

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОРЕКУПЕРАЦИОННЫМИ УСТАНОВКАМИ

Г.М. Айрапетьянц, Н.И. Ульянов

Рассмотрена задача выбора оптимальных каналов управления терморекуперационными установками на основе линеаризованных динамических моделей. Терморекуперационная установка рассмотрена как объект автоматического управления. В ходе проведенного анализа выделены каналы внесения возмущающих воздействий и получены передаточные функции, позволяющие определить законы регулирования температуры, влажности воздуха в производственном помещении, а также найти оптимальные параметры настройки автоматических регуляторов для различных режимов работы установок.

Введение

При производстве традиционной продукции все производители стремятся снизить себестоимость за счет энерго- и ресурсосберегающих процессов. Создание таких процессов невозможно без информационных и автоматических систем управления процессом, контроля качества сырья и конечной продукции. В связи с этим повысились требования к оснащению предприятий промышленности принципиально новыми средствами автоматизации.

Широкое использование для управления технологическим процессом микропроцессоров, встроенных микроконтроллеров, микроЭВМ становится одним из стратегических направлений развития и совершенствования средств автоматизации и систем управления, а также обеспечение их гибкости и надежности.

Для получения данных, необходимых для хозрасчетных операций и подсчета технико-экономических показателей, контролируют еще одну группу параметров, к которым относятся, например, количества потребляемой электроэнергии, тепло- и хладоносителей, сырья и материалов.

Рассмотрены основные принципы построения современных процессов автоматизации дозирования и смешения, т.к. именно эти этапы в процессе вторичного использования тепловой энергии и определяют экономически выгодность производства.

В процессе производства синтетических волокон, газетной бумаги, молочных продуктов образуется значительное количество влажного воздуха, содержащего тепло. Так, в зависимости от системы вентиляции сушильной части термофиксации и параметров циркулирующего воздуха температура его в зоне контакта с полотном может находиться в пределах от 45 °С до 90 °С, а при форсированных параметрах поликонденсации – в пределах 130 °С – 450 °С. Влагосодержание воздуха над поверхностью сушильных цилиндров изменяется в пределах от 40 до 140 г/кг для обычных способов сушки, и в пределах 180–350 г/кг – для форсированных. Удельная энтальпия влажного воздуха при температуре 80 °С составляет 373 Дж/кг. При производительности машины, например, для выработки штапельного волокна 685 т/сут необходимо отводить 137 000 кг/т влажного воздуха. Большое количество тепла отводится с камер термофиксации при производстве химических волокон, где температура сушки достигает 180 °С – 220 °С. С поверхностями поликонденсаторов и дополиконденсаторов, при сушке полимерной крошки, где температура отводящего воздуха достигает 300 °С [1, 2].

Отсюда видна необходимость использования такого большого количества тепла, которое выбрасывается в окружающую атмосферу.

Устройства утилизации (теплорекуперации) тепла объединяют в себе функции подготовки свежего воздуха на вентиляции сушильной части и машинного зала и использования отводимого тепла для подогрева воды, которая может быть направлена на технологические нужды [3, 4].

В отечественной практике теплорекуперационное оборудование по схеме, назначению и конструктивному исполнению делится на два типа: теплорекуперационные агрегаты (ТРА), используемые на машинах с закрытой сушильной частью, и вентиляционно-рекуперационные агрегаты (ВРА), устанавливаемые на машинах с колпаками открытого типа. Во втором утилизированное тепло используется только для подготовки воздуха, подаваемого в сушильную часть и на вентиляцию зала.

Наибольшая утилизация тепла достигается в ТРА, конструкция которых непрерывно совершенствовалась с целью повышения КПД, производительности и надежности.

Необходимо отметить, что основным недостатком существующих типовых линеаризованных динамических моделей является то, что они не учитывают возможность изменения расхода и температуры продукта на входе в производственные помещения, а также изменение влажности приготовленного воздуха из отработанного тепла. Это приводит к тому, что при колебаниях нагрузки основного технологического оборудования для поддержания необходимой температуры и влажности на заданном уровне необходимо, корректировать параметры настройки автоматических регуляторов температуры и влажности, а также зависимость температуры воды в сборнике теплой воды от уровня в сборнике. Корректировка параметров осуществляется технологическим персоналом методом «проб и ошибок». Такой подход приводит к повышенным тепловым нагрузкам при форсировании тепловых процессов и как следствие к неэффективному использованию теплоносителей [5–7].

В данной работе терморекуперационная установка рассмотрена как многомерный объект автоматического управления, предложены новые модификации линеаризованных динамических моделей этой установки, которые позволяют эффективно выбрать оптимальные каналы управления. В отличие от известных, предложенные модели позволяют учесть колебания влажности и температуры воздуха на входе в производственные помещения, а также изменение уровня в сборнике теплой воды. Эти модели позволяют решить задачу синтеза комбинированных систем регулирования температуры и влажности приготовленного воздуха подаваемого в цеха, а также вычислить оптимальные настройки автоматических регуляторов [8, 9]. Применение таких систем в практике регулирования позволит повысить эффективность вторичного использования теплоносителей [9, 10].

Таким образом, рассмотрев состояния современного этапа автоматизации и процесса теплорекуперации (использование отработанного нагретого воздуха для обогрева производственных помещений) в настоящее время, предлагается следующая цель работы – создание системы автоматического управления технологического процесса теплорекуперации на предприятиях.

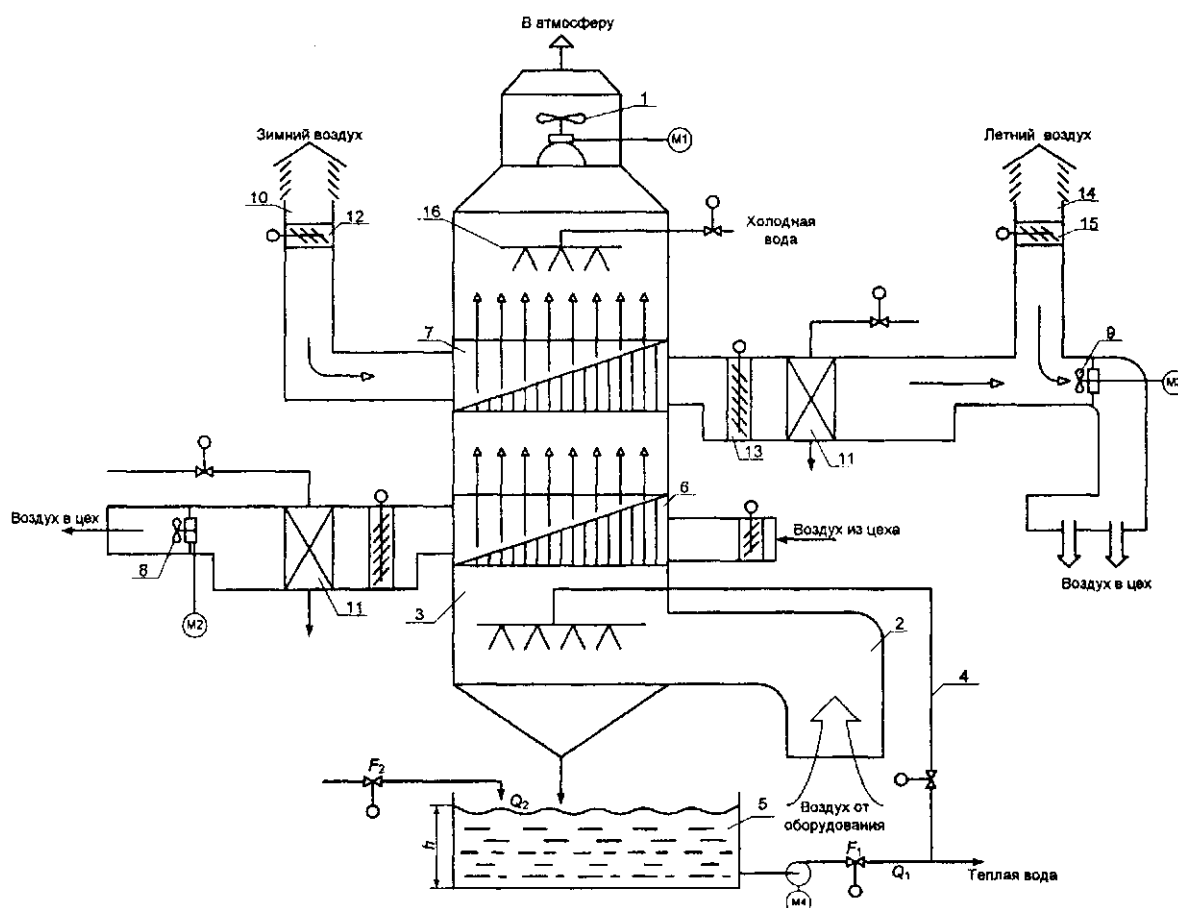
Для этого необходимо решить следующие задачи – разработать математическую модель процесса и определить, какие параметры технологического процесса необходимо контролировать или регулировать. Это позволит определить законы регулирования и управления.

Результаты исследований и их обсуждение

Технологическая схема ТРА показана на рисунке 1. Горячая паровоздушная смесь из-под колпака отсасывается вытяжным вентилятором 1 и по системе воздухопроводов 2 поступает в приемную камеру 3, где она орошается теплой водой, поступающей по линии рециркуляции 4 из сборника теплой воды 5. Орошение способствует очистки смеси от пыли. Далее паровоздушная смесь проходит последовательно два трубчатых теплообменника 6 и 7, первый из которых используется для нагревания воздуха, отсасываемого из цеха вентилятором 8, и подачи его в нижнюю часть колпака, а второй – для нагревания наружного воздуха, засасываемого вентилятором 9, и подаваемого на вентилятор цеха.

Тракт подготовки воздуха для цеховой вентиляции работает в двух режимах: зимнем и летнем. Зимой воздух из шахты 10 дополнительно нагревается в калориферах 11, теплоносителем для которых является греющий пар. Летом теплообменник 7 может не использоваться (воздушные заслонки 12 и 13 закрыты, калорифер 11 отключен от пара), а воздух засасывается из шахты 14 (заслонка 15 открыта). Скрубберные спрыски 16 подают холодную воду

навстречу потоку паровоздушной смеси. Вода, нагреваясь, проходит через трубчатые теплообменники 7 и 6 в нижнюю часть ТРА и далее – в сборник 5.



1 – вытяжной вентилятор, 2 – система воздухопроводов, 3 – приемная камера, 4 – линия рециркуляции, 5 – сборник теплой воды, 6 – трубчатый теплообменник воздуха из цеха, 7 – трубчатый теплообменник воздуха наружного, 8 – цеховой вентилятор, 9 – засасываемый вентилятор, 10 – зимняя шахта, 11 – калорифер, 12, 13, 15 – воздушная заслонка, 14 – шахта, 16 – скрубберные спрыски

Рисунок 1 – Технологическая схема теплорекуперационного агрегата

Выполним разработку математической модели. При решении задач идентификации объекта управления будем использовать аналитические методы – детальное изучение процесса, путем рассмотрения физико-химических закономерностей, превращений, протекающих в данном объекте. Таким образом, можно математически связать характеристики состояния технологического процесса (значения выходных переменных) с параметрами и характеристиками состояния его элементов, в зависимости от структуры технологических связей между элементами процесса [3].

На основе проведенного детального анализа процесса можно сделать выводы, что основным технологическим объектом автоматизации в данном процессе является теплообменный аппарат и емкость для сбора горячей воды. Основное требование, предъявляемое к процессу терморекуперации, заключается в приготовлении отопительного воздуха с определенной температурой и содержанием влаги, а также в получении горячей воды для нужд производства из отработанного теплоносителя.

Для приготовления обогревающего воздуха, с необходимыми показателями влажности воздуха на выходе из терморекуперационного агрегата, необходимо подавать в агрегат определенное количество воды при определенной температуре и поддержания определенной температуры после теплообменника, а также поддержания определенной температуры в сборнике горячей воды, которая зависит от уровня воды в этом сборнике.

Примем за выходную регулируемую величину высоту уровня h в сборнике горячей воды.

Управляющим воздействием будет изменение проходного сечения регулирующего клапана на сливном трубопроводе F_1 и возмущающее воздействие – количество жидкости Q_2 , поступающей в сборник или наоборот F_1 – возмущающее воздействие, а Q_2 управляющее воздействие. Выбор этих возмущений зависит от конкретных условий работы емкости [1, 2].

Рассмотрим статический режим работы сборника, т.е. зависимость $h=f(F_1)$ и $h=f(Q_2)$ в установившемся режиме. Этот режим характеризуется тем, что расход жидкости равен притоку, а уровень остается постоянным:

$$Q_1=Q_2, h=const,$$

где Q_1, Q_2 – расход жидкости, м³/с;
 h – высота уровня, м.

На основании законов гидродинамики зависимость между расходом жидкости Q_1 , высотой уровня h и проходным сечением F_1 определяется по уравнению Торричелли:

$$Q_1 = \mu F_1 \sqrt{2gh}, \quad (1)$$

где F_1 – проходное сечение вентиля трубопровода, м²;
 μ – коэффициент расхода (зависит от формы и конструкции проходного сечения);
 g – ускорение силы тяжести, м/с².

Зная численное значение величин, входящих в формулу (1), можно построить характеристику $h=f(F_1)$ при постоянном Q_2 . Эта характеристика называется статической характеристикой объекта по управляющему воздействию.

Статическая характеристика $h=f(Q_2)$ называется характеристикой по возмущающему воздействию, или нагрузочной характеристикой.

Нагрузочная характеристика определяется при постоянном F_1 . Так как в установившемся режиме $Q_1=Q_2$, то

$$Q_1=Q_2 = \mu F_1 \sqrt{2gh}. \quad (2)$$

Нагрузочную характеристику можно снять экспериментально. Для этого следует расходом мером замерять Q_2 и при равенстве $Q_1=Q_2$ с помощью уровнемера измерить высоту уровня h .

Для объектов регулирования большее значение имеет регулировочная характеристика, т.е. зависимость $F_1=f(Q_2)$ при $h=const$. Регулировочная характеристика показывает, как следует менять управляющее воздействие при изменении возмущающего воздействия, чтобы регулируемый параметр остался постоянным. Очень часто регулировочная характеристика является зеркальным отображением нагрузочной. Как видно из формулы (2), эта зависимость линейна. Регулировочную характеристику можно снять экспериментально. Для этого следует расходом мером замерять Q_2 и при постоянном h определить площадь проходного сечения F_1 .

Как видно из формул (1) и (2), функции $h=f(F_1)$ и $h=f(Q_2)$ нелинейны. Проведем линеаризацию и получим уравнение в отклонениях.

Для этого дадим приращение сечению вентиля ΔF_1 , тогда соответственно получат приращения уровень Δh и расход ΔQ_1 .

$$Q_1 + \Delta Q_1 = \mu (F_1 + \Delta F_1) \cdot \sqrt{2g(h + \Delta h)}.$$

После возведения в квадрат правой и левой частей получим формулу (3):

$$Q_1^2 + 2Q_1\Delta Q_1 + \Delta Q_1^2 = \mu^2 F_1^2 2gh + 4\mu^2 ghF_1\Delta F_1 + 2gh\mu^2 \Delta F_1^2 + 2\mu^2 F_1^2 g\Delta h + 4\mu^2 gF_1\Delta F_1\Delta h + 2g\mu^2 \Delta F_1^2 \Delta h. \quad (3)$$

Перенесем начало координат в точку установившегося состояния Q_1, h , для чего из уравнения (3) вычтем уравнение (1), возведенное в квадрат:

$$2Q_1\Delta Q_1 + \Delta Q_1^2 = 4\mu^2 ghF_1\Delta F_1 + 2\mu^2 F_1^2 g\Delta h + 2gh\mu^2 \Delta F_1^2 + 4\mu^2 gF_1\Delta F_1\Delta h + 2g\mu^2 \Delta F_1^2 \Delta h.$$

Члены ΔF_1^2 , ΔQ_1^2 , $\Delta F_1\Delta h$ и $\Delta F_1^2\Delta h$ являются членами высшего порядка малости и ими можно пренебречь (линеаризация). Тогда окончательно получим

$$Q_1\Delta Q_1 = 2\mu^2 ghF_1\Delta F_1 + \mu^2 F_1^2 g\Delta h. \quad (4)$$

Уравнение (4) есть линеаризованное уравнение (1) в отклонениях.

Рассмотрим теперь работу сборника в динамическом режиме. В этом случае интересуются проведением уровня h при изменении управляющего или возмущающего воздействия.

Запишем уравнение динамического режима:

$$Q_2 d\tau = Sdh + Q_1 d\tau, \quad (5)$$

где S – площадь резервуара, m^2 .

Уравнение (5) показывает, что количество жидкости $Q_2 d\tau$, поступившее за время $d\tau$, уравновешивается приращением объема жидкости в резервуаре Sdh и количеством жидкости $Q_1 d\tau$, которая вытекает из резервуара за то же время $d\tau$. Разделим правую и левую части уравнения (5) на $d\tau$ и дадим скачкообразное приращение расходу Q_2 равное ΔQ_2 . Совершенно очевидно, что приращение получают и уровень Δh , и расход жидкости из резервуара ΔQ_1 .

$$Q_2 + \Delta Q_2 = S \frac{d(h + \Delta h)}{dt} + Q_1 + \Delta Q_1. \quad (6)$$

Для улучшения уравнения только в отклонениях вычтем из уравнения (6) уравнение установившегося состояния

$$Q_2 = Q_1.$$

После чего получим

$$\Delta Q_2 = S \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta Q_1. \quad (7)$$

Производная $\frac{dh}{dt} = 0$, так как h – величина постоянная. Подставим в уравнение (7) значение ΔQ_1 , из уравнения (4)

$$\Delta Q_2 = S \frac{d\Delta h}{dt} + \frac{2\mu^2 ghF_1}{Q_1} \Delta F_1 + \frac{\mu^2 gF_1^2}{Q_1} \Delta h.$$

Разделим правую и левую часть на коэффициент при Δh

$$\frac{Q_1 S}{\mu^2 F_1^2 g} \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = \frac{Q_1}{\mu^2 g F_1^2} \Delta Q_2 + \frac{2h}{F_1} \Delta F_1. \quad (8)$$

Рассмотрим коэффициенты уравнения (8). Коэффициент при ΔQ_2 называется коэффициентом передачи по возмущающему воздействию, с/м²:

$$\frac{Q_1}{\mu^2 g F_1^2} = K_B.$$

Коэффициент K_B определяется аналитически или по статической характеристике как отношение приращения Δh к ΔQ_2 :

$$\frac{\Delta h}{\Delta Q_2} = K_B.$$

Коэффициент при ΔF_1 называется коэффициентом передачи по управляющему воздействию, 1/м:

$$\frac{2h}{F_1} = K_y.$$

Коэффициент K_y также определяется аналитически или по статической характеристике как отношение приращения Δh к ΔF_1 :

$$\frac{\Delta h}{\Delta F_1} = K_y.$$

Существенно отметить, что коэффициенты K_B и K_y зависят от выбора рабочей точки, т.е. точки установившегося состояния при нелинейных статических характеристиках. Поэтому если объект работает в широком диапазоне изменения уровня, то следует определить коэффициенты передачи. Коэффициент передачи оказывает существенную роль на устойчивость системы и её точность.

Коэффициент при производной $\frac{d\Delta h}{dt}$ называется постоянной времени, с:

$$\frac{Q_1 S}{\mu^2 F_1^2 g} = T.$$

Выясним физическую сущность постоянной времени. Умножим и разделим коэффициент при производной на $2h$:

$$\frac{S 2h Q_1}{\mu^2 F_1^2 g 2h} = \frac{S Q_1 2h}{Q_1^2} = \frac{2V}{Q_1}.$$

Постоянная времени является отношением количества вещества (энергии), запасенного в объекте, к расходу (рассеянию) вещества (мощности) из объекта, т.е. характеризует способность последнего накапливать и рассеивать вещество или мощность. Это определение вытекает из уравнения Лагранжа.

Таким образом, любой объект, который может запастись энергией и рассеивать мощность, должен обладать постоянной времени. Этим правилом можно пользоваться для проверки составления уравнения и размерности их коэффициентов.

Постоянную времени можно представить в несколько ином виде:

$$\frac{Q_1 S}{\mu^2 F_1^2 g} = K_B S,$$

т.е. как произведение площади резервуара на коэффициент передачи по возмущающему воздействию. Так как коэффициент K_B зависит от выбора рабочей точки, то и постоянная времени T также будет зависеть от выбора рабочей точки.

Учитывая введенные обозначения, получим окончательно уравнение объекта в таком виде, в каком оно записывается в теории регулирования:

$$T \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K_B \Delta Q_2 - K_y \Delta F_1. \quad (9)$$

Подвергнув уравнение преобразованию Лапласа и приняв, что начальные условия равны нулю, получим

$$(T\psi + 1)\Delta h(\psi) = K_B \Delta Q_2(\psi) - K_y \Delta F_1(\psi), \quad (10)$$

где $\Delta h(\psi)$, $\Delta Q_2(\psi)$, $\Delta F_1(\psi)$ – изображения входных и выходных величин.

Отношения изображения выходной величины к изображению входной при нулевых начальных условиях называются передаточной функцией объекта регулирования.

Данный объект имеет две передаточные функции – по управляющему и по возмущающему воздействиям:

$$W_y(\psi) = -\frac{\Delta h(\psi)}{\Delta F_1(\psi)} = -\frac{K_y}{T\psi + 1}, \quad (11)$$

$$W_B(\psi) = -\frac{\Delta h(\psi)}{\Delta Q_2(\psi)} = -\frac{K_B}{T\psi + 1}. \quad (12)$$

Передаточные функции широко используются для анализа и синтеза систем автоматического регулирования.

Уравнение (9) имеет два решения, которые соответствуют двум скачкообразным воздействиям: управляющему при $Q_2 = const$ и возмущающему при $F_1 = const$:

$$\Delta h(\tau) = (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}) K_B \Delta Q_2,$$

$$\Delta h(\tau) = -(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}) K_y \Delta F_1.$$

Автоматическое управление влажностью. Основными параметрами приготовляемого обогревающего воздуха из отработанного теплоносителя является температура и влажность. Для поддержания оптимальных параметров приготовления обогревающего воздуха предлагается создать автоматическую систему регулирования влажностью приготовляемого воздуха с коррекцией по температуре этого же воздуха или наоборот.

Структурная схема двухконтурной автоматической системы регулирования влажностью по изменению параметра «температура» показана на рисунке 2.

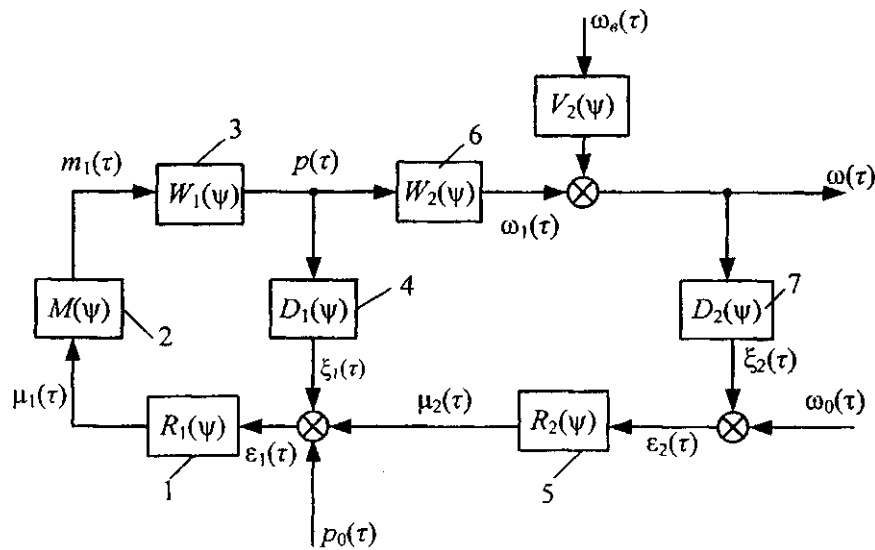


Рисунок 2 – Структурная схема двухконтурной автоматической системы регулирования влажностью

Внутренний контур образован регулятором температуры 1, регулирующим клапаном 2, участком 3 регулирующего клапана с передаточной функцией $W_1(\psi)$, датчиком температуры в производственном помещении 4. Наружный контур образован регулятором влажности 5, участком регулирующего клапана 6 с передаточной функцией $W_2(\psi)$, измерителем влажности 7. Система находится под действием случайных возмущений $\omega_\varepsilon(\tau)$, воздействующих на конечную влажность через звено с передаточной функцией $V_2(\psi)$. Система поддерживает заданное значение влажности $\omega_0(\tau)$ путем изменения задания регулятору температуры, на компараторе которого формируется сигнал $\varepsilon_1(\tau) = p_0(\tau) - \xi_1(\tau) - \mu_2(\tau)$, обрабатываемый регулятором температуры. Схема показана для аналогового варианта аппаратного оформления, хотя и при дискретном управлении она сохраняет в целом ту же внутреннюю структуру.

В линейном плане динамика регулируемого параметра описывается следующим операторным уравнением:

$$\omega(\psi) = \omega_\varepsilon(\tau)A_1(\psi)/A(\psi) - \omega_0(\tau)A_2(\psi)/A(\psi) + p_0(\tau)A_3(\psi)/A(\psi), \quad (13)$$

где $A(\psi) = 1 + D_1(\psi)R_1(\psi)M(\psi)W_1(\psi) - D_2(\psi)R_1(\psi)R_2(\psi)M(\psi)W_1(\psi)W_2(\psi)$; $A_1(\psi) = V_2(\psi)[1 + D_1(\psi)R_1(\psi)M(\psi)W_1(\psi)]$; $A_2(\psi) = R_1(\psi)R_2(\psi)M(\psi)W_1(\psi)W_2(\psi)$; $A_3(\psi) = R_1(\psi)M(\psi)W_1(\psi)W_2(\psi)$; $D_1(\psi) = \xi_1(\tau)/p(\tau)$; $D_2(\psi) = \xi_2(\tau)/\omega(\tau)$; $M(\psi) = m_1(\tau)/\mu_1(\tau)$; $R_1(\psi)$, $R_2(\psi)$ – передаточные функции регуляторов температуры и влажности.

Анализ уравнения (13) позволяет ответить на ряд практических вопросов по организации системы автоматического управления.

Первый вопрос заключается в том, каким условиям должен удовлетворять внутренний контур регулирования температуры. Поскольку этот контур является следящим, то он должен иметь астатизм по каналу внешнего задания, не быть колебательным и обладать максимальным быстродействием. Астатизм обеспечивает И- или ПИ-регулятор температуры. Последний является более предпочтительным по условиям устойчивости.

Динамика канала «изменение задания ($p_0(\tau)$) – изменение температуры ($p(\tau)$)» описывается передаточной функцией вида

$$Z(\psi) = p(\tau)/p_0(\tau) = R_1(\psi)M(\psi)W_1(\psi)/[1 + D_1(\psi)R_1(\psi)M(\psi)W_1(\psi)]. \quad (14)$$

Для ПИ-регулятора

$$R_1(\psi) = \mu_1(\tau) / \varepsilon_1(\tau) = \alpha_1 + \alpha_2 / \psi,$$

где α_1, α_2 – коэффициенты усиления в П- и И- части.

Заключение

Анализ терморекуперационной установки как объекта управления на основе предложенной линеаризованной динамической модели позволяет выбрать следующие оптимальные каналы управления установкой для повышения эффективности использования теплоносителей: повышение качества регулирования температуры в сборнике горячей воды по основному каналу «температура горячей воды в сборнике – уровень горячей воды в сборнике» может быть достигнуто путем введения дополнительных корректирующих контуров по каналам «расход воды на орошение – температура» и «расход отбираемой горячей воды на нужды – уровень в сборнике горячей воды»; повышение качества регулирования температуры обогревающего воздуха по основному каналу «влажность греющего воздуха – температура» может быть достигнуто путем введения дополнительных корректирующих контуров по каналам «расход количества отработанного теплоносителя – температура» и «расход воды на орошение – температура воздуха после калорифера»; предложенные модели применимы для синтеза систем управления терморекуперационными установками химических и пищевых производств.

Литература

- 1 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.
- 2 Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
- 3 Соколов, В.А. Автоматизация технологических процессов в пищевой промышленности / В.А. Соколов. – М.: Агропромиздат, 1991. – 445 с.
- 4 Брусиловский, Л.П. Синтез структуры интегрированной автоматизированной системы управления / Л.П. Брусиловский, В.Д. Харитонов // Молочная промышленность. – 1996. – №3. – С. 4–7.
- 5 Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
- 6 Система автоматического регулирования температуры нагрева: а.с. 1392157 СССР, МКИ2, D01H13/28 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.
- 7 Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: монография/ А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973.–752 с.
- 8 Закгейм, А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. Математическое описание процессов: учебное пособие / А.Ю. Закгейм. – М.: Химия, 1973. – 223 с.
- 9 Советов, Б.Я. Моделирование систем: учебник для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001.– 344 с.
- 10 Попов, Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / Е.П. Попов. – М.: Наука, 1989. – 304 с.

Поступила в редакцию 08.05.2012