

УДК 621.1.016.7:681.5

В 94

## МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПАРОКОМПРЕССОРНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА

В. В. Вычужанин, д-р техн. наук, проф.

*Одесский национальный морской университет, г. Одесса*

**Аннотация.** Предложена математическая модель динамики парокомпрессорного теплового насоса типа «вода–вода» как основа для разработки системы управления.

**Ключевые слова:** парокомпрессорный тепловой насос, передаточная функция, модель динамики, система автоматического управления.

**Анотація.** Запропоновано математичну модель динаміки парокомпресорного теплового насоса типу «вода–вода» як основу для розробки системи управління.

**Ключові слова:** парокомпресорний тепловий насос, передавальна функція, модель динаміки, система автоматичного управління.

**Abstract.** The dynamics mathematic model of the «water–water»-type vapor compression heat pump is offered as the basis for developing the control system for such an object.

**Keywords:** vapor compression heat pump, transfer function, dynamics model, automatic control system.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Повышение эффективности комплексного использования топливно-энергетических ресурсов представляет сегодня одну из глобальных проблем, успешное решение которой имеет определяющее значение как для дальнейшего развития мирового сообщества, так и для сохранения среды его обитания.

Одним из перспективных путей решения подобной проблемы является использование энергосберегающих технологий, базирующихся на применении теплонасосных систем теплоснабжения, в частности автоматизированных парокомпрессорных тепловых насосов (ПКТН). Главное достоинство ПКТН — самая высокая эффективность среди современных тепловых насосов. Особенно выгодно использование автоматизированных ПКТН при одновременной выработке теплоты и холода. Подобные технологические процессы реализуются в ряде промышленных и сельскохозяйственных производств, в системах кондиционирования воздуха, при утилизации вторичной теплоты судовых двигателей внутреннего сгорания.

Успешное решение задачи создания экономичных и надежных систем теплоснабжения на основе ПКТН зависит от правильного расчета их средств автоматизации. Однако разработка систем автоматического управления (САУ) ПКТН невозможна без достоверных знаний их статических и динамических характеристик, формализованного представления технологических процессов в виде математических моделей динамики ПКТН.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ современных результатов исследований и публикаций показал, что внедрение автоматизированных ПКТН позволяет снизить расходы топлива

на единицу выработанной теплоты по сравнению с котельными от 20 до 50% или обеспечить трех-, четырехкратную экономию электроэнергии по сравнению с прямым электроснабжением. Соотношение подведенной извне и перекаченной энергии в ПКТН может достигать 1 : 7 [1–3, 7–9, 11, 13, 14].

Парокомпрессорный тепловой насос является холодильной машиной, работающей при повышенных температурах кипения и конденсации в режиме нагрева. В ПКТН используются базовые элементы холодильных машин, конструкции которых развивались в течение десятилетий и достигли высоких технико-экономических показателей. Анализ литературных источников, посвященных разработкам и исследованиям динамических моделей холодильных машин и их агрегатов, показал, что подобные модели предназначены главным образом для изучения динамических процессов и используются для проектирования холодильных машин, включающих в себя большое число элементов с гидравлическими, тепло- и массообменными связями [4–6, 10, 12].

Специфика условий работы тепловых насосов требует создания специальных модификаций базового оборудования с целью достижения высоких эксплуатационных качеств. При этом традиционное применение на практике САУ, построенных на устройствах, не учитывающих особенностей ПКТН как объекта автоматизации, свидетельствует о неработоспособности подобных систем из-за нарушения устойчивости или ухудшения точности регулирования в диапазоне нагрузок 0...30% [7–9, 13]. В настоящее время отсутствуют обобщенные модели динамики, содержащие уравнения связи между отдельными агрегатами и пригодные для использования при разработке и настройке САУ ПКТН. Таким образом, разработка обобщенной математической модели

динамики ПКТН как объекта автоматизации — *актуальная* научно-практическая задача.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — разработка обобщенной модели динамики автоматизированного парокompрессорного теплового насоса.

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

При проведении исследований изучались динамические свойства ПКТН типа «вода–вода» (рис. 1) с полугерметичным поршневым компрессором на смеси хладагентов R142b и R22.

Уравнения динамической модели ПКТН с сосредоточенными параметрами были получены на основе использования уравнений теплового баланса и теплопередачи, преобразований Лапласа при ступенчатых изменениях температуры паров хладагента ( $\Delta T_1, \Delta T_2$ ) и их массового расхода ( $\Delta m_{п.х}$ ), температуры жидкого хладагента ( $\Delta T_3$ ) и его расхода ( $\Delta m_x$ ), температуры воды низкотемпературного источника ( $\Delta T_{s1}, \Delta T_{s2}$ ) и ее массового расхода ( $\Delta m_s$ ), температуры воды нагрева высокотемпературного потребителя ( $\Delta T_{w1}, \Delta T_{w2}$ ) и ее массового расхода ( $\Delta m_w$ ) для установившегося режима работы.

Обобщенная модель динамики ПКТН для потребителя воды высокой температуры, полученная на основе разработанных моделей динамики его агрегатов в операторной форме с использованием дифференциальных уравнений четвертого порядка, имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta T_{w2}(p) = & W_{тн1}(p) \cdot \Delta T_{w1}(p) + \\ & + W_{тн2}(p) \cdot \Delta T_2(p) + W_{тн3}(p) \cdot \Delta T_{s1}(p) + \\ & + W_{тн4}(p) \cdot \Delta q_0(p) - W_{тн5}(p) \cdot \Delta m_w(p) - \\ & - W_{тн6}(p) \cdot \Delta m_x(p) - W_{тн7}(p) \cdot \Delta m_{п.х}(p), \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} W_{тн1}(p) = & W_{кн1}''(p) + \\ & + W_{кн1}'(p) \cdot W_{кн2}''(p) \cdot W_{км2}(p) \cdot W_{и2}(p); \\ W_{тн2}(p) = & W_{кн2}''(p) \cdot W_{кн2}(p) \cdot W_{км2}(p) \cdot W_{и2}(p); \end{aligned}$$

$$W_{тн3}(p) = W_{кн2}''(p) \cdot W_{км2}(p) \cdot W_{и1}(p);$$

$$W_{тн4}(p) = W_{кн2}''(p) \cdot W_{км1}(p);$$

$$W_{тн5}(p) = W_{кн4}'(p) \cdot W_{кн1}''(p) \cdot W_{км2}(p) \cdot W_{и2}(p) + W_{кн4}''(p);$$

$$\begin{aligned} W_{тн6}(p) = & W_{кн3}'(p) \cdot W_{кн2}''(p) \cdot W_{км2}(p) \cdot W_{и2}(p) + \\ & + W_{кн2}''(p)^2 \cdot W_{км2}(p) \cdot W_{и4}(p); \end{aligned}$$

$$W_{тн7}(p) = W_{кн2}''(p)^2 \cdot W_{км2}(p) \cdot W_{и3}(p).$$

Передаточные функции  $W_{и1}(p) \dots W_{и3}(p); W_{км1}(p), W_{км2}(p); W_{кн1}'(p) \dots W_{кн4}'(p)$  и  $W_{кн1}''(p) \dots W_{кн4}''(p)$  в обобщенной математической модели динамики ПКТН (1) определяются следующим образом:

$$W_{и1}(p) = \frac{k_{и1}}{T_{и1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{з.и} \cdot p}; \quad W_{и2}(p) = \frac{k_{и2}}{T_{и1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{з.и} \cdot p};$$

$$W_{и3}(p) = \frac{k_{и3}}{T_{и1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{з.и} \cdot p};$$

$$W_{и4}(p) = \frac{k_{и4}(T_{и2} \cdot p + 1)}{T_{и1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{з.и} \cdot p};$$

$$W_{км1}(p) = \frac{k_{км}}{T_{км} \cdot p + 1}; \quad W_{км2}(p) = \frac{1}{T_{км} \cdot p + 1};$$

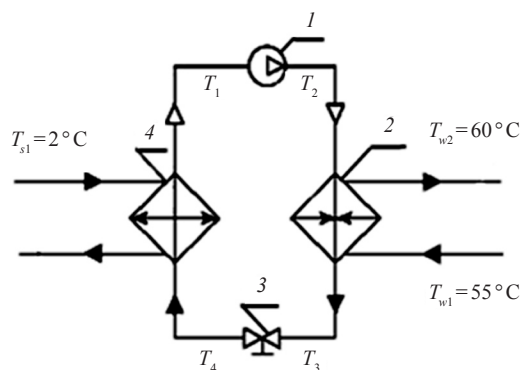
$$W_{кн1}'(p) = \frac{k'_{кн1}}{T'_{кн1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{з.кн} \cdot p};$$

$$W_{кн2}'(p) = \frac{k'_{кн2}}{T'_{кн1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{з.кн} \cdot p};$$

$$W_{кн3}'(p) = \frac{k'_{кн3}}{T'_{кн1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{з.кн} \cdot p};$$

$$W_{кн4}'(p) = \frac{k'_{кн4} \cdot (T'_{кн2} \cdot p + 1)}{T'_{кн1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{з.кн} \cdot p};$$

$$W_{кн1}''(p) = \frac{k''_{кн1}}{T'_{кн1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{з.кн} \cdot p};$$



**Рис. 1.** Типовая схема парокompрессорного теплового насоса: 1 — компрессор; 2 — конденсатор; 3 — регулятор потока смеси хладагентов; 4 — испаритель

$$W''_{\text{KH2}}(p) = \frac{k''_{\text{KH2}}}{T''_{\text{KH1}} \cdot p + 1} \cdot e^{-T''_{\text{KH2}} \cdot p};$$

$$W''_{\text{KH3}}(p) = \frac{k''_{\text{KH3}}}{T''_{\text{KH1}} \cdot p + 1} \cdot e^{-T''_{\text{KH3}} \cdot p};$$

$$W''_{\text{KH4}}(p) = \frac{k''_{\text{KH4}} \cdot (T''_{\text{KH2}} \cdot p + 1)}{T''_{\text{KH1}} \cdot p + 1} \cdot e^{-T''_{\text{KH4}} \cdot p},$$

где  $T$  и  $k$  — постоянные времени и коэффициенты передачи передаточных функций, определяемые по формулам

$$T_{\text{H1}} = \frac{m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}}}{\left( \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}}}{2} - \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}} \cdot m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}}}{2 \cdot m_{\text{S}} \cdot c_{\text{S}}} + m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}} \right)};$$

$$T_{\text{H2}} = \frac{2 \cdot c_{\text{X}}}{m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}} + \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}}}{2 \cdot n}}; \quad T_{\text{KM}} = \frac{v_{\text{KM}} \cdot \rho_{\text{П.Х}}}{2};$$

$$T'_{\text{KH1}} = \frac{m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}}{\left( \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}}{2 \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}} - m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}} \right)};$$

$$T'_{\text{KH2}} = \frac{2 \cdot c_{\text{W}}}{m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2 \cdot n}};$$

$$T''_{\text{KH1}} = \frac{m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}}{\left( \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}}{2 \cdot m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}} - m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \right)};$$

$$T''_{\text{KH2}} = \frac{2 \cdot c_{\text{X}}}{m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2 \cdot n}};$$

$$k_{\text{H1}} = \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}}}{\left( \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}}}{2} - \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}} \cdot m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}}}{2 \cdot m_{\text{S}} \cdot c_{\text{S}}} + m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}} \right)};$$

$$k_{\text{H2}} = \frac{m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}} - \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}}}{2}}{\left( \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}}}{2} - \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}} \cdot m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}}}{2 \cdot m_{\text{S}} \cdot c_{\text{S}}} + m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}} \right)};$$

$$k_{\text{H3}} = \frac{\frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}} \cdot T_4}{2 \cdot m_{\text{S}}}}{\left( \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}}}{2} - \frac{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}} \cdot m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}}}{2 \cdot m_{\text{S}} \cdot c_{\text{S}}} + m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}} \right)};$$

$$k_{\text{H4}} = \frac{2 \cdot (T_{\text{S}} - T_4) \cdot \frac{2 \cdot n \cdot m_{\text{S}} \cdot c_{\text{S}} + m_{\text{S}}}{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}}}}{m_{\text{X}} \cdot \left( \frac{2 \cdot m_{\text{S}} \cdot c_{\text{S}} + m_{\text{S}}}{k_{\text{H}} \cdot F_{\text{H}}} + 1 \right)^2};$$

$$k_{\text{KM}} = \frac{1}{2 \cdot c_{\text{П.Х}}};$$

$$k_{\text{KH1}} = \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{\left( \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}}{2 \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}} - m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}} \right)};$$

$$k'_{\text{KH2}} = \frac{m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2}}{\left( \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}}{2 \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}} - m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}} \right)};$$

$$k'_{\text{KH3}} = \frac{\frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot T_2}{2 \cdot m_{\text{W}}}}{\left( \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}}{2 \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}} - m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}} \right)};$$

$$k'_{\text{KH4}} = \frac{2 \cdot (T_{\text{W1}} - T_2) \cdot \frac{2 \cdot n \cdot m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}} + m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}}}{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}}{m_{\text{W}} \cdot \left( \frac{2 \cdot m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}} + m_{\text{П.Х}} \cdot c_{\text{П.Х}}}{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}} + 1 \right)^2};$$

$$k''_{\text{KH1}} = \frac{\frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}}{\left( \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}}{2 \cdot m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}} - m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \right)};$$

$$k''_{\text{KH2}} = \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}}{2 \cdot m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}}}{\left( \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}}{2 \cdot m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}} - m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \right)};$$

$$k''_{\text{KH3}} = \frac{\frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot T_{\text{W1}} \cdot c_{\text{W}}}{2 \cdot m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}}}{\left( \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}{2} + \frac{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}} \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}}{2 \cdot m_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}}} - m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \right)};$$

$$k''_{\text{KH4}} = \frac{2 \cdot (T_{\text{W1}} - T_2) \cdot \frac{2 \cdot n \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}}{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}}}{m_{\text{W}} \cdot \left( \frac{2 \cdot m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}}{k_{\text{KH}} \cdot F_{\text{KH}}} + 1 \right)^2};$$

При определении постоянных времени и коэффициентов передачи передаточных функций использовались параметры: массовый расход хладагента  $m_{\text{X}} = 0,06$  кг/с; температура кипения  $T_0 = 3^\circ\text{C}$ , конденсации  $T_{\text{K}} = 55^\circ\text{C}$ ; мощность компрессора  $N_3 = 3,5$  кВт; теплопроизводительность ПКТН  $Q_{\text{ТН}} = 15,7$  кВт.

В формулах для определения постоянных времени и коэффициентов передачи передаточных функций используются следующие условные обозначения:

$c$  — удельная теплоемкость;  
 $m$  — массовый расход;  
 $k$  — коэффициент теплопередачи;  
 $n$  — показатель степени (0,184);  
 $T$  — температура;  
 $F$  — активная площадь теплопередающей поверхности;  
 $q$  — удельная массовая холодопроизводительность;  
 $p$  — оператор Лапласа;  
 $v$  — удельный объем всасываемых паров рабочего тела;  
 $\rho$  — плотность паров рабочего тела.  
 Индексы условных обозначений параметров:  
 и — испаритель;  
 тн — тепловой насос;  
 км — компрессор;  
 кн — конденсатор;  
 з — запаздывание (задержка);  
 п.х — пары хладагента.  
 Передаточные функции  $W_{и1}(p) \dots W_{и4}(p)$ ;  $W_{км1}(p)$ ,  $W_{км2}(p)$ ;  $W'_{кн1}(p) \dots W'_{кн4}(p)$  и  $W''_{кн1}(p) \dots W''_{кн4}(p)$  получены для случая, когда поведение агрегатов ПКТН

как объектов автоматизации характеризуется промежуточным состоянием между инерционной системой и системой, состоящей из звеньев бесконечно высокого порядка (конденсатор и испаритель).

С использованием математической модели динамики ПКТН в рамках программы MATLAB–Simulink были проведены исследования переходных процессов изменения температуры воды нагрева высокотемпературного потребителя. На рис. 2 приведена полученная моделированием кривая разгона по температуре воды нагрева высокотемпературного потребителя на выходе ПКТН ( $T_{w2}$ ) при внесении возмущения по данной температуре на входе ПКТН ( $\Delta T_{w1}$ ).

Характер протекания переходного процесса адекватен известным кривым разгона, полученным для ПКТН [4–6, 8, 10, 12–14]. Однако разработанная математическая модель динамики учитывает транспортное запаздывание (временной интервал 0–10 с, рис. 3) и тем самым в большей мере отражает реальный характер изменения температуры воды нагрева высокотемпературного потребителя на выходе ПКТН и может использоваться при разработке

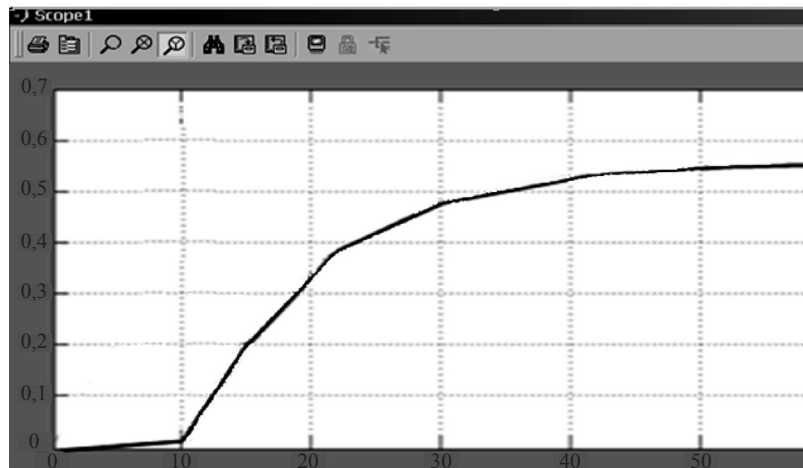


Рис. 2. Кривая разгона по температуре воды нагрева высокотемпературного потребителя на выходе ПКТН

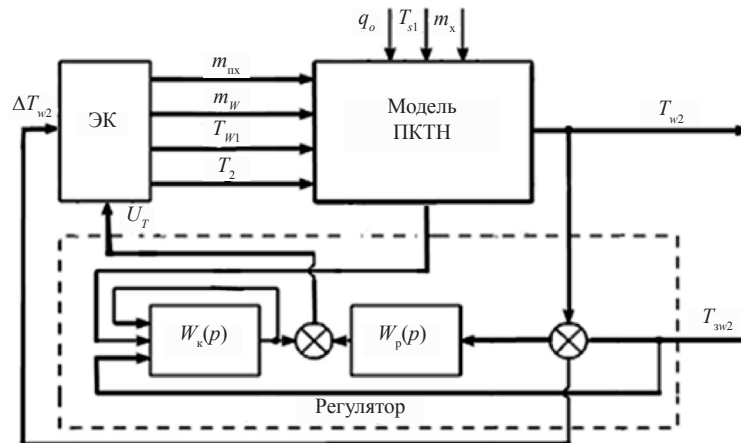


Рис. 3. Функциональная схема системы автоматического регулирования ПКТН

и эксплуатации устройств, обеспечивающих более качественный автоматический режим работы САУ ПКТН.

В соответствии с обобщенной математической моделью (1) разработана функциональная схема САУ (см. рис. 3) для поддержания требуемого значения температуры воды нагрева высокотемпературного потребителя на выходе ПКТН ( $T_{w2}$ ).

Система автоматического регулирования включает в себя регулирующее звено — передаточную функцию  $W_p(p)$ , корректирующее звено регулирования — передаточную функцию  $W_k(p)$ , электронный коммутатор (ЭК). В зависимости от величины отклонения текущего значения температуры воды нагрева высокотемпературного потребителя на выходе ПКТН ( $t_{w2}$ ) от ее заданного значения ( $t_{zw2}$ ) в САУ формируется управляющее воздействие  $U_r$ , приложенное к ЭК. Величина отклонения текущего значения температуры воды нагрева высокотемпературного потребителя на выходе ПКТН от его заданного значения используется для выбора в ЭК необходимых управляющих каналов САУ. Тем самым обеспечивается изменение температуры паров хладагента  $T_2$  и их массового расхода  $m_{п.х}$ ; температуры воды нагрева высокотемпера-

турного потребителя  $T_{w1}$  и ее массового расхода  $m_w$ . Параметры регулирующего и корректирующего звеньев САУ определяются по параметрам обобщенной математической динамической модели ПКТН.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанная обобщенная математическая модель динамики парокomppressorного теплового насоса как объекта автоматизации соответствует дифференциальному уравнению четвертого порядка и представляет собой совокупность аperiodических звеньев, обладающих свойством транспортного запаздывания.

2. Результаты исследований математической модели динамики парокomppressorного теплового насоса не противоречат известным результатам исследований подобных объектов, но в связи с учетом транспортного запаздывания в конденсаторе и испарителе ПКТН в большей степени отражают реальный характер изменения управляемых параметров.

3. Полученная математическая модель динамики может быть использована при анализе и синтезе системы автоматического управления температурой воды нагрева высокотемпературного потребителя на выходе парокomppressorного теплового насоса.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Калнинь, И. М.** Тепловые насосы: вчера, сегодня, завтра [Текст] / И. М. Калнинь, И. К. Савицкий // Холодильная техника. — 2000. — № 10. — С. 2–6.
- [2] **Янговский, Е. И.** Парокomppressorные теплонасосные установки [Текст] / Е. И. Янговский, Ю. В. Пустовалов. — М. : Энергоатомиздат, 1982. — 465 с.
- [3] **Becker, H.** Process Integration and Opportunities for Heat Pumps in Industrial Processes [Text] / H. Becker, F. Maréchal, A. Vuillermoz // International Journal of Thermodynamics. — 2011. — Vol. 14 (nr 2). — P. 59–70.
- [4] **Beckey, T.** Modeling and Verification of a Vapor Compression Heat Pump [Text] / T. Beckey // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. — 1986. — Pt. 14. — P. 103–111.
- [5] **Bendapudi, S.** A review of literature on dynamic models of vapor compression equipment [Text] / S. Bendapudi, J. E. Braun // ASHRAE Report. — 2002. — Nr 4036-5.
- [6] **Bin, L.** A full dynamic model of a HVAC vapor compression cycle interacting with a dynamic environment [Text] / L. Bin, A. G. Alleyne // American Control Conference. — USA, 2009. — P. 3662–3668.
- [7] **Browne, M. W.** Cha Henges in modehng vaporcompression liquid chillers [Text] / M. W. Browne, P. K. Bansal // ASHRAE Transactions. — 1998. — Vol. 104, pt. A., nr 41. — P. 474–486.
- [8] **James, K. A.** A critical survey of dynamic mathematical models of reffigeration systems and heat pumps and their components [Text] / K. James, R. James, A. Dunn // Institute Of Environmental Engineering, Technical Memorandum. — 1986. — Nr 97. — P. 474 — 486.
- [9] **Krakow, K.** A numerical model of heat pumps having various means of reffigerant flow control and capacity control [Text] / K. Krakow, S. Lin // ASHRAE Transactions. — 1987. — Vol. 93.— P. 491–510.
- [10] **Leducq, D.** Low order dynamic model of a vapor compression cycle for process control design [Text] / D. Leducq, J. Guilpart, G. Trystam // Journal of Food Process Engineerin. — 2003. — Nr 26. — P. 67–91.
- [11] **Njacartierjr, J. W.** Analytical representation of the transient energy interactions in vapor compression heat pumps [Text] / J. W. Njacartierjr // ASHRAE Transactions. — 1984. — Vol. 90, pt. 1B, nr AT-84-19. — P. 982–996.
- [12] **Tilli, A.** Dynamical modelling of single-phase and two-phase states in thermodynamic cycles [Text] / A. Tilli, R. Diversi // Preprints of the 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems. — Bologna, Italy, 2010. — P. 45–456.

- [13] **Ward Macarthur J.** Theoretical analysis of the dynamic interactions of vapor compression heat pumps [Text] / J. Ward Macarthur // *Energy Conversion and Management*. — 1984. — Nr 24 (1). — P. 49–66.
- [14] **Yang, Zhao.** Modeling and dynamic control simulation of unitary gas engine heat pump [Text] / Zhao Yang // *Energy Conversion and Management*. — 2007. — 48 (12). — P. 3146–3153.

---

© В. В. Вичужанін

Надійшла до редколегії 02.02.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. *Н. І. Радченко*

Статтю розміщено у Віснику НУК №2, 2012