

СИСТЕМА ВЗАИМОСВЯЗАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОХЛАЖДЕНИЯ ОТЛИВКИ

Новрузова Р.Г. (АзТУ, Баку, Азербайджанская Республика)

Consider the control system of cooling process of different-walled cast by means to regulate the water transmission to cooled form cavity. The problem is solving with deduction of the equation system of the stabilization and the synthesis of regulator water expenditure.

Введение. Наиболее сложная и существенная часть комплексного регулирования процессов в литейной форме – регулирование процесса охлаждения фасонной отливки. Большинство свойств отливки определяются процессам затвердевания, известные математические модели описывают достаточно адекватно реальным условием, что позволяет решать этой задачи. Оптимальные рекомендации в работах [1-3] получены на основе расчета температурного поля отливки и направлены на устранение тех дефектов, при возникновении которых теплообмен играет определяющую роль (обусловленные термическими напряжениями трещины, искажения формы и др.). Управление реальным процессом формирования отливки связано с трудностями. Поэтому реализовать полученные рекомендации нелегко и если рассматривать расчеты и последующую экспериментальную проверку как единый исследовательский процесс. Проведенные исследования отливок прокатных разностенных валков из чугуна показали, что после окончания кристаллизации жидкого металла в процессе охлаждения, перепад температур между массивными ($\varnothing 400 \times 300$ мм) и тонкими ($\varnothing 250 \times 150$ мм) частями увеличивается до $350\text{--}430^\circ\text{C}$ [4]. Практическое использование метода регулируемого охлаждения отливок как средства сокращения технологического цикла и снижения остаточных термических напряжений в отливке потребовало разработки системы стабилизации расхода охлаждающей воды.

Цель работы – разработка системы для дифференцированного охлаждения отливки местными изменения интенсивности охлаждения элементов отливки соответствующими частями водоохлаждаемой формы.

Задача исследования – система стабилизации расхода воды у входа в охлаждающую полость формы и вывод ее уравнения.

Принципиальная схема системы управления процессом охлаждения отливки. В принципе управление процессом охлаждения отливки осуществляется в двух уровнях, где на верхнем уровне проводится управление процессом охлаждения с помощью охлаждающей воды – u и определяется оптимальный расход воды как функции времени: $u(t)$, $t = 0, T$. Для линейной системы, какой является $u(t)$ представляет собой кусочно-постоянную функцию. Найденная функция $u(t)$ определяется как задание на регулятор расхода воды. Сказанное определяет двухуровневую структуру системы управления процессом охлаждения, которая представлена на рис. 1.

На рис. 1 блоки 1-7 и объект входят в структуру системы управления верхнего, а блоки 6–11 и участок трубы между 6 и 11-м элементами (объект регулирования) входят в структуры нижнего уровня, как видно элементы 6, 7 одновременно входят в обе структуры. Система управление представленной структуры функционирует следующим образом. Значения температур $\theta_{зап}$, θ_1 , θ_2 и расхода u , измеряемые соответствующими датчиками с определенной дискретностью через каналы связи поступают на вход интерфейса, где нормируются, кодируются и вводятся в КУУ. На основе информации, накопленной в буфере компьютера с применением соответствующей программы, решается задача параметрической идентификации модели объекта заданной структуры.

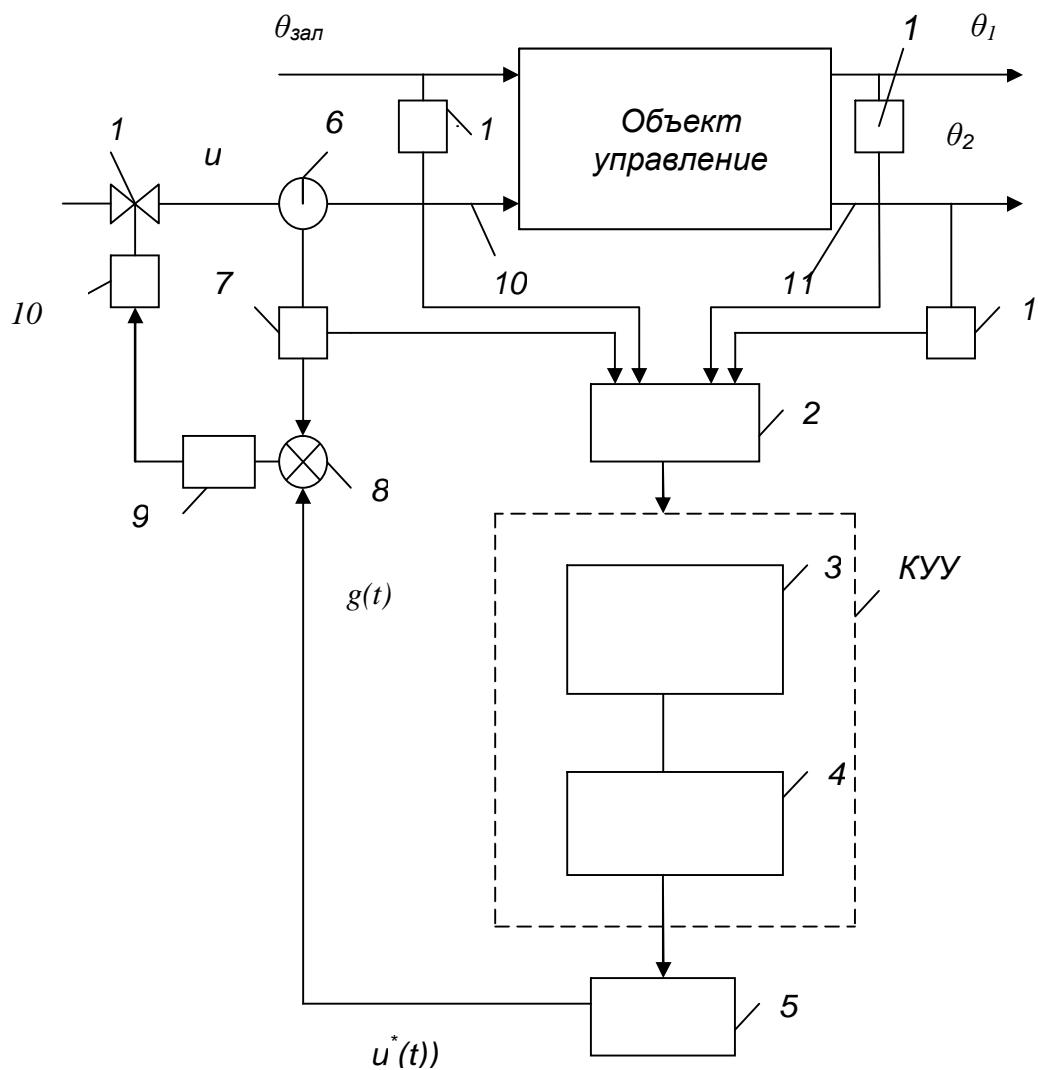


Рис. 1. Двухуровневая структура системы управления охлаждения отливки в форме: 1—датчики (термопары) для измерения температуры заливки— $\theta_{зал}$, толстой— θ_1 и тонкой— θ_2 частей отливки; 2,5—входные и выходные интерфейсы; 3—программный блок идентификации объекта; 4—программный блок решения задачи оптимального управления; 6—сужающее устройство в водяной трубе; 7—датчик измерения перепада давления; 8—сравнивающее устройство; 9—регулятор расхода воды; 10—исполнительный механизм; u^* —оптимальное значение расхода воды; 11—клапан; $g(t)$ —задающее воздействие и $g(t) = u^*(t)$; u —расход охлаждающей воды

Структура модели динамики охлаждения температуры для толстой и тонкой частей отливки имеет обыкновенного линейного дифференциального уравнения второго порядка. А программа идентификации является компьютерной реализацией алгоритмы идентификации методом регрессионного анализа [7]. На основе полученной модели формируется задача оптимального управления и применением соответствующей программы решается эта задача. Данная программа является компьютерной реализации

алгоритма оптимального управления, основанного на принципе максимума. В результате решения задачи оптимального управления:

$$u^*(t) = \rho(\theta_1(t)) \quad (1)$$

С помощью этого закона устанавливается обратная связь. Для этого по текущим измерениям θ_1 из (1) определяется соответствующее значение $u^*(t)$, которое через интерфейс и канала связи поступает на вход сравнивающего устройства регулятора расхода охлаждающей воды для реализации. Реализация u^0 продолжается до момента нарушения его постоянства, где на основе измеренного значения θ_1 из выражения (1) определяется новое значение u^* и т.д.

При определении градиента температуры θ_1 и θ_2 используются кореляционная связь между этими параметрами.

Выяснилось [5], что оптимальная траектория охлаждения и, следовательно, оптимальное управление зависит от температуры заливки $\theta_{зал}$ и расхода воды— i . Учитывая сказанное, также представляется целесообразным построение зависимости времени охлаждения отливки до требуемой температуры, т.е. период отливки T от $\theta_{зал}$ и i . Ввиду того что, зависимость T от $\theta_{зал}$ параметрический, а от i зависит функционально. Построить указанную зависимость представляется достаточно сложной задачей. Поэтому строится зависимость T от $\theta_{зал}$: $T=f(\theta_{зал})$ при параметризованном $i(t)$ т.е. в виде:

$$T=f(\theta_{зал}, i_j), \quad (2)$$

где i_j —параметризование значение i , т.е. известное постоянное значение i за период. В качестве i_j может быть использовано интегральное значение расхода воды, соответствующее оптимальному значению функции управления $u^*(t)$ при заданном $\theta_{зал}$. Возмущающим воздействием в процессе охлаждения отливки является температура воды и внешней среды, которые контролируются.

Система стабилизации расхода воды у входа в охлаждающую полость формы и вывод ее уравнения. Система стабилизации расхода охлаждающей воды является динамической с достаточно высокочастотной составляющей, что определяется малоинерционностью объекта управления – участок трубопровода от места установления клапана до места установления сужающего устройства (СУ) включительно. Структурная схема такой системы стабилизации представлена на рис. 2. Расход воды x зависит от положения штока клапана и разности давлений до и после диафрагмы:

$$x = f(\eta\Delta p) = \alpha\sqrt{2gF(p_1 - p_2)} = \alpha\sqrt{2gF\Delta p}, \quad (3)$$

где f – оператор связи; α – коэффициент, определяемый из характеристик диафрагм; g – ускорение свободного падения; p_1, p_2 – давления до и после диафрагмы.

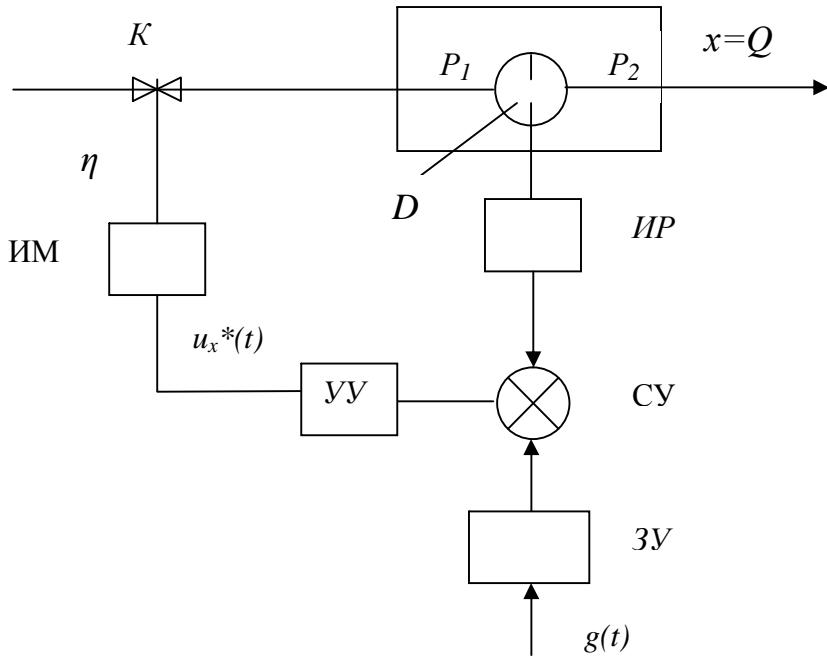


Рис. 2. Структурная схема регулятора расхода воды: K —клапан; O —объект; $СУ$ —сравнивающее устройство; $УУ$ —управляющее устройство; $ИМ$ —исполнительный механизм; $ЗУ$ —задающее устройство; $g(t)$ —задающее воздействие, определяемое системой управления верхнего уровня; D —сужающее устройство; p_1 —давление на выходе клапана, то же самое, что у входа диафрагмы; $ИР$ —измеритель расхода воды; x —выход объекта—расход воды у входа в охлаждающую полость формы; ε —разность задания $g(t)$ и x , $\varepsilon=g(t)-x$; u_x —локальное управляющее воздействие; η —положение штока клапана

Структурная схема измерения расхода охлаждающей воды согласно формуле (3) представлена на рис. 3.

Функционирование системы стабилизации функционирует следующим образом. По разности давления p_1-p_2 из выражения $Q = \alpha\sqrt{2g(p_1 - p_2)}$ в блоке $ИР$ вычисляется расход воды. Вычисленное значение расхода воды $-Q$ в блоке $СУ$ сравнивается его значением $-g(t)=u^*(t)$, определяемым как задания из решения задачи оптимального управления верхнего уровня и вычисляется разность $\varepsilon(t)=Q(t)-g(t)$. Значение $\varepsilon(t)$ поступает на вход $УУ$ и в соответствии закона регулирования вырабатывается управляющее воздействие $u_x(t)$, которое усиливается и подается на вход $ИМ$, который воздействует на клапан. В результате изменяется расход воды в направлении уменьшения ε .

Качество стабилизации расхода воды во многом зависит от выбора структуры регулятора [6] и эффективности синтеза его параметров. Решение такого вопроса в первую очередь требует построение динамической модели объекта стабилизации.

Вывод уравнения объекта стабилизации. В установившемся режиме, расход охлаждающей воды на входе $-Q'$ и выходе $-Q''$ объекта, т.е. перед и после диафрагмы равны:

$$Q' - Q'' = 0 \quad (3)$$

В этом выражении Q' зависит от положения клапана η : $Q' = f_1(\eta)$, а Q'' - от перепада давления: $\varepsilon = p_1 - p_2$ на диафрагме: $Q'' = f_2(\varepsilon_p)$ и эти зависимости нелинейные [8]. Значения η , ε соответствующие установившемуся состоянию обозначим через η_0 , ε_0 . Причем, что η_0 , ε_0 соответствует нормальному режиму объекта.

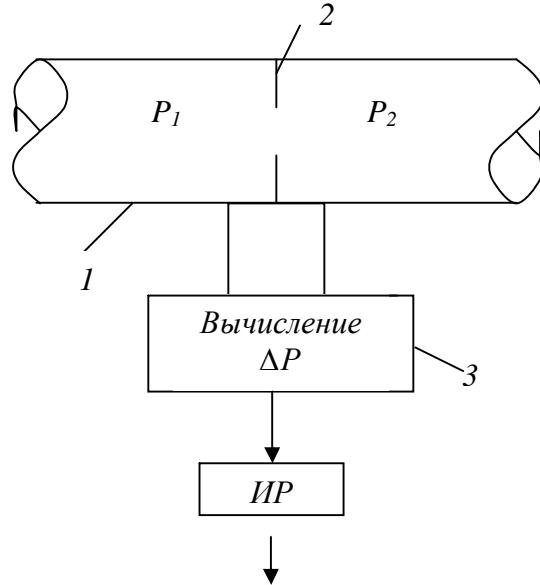


Рис. 3. Устройство измерения расхода воды: 1 – участок трубы, составляющий объект управления; 2 – сужающее устройство – диафрагма; 3 – устройство вычисления расхода воды

Если изменит η_0 на величину $\Delta\eta$, то начнется переходный процесс, который можно представить в виде:

$$B \frac{dQ}{dt} = Q' - Q'' \quad (4)$$

где B – коэффициент, отражающий инерционности объекта. Это уравнение представляет собой нелинейный динамический баланс.

Ввиду нелинейности функций $f_1(\eta)$, $f_2(\varepsilon)$ и малости приращения $\Delta\eta$ эти функции в окрестности η_0 , ε_0 можно разложить в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} f_1(\eta) &= f_1(\eta_0) + \frac{\partial f_1}{\partial \eta} \Delta\eta + \delta_1(\eta), \\ f_2(\varepsilon) &= f_2(\varepsilon_0) + \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} \Delta\varepsilon + \delta_2(\varepsilon), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\delta_1(\eta)$, $\delta_2(\varepsilon)$ – нелинейные остатки ряда Тейлора. При малых значениях $\Delta\eta$, $\Delta\varepsilon$ эти недостатки несущественны и поэтому их влияния не учитывается. Подставляя выражения $f_1(\eta)$, $f_2(\varepsilon)$ в (4) получим:

$$B \frac{dQ}{dt} = \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\eta_0, \varepsilon_0} \Delta\eta - \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\eta_0, \varepsilon_0} \Delta\varepsilon \quad (6)$$

Учитывая, что приращение $\Delta\varepsilon$ определяет приращение расхода $Q:\Delta Q$ (6) можно записать в виде:

$$B \frac{dQ}{dt} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\eta_0, \varepsilon_0} \Delta\varepsilon = \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\eta_0, \varepsilon_0} \Delta\eta \quad (7)$$

В последнем выражении производные $\frac{\partial f_1}{\partial \eta}, \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon}$ постоянные числа, которые определяются из характеристики объекта как аналитически, так и графически. Они представляют собой тангенс угла наклона касательной к зависимостям f_1, f_2 в точке η_0, ε_0 .

Введя относительные отклонения: $x = \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_0}, u = \frac{\Delta\eta}{\eta}$ выражение (7) можно записать в виде

$$B \frac{dx}{dt} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} \right)_{\eta_0, \varepsilon_0} x = \left(\frac{\partial f_1}{\partial \eta} \right)_{\eta_0, \varepsilon_0} u \quad (8)$$

Принимая обозначения

$$B = T; \left(\frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} \right)_{\eta_0, \varepsilon_0} = k, \left(\frac{\partial f_1}{\partial \eta} \right)_{\eta_0, \varepsilon_0} = b \quad (9)$$

выражение (8) можно записать в виде

$$\frac{dx}{dt} + kx = bu \quad (10)$$

Соответствующая передаточная функция объекта имеет вид:

$$W_0(p) = \frac{b}{Tp + k} \quad (11)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ - оператор дифференцирования.

Вывод уравнения системы стабилизации. Ввиду того, что система стабилизации расхода воды с обратной связью через регулятор управляющее воздействие, являющееся выходом этого регулятора выражается как функции выхода объекта x :

$$u' = \rho(\varepsilon) = \rho(x' - g(t)) \quad (12)$$

где u' – выход регулятора; $g(t)$ – задающее воздействие; ρ – функция отображения. ε на u , которую можно называть законом управления и ее вид определяется типом регулятора или определяется из решения математической задачи синтеза последнего классическими методами. Однако тип регулятора нами выбран из имеющихся стандартных типов, исходя из характера объекта стабилизации.

В качестве такого регулятора выбран «пи» – пропорционально-интегральный регулятор. Для такого типа регулятора зависимость (12) при заданном $g(t)$ имеет вид:

$$u' = k_p^1 x' + k_p^2 \int_0^T dx \quad (13)$$

где k_p^1, k_p^2 – соответственно коэффициенты усиления пропорционального и интегрального регулятора.

Учитывая, что сигнал об u' слабый и поэтому подлежит к усилению. В качестве усилителя используется электрический усилитель привлечением высший энергии, и следовательно, в качестве исполнительного механизма используется реверсивный электродвигатель постоянного тока. Учитывая достаточной малости времени переходного процесса в этих системах, последние принимается как усилительное звено:

$$u'' = k_y u; \quad u = k_u u'', \quad (14)$$

где k_y, k_u – соответственно коэффициенты усиления усилителя и исполнительного механизма; u'', u – выходные переменные.

Как усилительное звено представляется датчик расходоводы – x :

$$x' = k_y x, \quad (15)$$

где k_y – коэффициент усиления датчика (расходомера), а x' – его выходная переменная.

Передаточные функции регулятора, усилителя, исполнительного механизма и датчика согласно выражениям (13) – (15) соответственно представляется в виде:

$$\begin{aligned} w_p(p) &= k_p^1 + \frac{k_p^2}{p}, \\ w_y(p) &= k_y, \\ w_u(p) &= k_u, \\ w_g(p) &= k_g. \end{aligned} \quad (16)$$

На основе полученных передаточных функций объекта, регулятора и других элементов с учетом связей между ними составленная операторная структура системы стабилизации представлена на рис. 4.

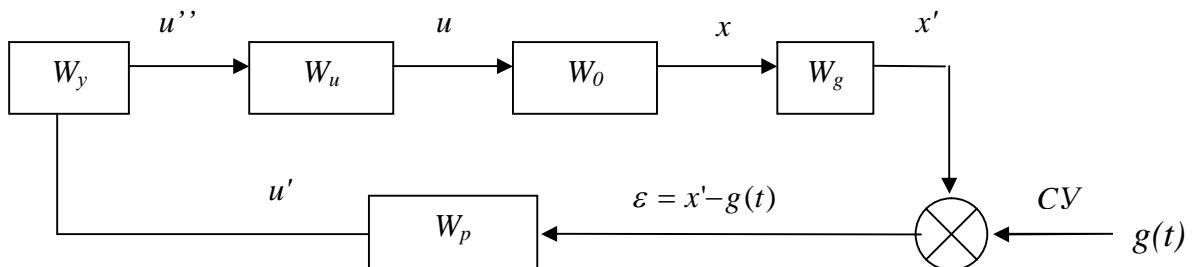


Рис. 4. Операторная структура системы стабилизации: СУ – сравнивающее устройство

Обобщая передаточные функции (коэффициенты усиления) усилителя, исполнительного механизма, датчика с и объекта управления как последовательно соединенные звенья составляется обобщенная передаточная функция объекта:

$$\bar{w}_o(p) = w_y(p)w_u(p)w_g(p)w_o(p) = \frac{k_y k_u k_g . b}{Tp + k} = \frac{\bar{k} b}{Tp + k}, \quad (17)$$

где $\bar{k} = k_y k_u k_g$.

С учетом (17) составлена операторная структура системы стабилизации, которая представлена на рис. 5.

Можно определить передаточную функцию замкнутой системы стабилизации:

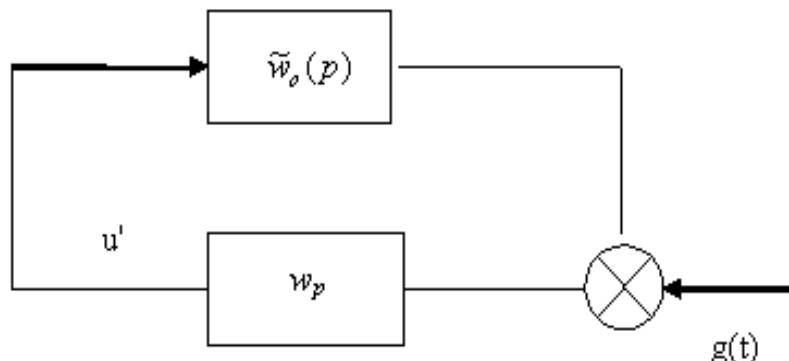


Рис. 5. Обобщенная ператорная структура системы стабилизации

$$\begin{aligned}
 H(p) &= \frac{\tilde{w}_o(p)}{1 + \tilde{w}_p(p)w_o} = \frac{\frac{\bar{k} b}{(Tp + 1)}}{1 + (\bar{k}_p + \frac{k''_p}{p}) \cdot \frac{\bar{k} b}{(Tp + 1)}} = \frac{\frac{\bar{k} b}{(Tp + 1)}}{1 + (\frac{\bar{k}_p p + k''_p}{p}) \cdot \frac{\bar{k} b}{Tp + 1}} = \\
 &= \frac{\frac{\bar{k} b}{Tp + 1}}{\frac{Tp^2 + p + \bar{k}_p \bar{k} bp + k''_p \bar{k} b}{p(Tp + 1)}} = \frac{\bar{k} bp}{Tp^2 + (\bar{k}_p \bar{k} b + 1)p + k''_p \bar{k} b} \quad (18)
 \end{aligned}$$

Принимая обозначения:

$$\alpha = \bar{k} b, \quad T' = (\bar{k}_p \bar{k} b + 1), \quad K = k''_p \bar{k} b \quad (19)$$

Выражение (18) можно представить в виде:

$$H(p) = \frac{\alpha p}{Tp^2 + T' p + K}. \quad (20)$$

Таким образом, характеристический полином системы стабилизации имеет вид:

$$D(p) = Tp^2 + T' p + K = 0 \quad (21)$$

Как следует из (19) в состав обобщенного коэффициента T входит коэффициент усиления пропорционального регулятора - $k_p^{'}$, а в состав обобщенного коэффициента K – коэффициент интегрального регулятора $k_p^{''}$, следовательно при известных значениях других коэффициентов указанные обобщенные коэффициенты выражаются как линейные функции от $k_p^{'}$ и $k_p^{''}$:

$$T' = \varphi_1(k_p^{'}) , \quad K = \varphi_2(k_p^{''}) , \quad (22)$$

где φ_1, φ_2 - линейные функции, а именно:

$$\varphi_1 = \ell_{10} + \ell_{11}k_p^{'}, \quad \varphi_2 = \ell_{21}k_p^{''}. \quad (23)$$

здесь $\ell_{11} = \ell_{21} = \alpha = \bar{k} b$,

Согласно (20) модель системы стабилизации во временной области представляется в виде дифференциального уравнения второго порядка:

$$T \frac{d^2x}{dt^2} + (T' - \alpha) \frac{dx}{dt} + Kx = 0 \quad (24)$$

Синтез регулятора расхода воды. С учетом (22) и уравнения системы стабилизации (20) можно поставить задачу синтеза регулятора.

Виду того, что регулятор выбран [8], и следовательно его структура известна в рассматриваемом случае синтезу подлежать его параметры: $k_p^{'}, k_p^{''}$.

Конкретная постановка задачи синтеза зависит от выбранного критерия и цели синтеза. Использования каждого из возможных критериев синтеза требует соответствующего подхода для решения задачи синтеза.

Ниже рассматривается вопрос построения D -разбиения и определения области устойчивости системы на плоскости $k_p^{'}, k_p^{''}$ т.е. определяется множество изменения параметров регулятора, в пределах которого обеспечивается устойчивость системы стабилизации.

Для построения D -разбиения принимается $p=jw$ и таким образом, осуществляется переход из комплексной области в частотную и характеристический полином (21) представляется в виде

$$D(jw) = T(jw)^2 + T'(jw) + K = 0 \quad (25)$$

В этом уравнении вместо T', K подставляя их выражения из (19) получим:

$$D(jw) = -Tw^2 + j(\alpha k_p^{'} + 1)w + \alpha k_p^{''} = 0 \quad (26)$$

Выделяя в этом уравнении действительную и минимую составляющие его представим в виде:

$$(0k_p^{'} + \alpha k_p^{''} - Tw^2) + j(\alpha w k_p^{'} + 0k_p^{''} + w) = 0. \quad (27)$$

Для обеспечения $D(jw) = 0$ необходимо, чтобы каждая из составляющей (27) была равно к нулю:

$$\begin{aligned} 0k_p' + \alpha k_p'' - Tw^2 &= 0 \\ \alpha w k_p' + 0k_p'' + w &= 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Из решения этой системы уравнений методом Крамера можно найти значения k_p' , k_p'' :

$$k_p' = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad k_p'' = \frac{\Delta_2}{\Delta} \quad (29)$$

Здесь

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & \dots & \alpha \\ w & \dots & 0 \end{vmatrix} = -w\alpha^2; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} Tw^2 & \dots & \alpha \\ -w & \dots & 0 \end{vmatrix} = \alpha w^2; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 0 & \dots & Tw^2 \\ \alpha w & \dots & -w^2 \end{vmatrix} = -\alpha Tw^3. \quad (30)$$

На основе выражений (30) определяется область устойчивости системы.

Непосредственно из критерия Гурвица следует, что устойчивость системы удовлетворяется при всех положительных значениях k_p' , k_p'' .

Выводы:

1. На основании проведенных исследований установлено, что управление процессом охлаждения разностенной отливки в комбинированной форме целесообразно осуществлять в двух уровнях, где на верхнем уровне проводится управление процессом охлаждения с помощью охлаждающей воды – u и определяется оптимальный расход воды как функции времени: $u(t)$, $t = \overline{0, T}$. 2. На процесс регулируемого охлаждения отливки существенно влияет изменение расхода воды, поступающей в герметическую полость в стенке формы. Для линейной системы, какой является $u(t)$ представляет собой кусочно-постоянную функцию. Найденная функция $u(t)$ определяется как задание на регулятор расхода воды и позволит разработать технологию получения отливок разных типоразмеров со сложными сечениями.

Список литературы: 1. Анисович Г.А., Жмакин Н.П. Охлаждения отливок в комбинированной форме. М., «Машиностроение», 1989, -136 с. 2. Шумихин В.С., Жельнис М.В. Изготовление сложных заготовок из чугуна методом непрерывного литья с дифференциональным теплоотводом. Литейное производство, №12, 1991, С.4-6. 3. Демченко В.Ф., Кащенко Ф.Д. Математическая модель процесса затвердевания отливки в сложной форме. – В «Сб. научных трудов». вып. 6, 1991, С.33-36. 4. Новрузова Р.Г. Исследование температурного поля литейной формы и способы его управления. Материалы докладов научно-технической конференции аспирантов и молодых исследователей. Баку, тип. АзТУ, вып. 1, 2005, С. 52-57. 5. Новрузова Р.Г. Математическая модель процесса затвердевания отливок в комбинированных формах. Материалы докладов научно-технической конференции аспирантов и молодых исследователей. Баку, тип. АзТУ, вып. 1, 2006, С. 26-30. 6. Габасов Р., Криллова Ф.М., Павленок Н.С. Оптимальное управление с помощью динамических регуляторов. Автоматика и телемеханика. 2004, №5, С. 8-28. 7. Рзаев Т.Г., Новрузова Р.Г. Оптимальное управление процессом охлаждения отливки в литейной форме с помощью охлаждающего агента. Научные труды, тип. АзТУ, том 6/24, 2007, №4, С.42-45. 8. Эгильский И.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами подачи и распределения воды. Л.:Стройиздат, 1988. 250 с.

Сдано в редакцию 21.01.2009