Проаналізовано вплив утворення інею та присутності мастила на процеси теплообміну.

Ключові слова: тепловий насос, характеристики, реальне робоче тіло, утворення інею, несправності, діагностика, модель.

Diagnostic approach based on graph-model, and the frost and the oil presence in the refrigerant influence in the analysis of the vapor compression thermotransformer characteristics are submitted. Causal relationships manifestations of various defects and cases of their simultaneous occurrence, the possibility of cumulative defects diagnostics are considered. Frost and oil presence in the cycle influence on the processes of heat transfer are analyzed.

Key words: heat pump, characteristics, working fluid, frost, fault condition, diagnostics, model.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Совершенствование климатического и холодильного оборудования сопровождается непрерывным повышением качества и надёжности агрегатов. Однако происходящее при этом усложнение установок, регулирующих и управляющих систем, не исключает необходимость регулярного технического контроля и обслуживания. Причём с расширением использования теплонасосных систем обогрева эта необходимость усиливается. Только в этом случае они будут долговечны и эффективны.

Исследования [1] показали, что до 90 % современных систем кондиционирования работают с теми или иными отклонениями от исправного состояния. При этом, средняя производительность всех обследованных систем кондиционирования составляет 80 % от расчётной, а 63 % оборудования потеряли в мощности из-за утечки хладагента [2]. Несвоевременное устранение неисправностей влечет за собой по меньшей мере возрастание эксплуатационных затрат, а в некоторых случаях и полный выход оборудования из строя, требующий его замены, что значительно увеличивает и капитальные затраты.

Устранить или значительно уменьшить такие риски позволяет использование систем диагностики технического состояния такого оборудования, которые можно характеризовать

общим термином пароконденсационные термотрансформаторы (ПТТ). К этой категории относится абсолютное большинство холодильных машин, кондиционеров и тепловых насосов.

Диагностические системы в той или иной форме существуют практически с момента начала массовой эксплуатации холодильной техники. Первоначально это скорее был набор диагностических процедур сопоставления и контроля небольшого числа параметров и характеристик. Развитием этого подхода стало появление методик, основанных на наборе правил и таблиц, в которые были сведены часто проявляющиеся дефекты, их признаки и методы устранения [3].

Следующим шагом стало использование так называемой эталонной модели, которая определяла влияние одних показателей на другие [4]. В качестве внешних факторов, определяющих значение параметров в характерных сечениях ПТТ, использовались температура окружающей среды, температура и относительная влажность воздуха в помещении. Сравнивая результаты, полученные с помощью эталонной модели, с реальными значениями контролируемых параметров на основе соответствующих правил и таблиц, делали вывод о наличии того или иного дефекта. В числе контролируемых параметров, определяющих состояние системы, были температура испарения, температура конденсации, перегрев, переохлаждение, температура нагнетания, температурный напор в конденсаторе и испарителе.

Автор [5] представил метод графа связей, а в статье [6] описаны два подхода, использующие электрические параметры и соответствующие контроллеры для диагностирования неисправностей в системах кондиционирования. Сравнение этих методов выполнено в работе [7]. Среди недостатков названы: возможность ложных выводов о неисправностях и невозможность диагностирования всех дефектов. В последние годы получили развитие системы диагностики технического состояния ПТТ, реализованные в виде программно-вычислительного комплекса, позволяющего путём контроля относительно небольшого числа параметров определить возможные причины их отклонения от номинального (в исправном состоянии) значения и на этой основе идентифицировать дефекты и неисправности ПТТ, прогнозировать их развитие [8; 9; 10].

Условно все дефекты, возникающие в ПТТ, можно разделить на несколько групп. К первой можно отнести накапливающиеся во времени дефекты, такие как нарастание инея, износ трущихся частей, отложение загрязнений на теплообменных и фильтрующих поверхностях, изменение свойств хладагента и теплоносителей в процессе эксплуатации, малые утечки хладагента и ряд других. До определённого момента эти дефекты не приводят к остановке системы.

Другую группу составляют дефекты, возникающие вследствие недостатков монтажа и пусконаладки. К ним можно отнести неправильное подключение электрической схемы, некачественную заправку хладагента (грязь в трубопроводе, воздух), несоответствие хладагента в машине и термобаллоне ТРВ и др. Эти дефекты встречаются чаще всего.

Третья группа дефектов связана с неисправностью или отказом отдельных элементов, которые возникают вследствие неправильной эксплуатации оборудования. Сюда же можно отнести неправильную настройку автоматики и неправильный подбор самой машины, когда ПТТ долгое время работает при повышенных нагрузках. В результате некоторые узлы, такие как компрессор, могут выйти из строя. Сюда же можно отнести дефекты, не зависящие от эксплуатирующей и монтажной организации, а связанные с заводским браком элементов оборудования.

Для адекватной оценки причин изменения контролируемых параметров программный комплекс должен базироваться на достоверных моделях рабочего процесса всех элементов ПТТ, построенных с учётом возможных их неисправностей. При этом должно быть учтено влияние параметров окружающей среды и возможность комплектации ПТТ различными агрегатами, заправки различными хладагентами. Описанная задача является весьма сложной даже без рассмотрения процедуры выбора из числа возможных наиболее вероятной причины изменения контролируемых параметров. Неточности в её решении приводят к

соответствующим ошибкам в диагностике. Поэтому работы в направлении совершенствования элементов программы и процедуры принятия решения сохраняют актуальность и значимость.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Среди множества возможных неисправностей рассматриваем только те, которые не приводят к остановке ПТТ. Даже при выборе наиболее распространённых из них общее число возможных неисправностей составит более пятидесяти (рис.1). На рисунке для наглядности построен граф причинно-следственных связей отклонений параметров и указанных неисправностей. Представлены события Z_j , связанные с выходом постоянно регистрируемых параметров за заданные пределы, и возможные причины этих событий S_j . На обобщающее событие Z_0 , представляющее изменением требуемого температурного режима помещения, влияет множество других событий и причин.

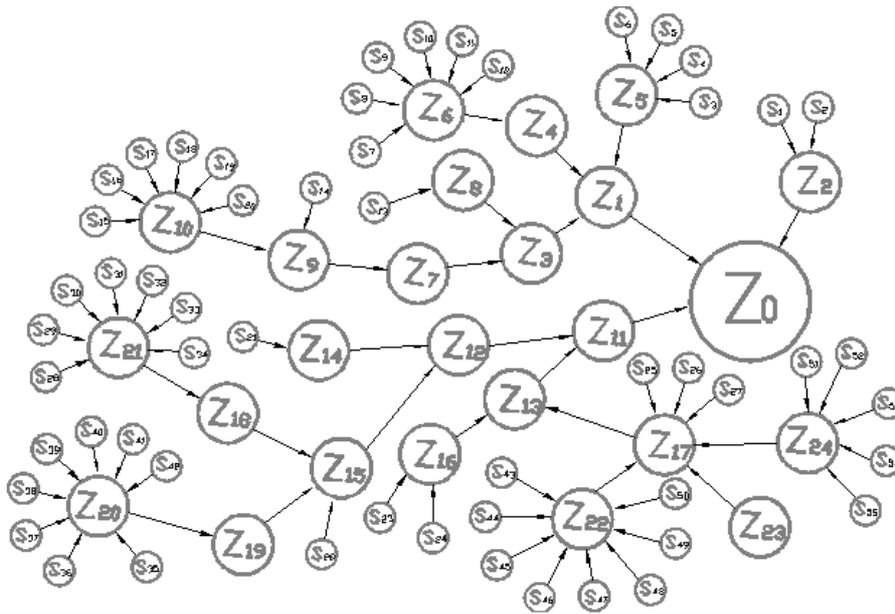


Рис. 1. Граф причинно-следственных связей отклонений параметров рабочего процесса и дефектов ПТТ

Каждое из них влияет на конечный результат через свою определённую цепочку изменений параметров рабочего процесса. Например, для одной из веток графа, события S_3 – не выключается освещение в камере, S_4 – недостаточное уплотнение двери, S_5 – продукция поступает с повышенной температурой, S_6 – выделение тепла в процессе хранения, которое ведёт к событию Z_5 – повышенные теплопритоки в камеру, которое в свою очередь ведёт к событию Z_1 – повышенное давление испарения. Событие Z_1 при этом ведёт к изменению температурного режима в камере, событию Z_0 .

В некоторых случаях, таких как слабый компрессор и наличие в контуре неконденсирующихся газов, влияние дефектов может взаимно компенсироваться и не приводит к изменению температурного режима помещения. Такие случаи наиболее опасны, так как протекают незаметно и не вызывают беспокойства у персонала до тех пор, пока какой-либо агрегат ПТТ не откажет. В других случаях несколько одновременно появившихся незначительных дефектов, например, нехватка хладагента в контуре и засорение фильтра, вместе могут создавать эффект отказа системы. Вообще, одновременное действие нескольких дефектов представляет особо сложные случаи. Если не диагностировать их сразу, а пытаться устранить причину кажущегося дефекта, можно ещё в большей степени нарушить работу ПТТ, что скорее приведёт к отказу оборудования. В то же время при своевременном устранении одиночных дефектов вероятность парных очень мала.

Выявление накапливающихся дефектов осложнено медленным изменением регистрируемых параметров, которое на начальном этапе находится в пределах ошибки измерений. В этом случае необходимо вести статистику показаний приборов, по которой можно отслеживать изменение математического ожидания определённых показателей и по его изменению диагностировать развитие того или иного долговременного дефекта. Примером может служить постепенное снижение коэффициента подачи компрессора, который зависит от таких параметров как величина мёртвого объёма, гидравлические потери, подогрев рабочего вещества при всасывании, теплообмен в цилиндре, утечки и перетечки рабочего вещества и трение. Интегрально изменение коэффициента подачи на 5 %, приводит к изменению холодопроизводительности на 7-10 %, в зависимости от конкретных условий. Лучше диагностируются такие долговременные дефекты как загрязнение поверхностей теплообменников, растяжение ремней вентиляторов или изменение количества хладагента в магистрали (утечка), которые, как правило, наблюдаются визуально и легко устраняются.

Для количественной оценки влияния дефектов обязательно необходима математическая модель процесса и соответствующий модуль в составе целостной программы расчёта характеристик ПТТ. Рассмотрим это на примере инееобразования. При толщине слоя инея 3-4 мм расход электроэнергии увеличивается на 50-60 %, а при толщине 7-10 мм на 300-400 % [11]. Связано это с изменением коэффициента теплоотдачи от воздуха к наружной поверхности. Температура поверхности ребер понижается по мере удаления от основания, поэтому температурный напор стенка-газ – величина переменная. В расчетах в качестве температурного напора принимают разность температур газа и стенки трубы у основания ребра. Поэтому необходимо вводить значение приведенного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{2пр}$, учитывающего как теплообмен между потоком и оребренной поверхностью, так и передачу тепла теплопроводностью через металл ребер.

Приведенный коэффициент теплоотдачи от воздуха к наружной оребренной поверхности теплообменника в условиях инееобразования может быть рассчитан по следующей формуле [12]:

$$\alpha_{2пр}^{ин} = \alpha_j \cdot \frac{F_p \cdot \eta_p^{ин} + F_{II}}{F_{p.c.}},$$

где α_j – эффективный коэффициент теплоотдачи при инееобразовании; $\eta_p^{ин}$ – КПД или эффективность ребра в условиях инееобразования. КПД ребра определяется по формуле:

$$\frac{\theta_0}{\theta_1} = \frac{4 \cdot \varphi \cdot d_{НАР}}{m_{ин} \cdot (D^2 - d_{НАР}^2)},$$

где $m_{ин} = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_j}{\delta_p \cdot \lambda_p}}$ – геометрический фактор оребрения в условиях инеевыпадения;

Эффективный коэффициент теплоотдачи α_j может быть вычислен как:

$$\alpha_j = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot \xi \cdot \varepsilon} + \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)_{ин}},$$

где $\xi = 1 + \frac{L \cdot (d_H - d_{пов}^{ин})}{C_p \cdot (t_H - t_{пов}^{ин})}$ – коэффициент инеевыпадения; L – теплота десублимации воды;

C_p – теплоёмкость воздуха; $t_H, t_{пов}^{ин}$ – температура воздуха вдали и на поверхности инея, °С; $d_H, d_{пов}^{ин}$ – влагосодержание воздуха вдали и у поверхности инея, кг/кг; α_2 – коэффициент теплоотдачи конвекцией без учета инея, Вт/м²К; $\varepsilon = 0,9$ – коэффициент, учитывающий контакт трубы и ребра; δ – толщина слоя инея, м; λ – коэффициент теплопроводности инея, Вт/мК.

В начальный период при толщине слоя инея менее 1 мм наблюдается некоторое увеличение приведенного коэффициента теплоотдачи от воздуха к наружной поверхности теплообменника (рис. 2). При дальнейшем росте толщины наблюдается его снижение.

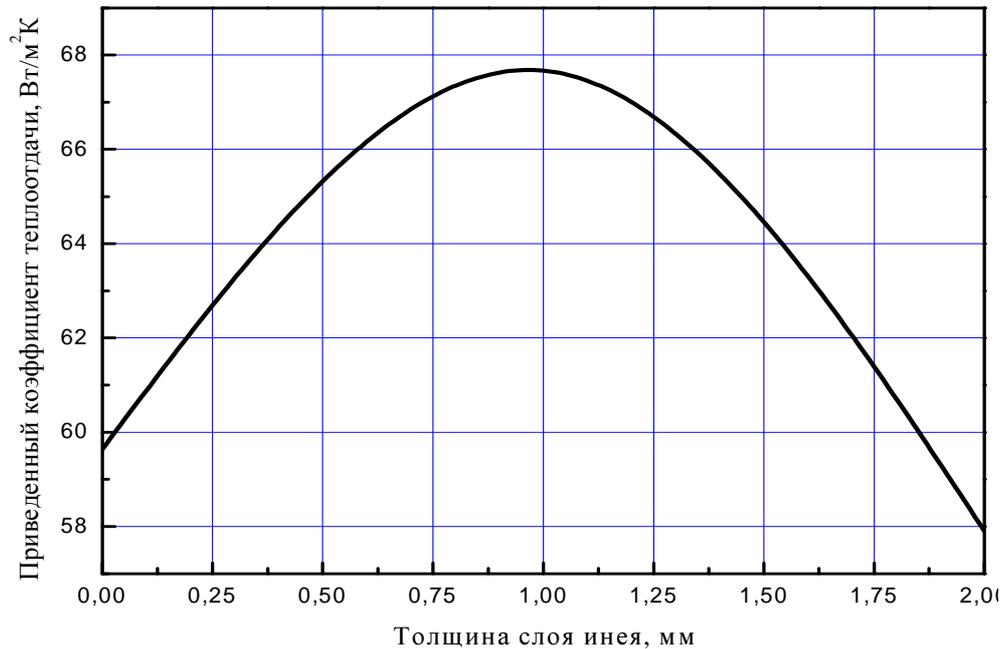


Рис. 2. Зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от толщины слоя инея

Этот факт можно объяснить следующим образом. В условиях инееобразования главными влияющими факторами являются теплопроводность инея и его толщина. В начальный момент времени за счет нарастания незначительного слоя «снежной шубы» на ребрах и трубках теплообменника происходит развитие теплопередающей поверхности и интенсификация теплоотдачи от воздуха путём турбулизации пристеночного слоя. В дальнейшем, по мере нарастания «снежной шубы», положительное влияние толщины инея сказывается все меньше, уступая влиянию роста его термического сопротивления. Слой инея начинает выступать как дополнительная теплоизоляция, что и приводит к снижению коэффициента теплоотдачи. В этом же направлении действует уменьшение проходного сечения канала для воздуха, сопровождающееся снижением его скорости и расхода.

Ещё одним фактором, влияющим на характеристику ПТТ, является состав хладагента. Речь здесь идёт о влиянии компрессорного масла, которое вместе с фреоном циркулирует в контуре ПТТ. Эти среды до последнего времени рассматривались отдельно. На самом деле по контуру ПТТ циркулирует так называемое реальное рабочее тело (РРТ) [13], которое представляет собой смесь хладагента и масла. Хладагент, циркулируя по контуру, осуществляет термодинамический цикл, при реализации которого от объекта отводится (холодильная машина) или подводится (тепловой насос) определенное количество теплоты. От вида хладагента зависят конструктивные особенности ПТТ и его эффективность. Основной функцией холодильного масла является снижение трения между движущимися относительно друг друга и находящимися в контакте деталями. Кроме того, оно повышает герметичность органов сжатия и частично содействует охлаждению компрессора и снижению температуры нагнетания. В случае винтовых компрессоров функция охлаждения становится одной из основных, поскольку в них масло, непосредственно смешанное с нагнетаемыми парами, позволяет снизить температуру последних.

В не меньшей степени масло оказывает влияние на теплообменные процессы. Прежде всего, изменяется температура испарения РРТ. Для её расчёта в [14] предложено соотношение:

$$T_{PXM} = \frac{A}{[\ln(P_{sat}) + B]},$$

где P_{sat} – давление испарения, а A и B находятся по следующим зависимостям:

$$A = a_0 + a_1g + a_2g^3 + a_3g^5 + a_4g^7$$

$$B = b_0 + b_1g + b_2g^3 + b_3g^5 + b_4g^7$$

где g – массовая доля масла в жидкой фракции.

Расчётные данные для смеси R22 и масла при давлении испарения 0,55 МПа представлены на рис. 3. При испарении хладагента, когда массовая доля масла в жидком хладагенте увеличивается, растёт и температура испарения. В результате при недостаточном температурном напоре часть хладагента может не испариться.

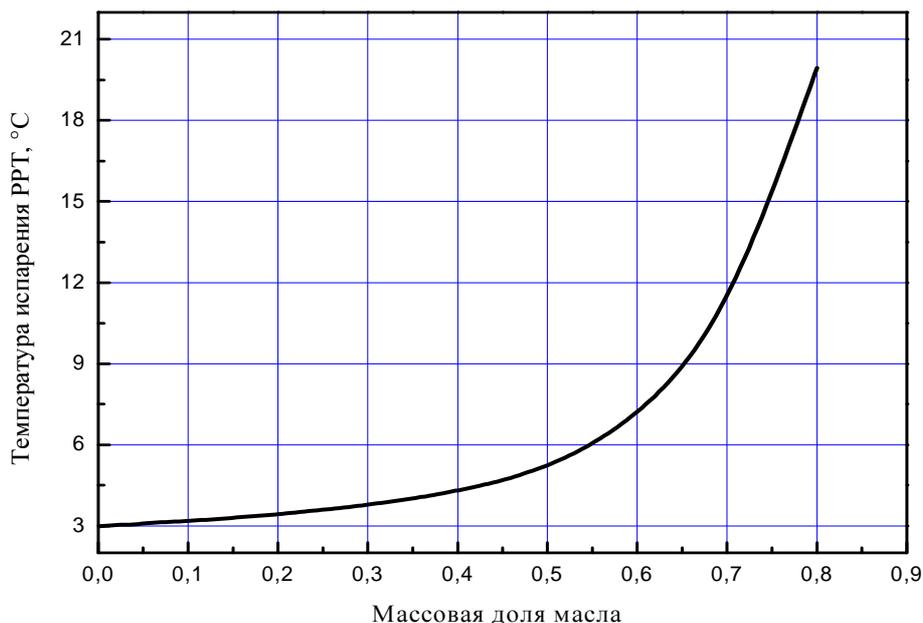


Рис. 3. Зависимость температуры испарения РРТ от массовой доли масла в хладагенте

Это приведет к падению давления испарения и повышению температуры охлаждаемого помещения, что эквивалентно эффекту нехватки хладагента в контуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты конкретизировали подход к созданию компьютерных программ диагностики состояния элементов ПТТ по параметрам рабочего процесса. Сформирована номенклатура и причинно-следственные связи неисправностей ПТТ. Сделаны шаги в направлении учёта инеобразования и реальных свойств рабочего тела при моделировании теплообмена. В перспективе подобные исследования позволят уточнить модель рабочего процесса ПТТ и создать базу для выявления дефектов и научно-обоснованного выбора конфигурации и номенклатуры элементов системы диагностики технического состояния элементов ПТТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proctor, J., 2004, «Residential and Small Commercial Central Air Conditioning; Rated Efficiency isn't Automatic» Presentation at the Public Session. ASHRAE Winter Meeting, January 26, Anaheim, CA.
2. Rossi, T.M., 2004, «Unitary Air Conditioner Field Performance» International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, Paper No. R146, July 12-15, West Lafayette, IN.
3. Isermann, R. 1984. Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation - A Survey, Automatica, 20(4): 387-404.

4. Rossi T.M. and Braun, J.E., 1997. A Statistical, Rule-Based Fault Detection and Diagnostic Method for Vapor Compression Air Conditioners, International Journal of Heating, Ventilating, and Air Conditioning and Refrigerating Research, Vol. 3, No. 1, pp. 19-37.
5. Ghiaus, C. 1999. Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph, Energy and Buildings 30 (1999) 221-132.
6. Shaw, S.R., Norford, L.K., Luo, D., etc., 2002. Detection and Diagnosis of HVAC Faults Via Electrical Load Monitoring, International Journal of Heating, Ventilating, and Air Conditioning and Refrigerating Research, Vol. 8, No. 1, pp. 13-40.
7. Carling, P., 2002. Comparison of Three Fault Detection Methods Based on Field Data of an Air-Handling Unit, ASHRAE Transactions 2002, V. 108, Pt.1.
8. Dexter. A.L. and Ngo, D., 2001. Fault Diagnosis in Air-Conditioning Systems: A Multi-Step Fuzzy Model-Based Approach, International Journal of Heating, Ventilating, and Air Conditioning and Refrigerating Research, Vol. 7, No. 1, pp.83-102.
9. W.Y. & House, J.M., etc., 1996. Fault diagnosis of an Air-Handling Unit Us Artificial Neural Networks, ASHRAE Transactions V.102, Pt.1, pp.340-349.
10. Li, X., H. Hvaezi-Nejad, & J.C. Visier, 1996. Development of a fault diagnosis method for heating systems using neural networks. ASHRAE Transactions 102 (1): 607-614.
11. Канторович В.И. Эксплуатационные показатели малых холодильных машин. – М: Госторгиздат, 1963.
12. Тепло- і масообміні апарати і установки промислових підприємств. Учебний посібник до курсового проектування та самостійній роботі студентів. Ч. 1 / За ред. Б.О. Левченко. – Харків: ХДПУ, 1999. – 420 с. – Рос. Мовою.
13. Влияние примесей масла на теоретические показатели эффективности компрессорной системы для реального рабочего тела r134a-r152a/ХФ22с-16/ В.П. Железный С. В. Ниченко, Т.С. Ниченко.
14. Thome, John R. 2004-2006. Engineering Data Book III. Faculty of Engineering Science and Technology. Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne.

Рецензенты: д.т.н., профессор Радченко М.І.;
к.т.н., доцент Сирота О.А.

© Поздняков Д.В., Петухов И.И.,
Сниховский Е.Л., 2010

Статья поступила в редколлегию 15.04.2010 г.