

ВЫБОР КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ КАМЕРОЙ

Г.М. Айрапетьянц, Е.Л. Волынская, С.В. Подолян

Рассмотрены вопросы выбора каналов управления температурой в холодильной камере на основе построения и исследования динамических моделей. В ходе проведенного анализа выявлены основные каналы внесения возмущающих воздействий и получены передаточные функции, позволяющие выбрать каналы управления и определить законы регулирования температуры, а также найти оптимальные параметры настройки автоматических регуляторов для различных режимов работы холодильных установок, что приведет к уменьшению необходимой холодопроизводительности.

Введение

В агропромышленном комплексе, пищевой и химической промышленности широкое применение получили холодильные установки, где необходимо регулировать температуру протекания процесса. Однако при регулировании температуры встречаются серьезные трудности, обусловленные широким диапазоном ее изменения, неравномерностью распределения температуры по площади или объему аппарата, большие тепловые нагрузки при форсировании тепловых процессов и, как следствие, не эффективное использование хладоносителей. Корректировка параметров осуществляется технологическим персоналом методом проб и ошибок [1–3].

Зная физический закон, положенный в основу работы данного объекта регулирования и его конструкцию, в большинстве случаев можно дать его математическое описание, необходимое при исследовании и выборе системы регулирования, обеспечивающих поддержание технологических параметров в оптимальных режимах [4,5].

Целью данной работы является выбор каналов управления холодильной камерой на основе линеаризации ее динамической модели. Для этого холодильная камера проанализирована как многомерный объект автоматического регулирования, выполнена линеаризация ее динамической модели и получены передаточные функции, которые позволяют исследовать каналы управления. Предложенная модель может быть использована для синтеза комбинированных систем регулирования температуры в холодильной камере в зависимости от загрузки холодильной камеры и температуры окружающей среды, а также для определения оптимальных настроек автоматических регуляторов [6–8].

Результаты исследований и их обсуждение

Холодильная камера относится к той категории регулируемых объектов, в которых энергетический процесс осуществляется в виде теплообмена. Поэтому регулируемый объект представляет собой объем, к которому подводится теплота и из которого теплота отводится [9,10].

Задачей системы автоматического регулирования холодильной камерой является поддержание в заданных пределах температуры T_k внутренней полости камеры. Подвод теплоты в холодильную камеру осуществляется, во - первых, за счет разности температуры окружающей среды $T_в$ и температуры внутри камеры T_k (за счет переноса теплоты через стенку); и, во - вторых, за счет загрузки холодильной камеры материалами, температура которых отлична от T_k .

Как известно, количество теплоты, проходящей через стенку в единицу времени, определяется зависимостью вида

$$Q_n = k_c \times F_c \times (T_в - T_k), \quad (1)$$

где k_c – коэффициент теплопередачи через стенку;

F_c – площадь теплопередающей поверхности стенки.

Количество тепла, вносимого в камеру во время загрузки, находится из соотношения

$$Q_{nn} = G_n \times c_n \times (T_n - T_k), \quad (2)$$

где G_n – весовой секундный расход вносимых материалов;

c_n – теплоемкость материалов;

T_n – температура материалов до загрузки.

Количество теплоты, вносимое в камеру во время загрузки, можно представить в виде функции $Q_{nn}(t)$.

Так как в состоянии равновесия объекта $Q_{nn}(t) = 0$, то

$$Q_{nn}(t) = \Delta Q_{nn}(t).$$

Отвод тепла Q_b из камеры осуществляется с помощью холодильного агента, циркулирующего в холодильной батарее, благодаря разности температур камеры T_x и холодильного агента T_k , причем

$$Q_b = k_b \times F_b \times (T_k - T_x), \quad (3)$$

где k_b – коэффициент теплопередачи через поверхность холодильной батареи;

F_b – площадь теплопередачи холодильной батареи.

Уравнение статики данного регулируемого объекта имеет вид

$$Q_n = Q_b. \quad (4)$$

При нарушении равновесного состояния обе части равенства (4) получают приращения, в общем случае не равные между собой. Нарушения равновесного состояния сопровождаются изменением регулируемого параметра – температуры камеры T_k . Возникающая при этом разность количеств подводимого и отводимого тепла определяет собой количество тепла, аккумулируемого в данной камере.

Тогда, с учетом дополнительного теплопритока $Q_{nn}(t)$, уравнение холодильной камеры получит вид

$$c_k \times dT_k / dt = Q_n - Q_b + Q_{nn}(t) \quad (5)$$

или

$$c_k \times dT_k / dt = \Delta Q_n - \Delta Q_b + \Delta Q_{nn}(t), \quad (6)$$

где c_k – теплоемкость камеры.

В соответствии с выражениями (1) и (3), можно записать функциональные зависимости

$$Q_n = Q_n(T_s; T_k)$$

и

$$Q_b = Q_b(T_k; T_x), \quad (7)$$

где T_k – выходная величина, а T_x , T_s , $\Delta Q_{nn}(t)$ – входные возмущения.

Зависимости (7) позволяют найти выражения линеаризованных приращений:

$$\Delta Q_n = \partial Q_n \times \Delta T_s / \partial T_s + \partial Q_n \times \Delta T_k / \partial T_k$$

и

$$\Delta Q_b = \partial Q_b \times \Delta T_k / \partial T_k + \partial Q_b \times \Delta T_x / \partial T_x. \quad (8)$$

Так как

$$T_k = T_{k0} + \Delta T_k,$$

то подставка выражений (8) в уравнение (6) приводит его к виду

$$c_k \times dT_k / dt + (\partial Q_b / \partial T_k - \partial Q_n / \partial T_k) \times \Delta T_k = \partial Q_n \times \Delta T_e / \partial T_e - \partial Q_b \times \Delta T_x / \partial T_x - \Delta Q_{nn}(t).$$

В случае однофазного хладоносителя (холодная вода, рассол и другие) температура холодильного агента T_x определяется его количеством G_x , проходящим в единицу времени через охлаждающее устройство холодильной камеры. Следовательно

$$T_x = T_k(G_x), \quad (9)$$

а

$$\Delta T_x = dT_x \times \Delta G_x / dG_x. \quad (10)$$

Величина секундного расхода холодильного агента определяется положением регулирующего органа x , поэтому

$$G_x = G_x(x), \quad (11)$$

и тогда

$$\Delta G_x = dG_x \times \Delta x / dx. \quad (12)$$

С учетом сделанных выводов уравнение холодильной камеры примет вид

$$c_k \times dT_k / dt + F_d \Delta T_k = \partial Q_n \times \Delta T_e / \partial T_e - \partial Q_b \times \Delta x / \partial x + \Delta Q_{nn}(t), \\ F_d = \partial Q_b / \partial T_k - \partial Q_n / \partial T_k, \quad (13)$$

где F_d – фактор устойчивости холодильной камеры.

Холодильная камера отличается от других регулируемых объектов тем, что фактор устойчивости ее всегда положительный.

Перейдем к относительным координатам и обозначим

$$\Delta T_k / T_{ko} = \varphi; \quad \Delta T_e / T_{eo} = \xi; \quad \Delta x / x_o = \lambda; \quad \Delta Q_{nn}(t) / Q_{nn} = \alpha_o$$

и после деления всех членов уравнения на $F_d T_{ko}$, уравнение холодильной камеры записывается в форме

$$\tau_a d\varphi / dt + \varphi = k_{01} \times \xi + k_{02} \times \lambda + k_n \times \alpha_o; \quad (14)$$

здесь

$\tau_a = c_k / F_d \cdot c'$ – постоянная времени объекта, характеризующая его инерционность;

$$k_{01} = (\partial Q_n \times T_{eo} / \partial T_e) / F_d \times T_{ko}; \\ k_{02} = -(\partial Q_b \times x_o / \partial x) / F_d \times T_{ko}; \\ k_n = Q_{nno} / F_d \times T_{ko}, \quad (15)$$

– безразмерные коэффициенты усиления, обеспечивающие характеристику связи выходной координаты с соответствующими возмущающими воздействиями.

Полученное дифференциальное уравнение холодильной камеры является линейным с постоянными коэффициентами (в случае постоянства c_k).

Подвергнув уравнение (14) преобразованию Лапласа и приняв, что начальные условия равны нулю (при времени $t=0$ все функции и их отклонения равны нулю), получим уравнения в операторной форме

$$d_o(p)\varphi = k_{01} \times \xi + k_{02} \times \lambda + k_n \times \alpha_o, \quad (16)$$

где собственный оператор объекта

$$d_o(p) = \tau_a \times p + 1.$$

Если предположить неизменность температуры окружающей среды ($\xi=0$), то уравнение (16) запишется в виде

$$d_0(p) \varphi = k_{02} \lambda + k_n \alpha_0.$$

Уравнение холодильной камеры можно представить также в форме

$$d_0(p) \varphi = \lambda + \theta_0 \times \alpha_0.$$

где собственный оператор

$$d_0(p) = \tau_0 \times p + k_0$$

и коэффициенты:

$\tau_0 = \tau_a / k_{02}$ – постоянная времени камеры, характеризующая его инерционность;

$k_0 = I / k_{02}$ – коэффициент самовыравнивания;

$\theta_0 = k_n / k_{02}$ – коэффициент эффективности настройки потребителя.

Принимая $\alpha_0 = \text{const}$, решим дифференциальное уравнение (14) с помощью преобразования Лапласа.

Из уравнения (16) и при заданных параметрах системы получим передаточную функцию объекта управления:

$$W_0(p) = \frac{\kappa_{02}}{\tau_a \times p + 1} = \frac{0,1}{1,43 \times p + 1}.$$

Для того, чтобы определить зависимость температуры от времени, необходимо провести обратное преобразование Лапласа передаточной функции $W_0(p)$. Графическое изображение обратного преобразования Лапласа от передаточной функции $W_0(p)$ представлено на рисунке 1. Данный график показывает нормированное значение выходной координаты (за 100 % достижения заданного выходного параметра берется единица). Из графика видно, что заданная температура не достигается без применения регулирующего устройства. Значение выходной координаты достигает 0,1. Это всего лишь 10 % от заданного значения температуры. Время переходного процесса (время установления выходной координаты равно 4,25 с). Так как исходная система является статической, то для устранения ошибки регулирования применим ПИ-регулятор, который за счет присутствия интегрирующей составляющей сводит статическую ошибку к нулю.

Передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_p(p) = \kappa_p + \frac{1}{\tau_u \times p} = \kappa_p + \frac{\kappa_u}{p},$$

где κ_p – коэффициент усиления регулятора;

τ_u – постоянная времени регулятора;

$\kappa_u = 1 / \tau_u$.

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_p(p) = W_0(p)W_p(p) = \frac{\kappa_{02}}{\tau_a \times p + 1} \left(\kappa_p + \frac{\kappa_u}{p} \right) = \frac{0,1}{1,49 + 1} \left(\kappa_p + \frac{\kappa_u}{p} \right).$$

Расчет параметров регулятора проводили исходя из максимальной степени устойчивости системы. В результате получили следующую передаточную функцию регулятора:

$$W_p(p) = 10 + \frac{0,7}{p}.$$

Таким образом, общая передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$W(p) = \frac{\rho + 0,7}{1,49 + \rho^2 + \rho}.$$

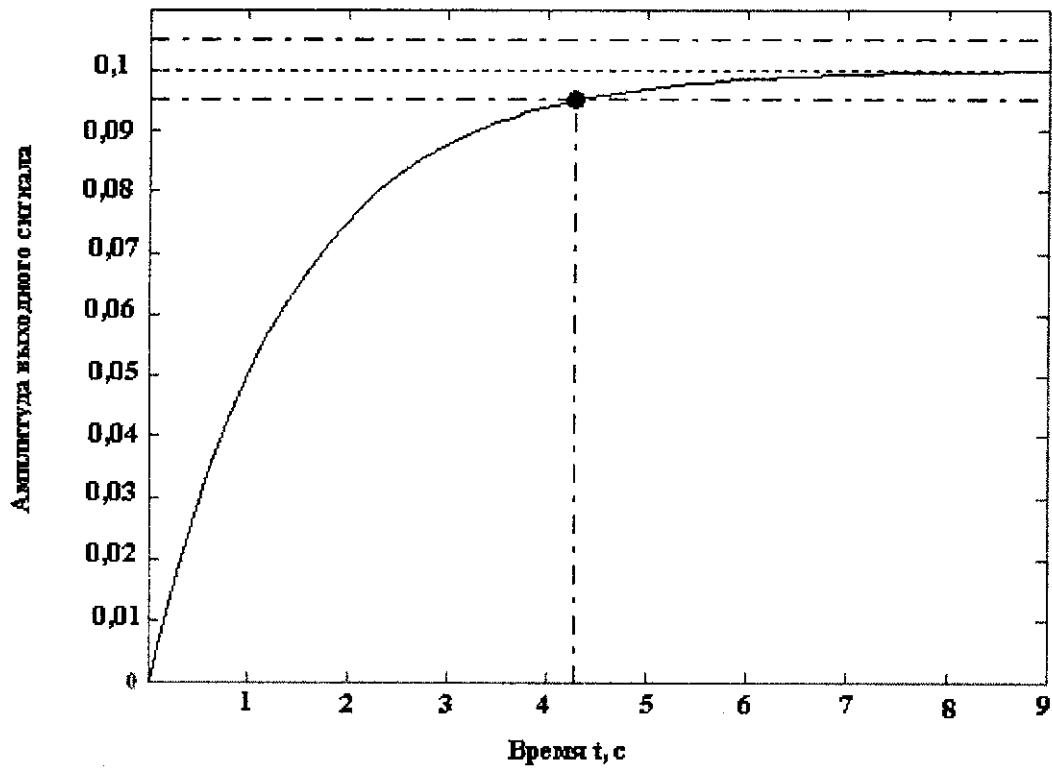


Рисунок 1 – График кривой разгона объекта управления

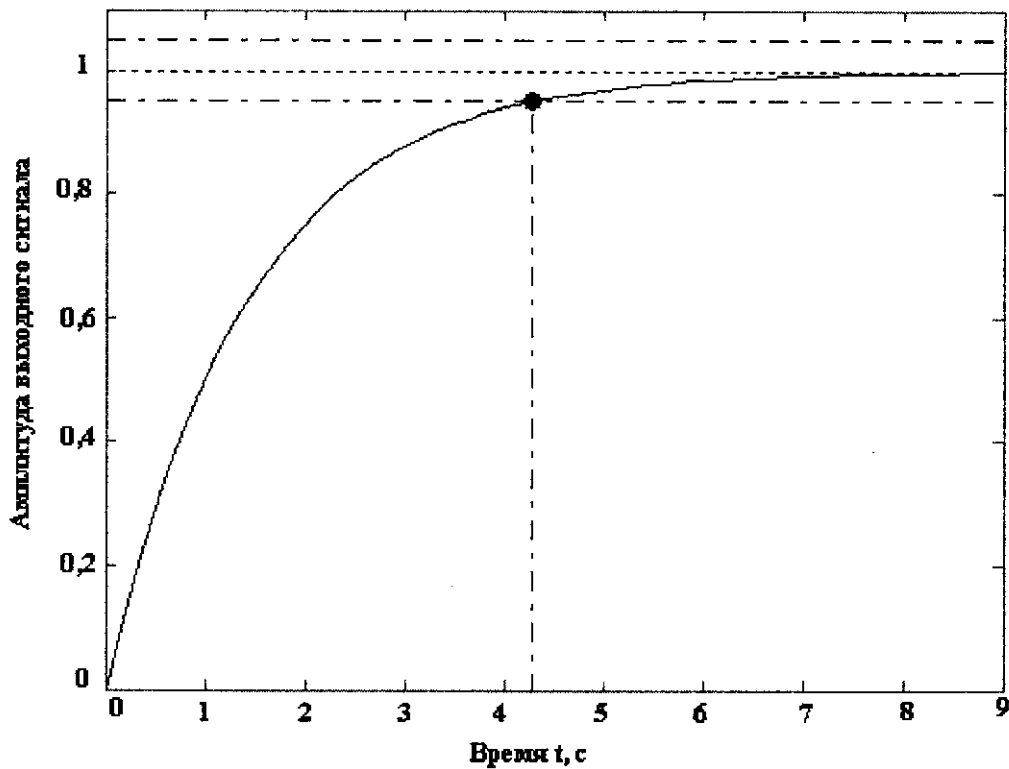


Рисунок 2 – График переходного процесса системы управления

Проведем обратное преобразование Лапласа передаточной функции разомкнутой системы

$W(p)$ и получим зависимость температуры в холодильной камере от времени. На рисунке 2 приведен график переходного процесса системы регулирования температуры. Из графика видно, что время переходного процесса не изменилось, а регулируемая величина достигает своего значения (выходная координата достигает значения 1).

Таким образом, применение ПИ-регулятора позволяет достичь заданной температуры в холодильной камере за достаточно малый промежуток времени, процесс регулирования является аperiodическим, отсутствует ошибка регулирования.

Заключение

Холодильная камера проанализирована как объект автоматического регулирования и получена ее линеаризованная математическая модель на основе передаточных функций. Предложенная модель позволила ввести корректирующие контуры регулирования. К таким каналам относятся: канал регулирования температуры в холодильной камере с коррекцией по величине загрузки, канал регулирования температуры внутри холодильной камеры с коррекцией по температуре окружающей среды. Математическая модель позволила определить оптимальные настройки регуляторов (в данном случае ПИ-регулятора), а также разработать программу управления в системе АСУТП, обеспечивающую высокое качество регулирования процесса и эффективность использования хладоносителей путем учета колебаний температуры в холодильной камере в зависимости от объема загрузки охлаждаемого материала и температуры окружающей среды.

Литература

- 1 Брусиловский, Л.П. Приборы технологического контроля в молочной промышленности / Л.П. Брусиловский, А.Я. Вайнберг. – М.: Агропромиздат. – 1990. – 288 с.
- 2 Данилова, Г.Н. Теплообменные аппараты холодильных установок/ Г.Н.Данилова, С.Н. Богданов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 208с.
- 3 Доссат, Р.Д. Основы холодильной техники./ Пер. с англ. М.Б. Розенберга, под ред. Л.Г. Каплана. – М.: Пищевая промышленность, 1984. – 520 с.
- 4 Теплофизические основы получения искусственного холода. Справочник/ Под ред. А.В. Быкова. – М.: Легкая и пищевая промышленность. 1982. – 224 с.
- 5 Айрапетьянц Г.М. Объекты регулирования / Г.М. Айрапетьянц, И.Д. Иванова. // Материалы V Международной научно-технической конференции «Техника и технология пищевых производств». – Могилев, 2005. – С. 85–89.
- 6 Крутов В.И./Основы теории автоматического регулирования / В.И. Крутов, И.П. Спорыш, В.Д., Юношев. – М.: Машиностроение. – 1990. – 359 с.
- 7 Соколов В.А. Автоматизация технологических процессов в пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1991. – 445 с.
- 8 Брусиловский, Л.П. Синтез структуры интегрированной автоматизированной системы управления / Л.П. Брусиловский, В.Д. Харитонов // Молочная промышленность. – 1996. – №3. – С. 4–7.
- 9 Система автоматического регулирования температуры нагрева: а.с. 1392157 СССР, МКИ2, D01N13/28 G05D23/19/ Г.М. Айрапетьянц, А.И. Васильев, Г.К. Ковалев, Г.А. Корсунский; Могилевский филиал научно-производственного объединения «Химавтоматика» – № 4049884; заявл. 17.03.86; опубл. 30.04.88 // Открытия, изобретения – 1988. – №16. – С 4.
- 10 Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высшая школа. 1991. – 400 с.

Поступила в редакцию 21.06.2011