

Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 621.3.078

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОМ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛА

С. В. Алимов¹, Л. А. Мигачева², А. В. Стариков², А. Р. Титов³

¹ ОАО «Газпром»
Россия, 117997, ГСП-7, г. Москва, ул. Наметкина, 16

² Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

³ ДООАО «Центрэнергогаз»
Россия, 117630, г. Москва, ул. Обручева, 23, стр. 3

Синтезирована двухконтурная система стабилизации температуры для аппарата воздушного охлаждения масла, отличающаяся малой чувствительностью к изменению параметров объекта управления. Разработана структурная схема системы стабилизации температуры. Произведен параметрический синтез регуляторов, позволяющий настроить систему управления аппарата воздушного охлаждения масла на желаемый характер переходного процесса. Построены области качества регулирования разработанной системы. Разработана методика выбора параметров регуляторов.

Ключевые слова: *аппарат воздушного охлаждения масла, система управления, структурная схема, передаточная функция, пропорционально-дифференциальный регулятор, интегральный регулятор, аperiodический фильтр.*

Газоперекачивающие агрегаты магистральных газопроводов имеют в своем составе маслосистемы, предназначенные для смазки гидростатических подшипников скольжения. В процессе работы агрегата масло нагревается и поступает в аппарат воздушного охлаждения (АВО). Теплообменник АВО обдувается с помощью вентиляторов охлаждающим воздухом, и за счет этого температура масла снижается до необходимого уровня. Вентилятор приводится во вращение асинхронным электродвигателем. В последнее время с целью экономии электроэнергии АВО масла оснащают частотными преобразователями и создают замкнутые по датчикам температуры системы управления.

Сергей Викторович Алимов (к.т.н.), первый заместитель начальника департамента по транспортировке, подземному хранению и использованию газа ОАО «Газпром».

Людмила Алексеевна Мигачева (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Материаловедение и товарная экспертиза».

Александр Владимирович Стариков (д.т.н., доц.), доцент кафедры «Электропривод и промышленная автоматика»

Андрей Римович Титов, заместитель генерального директора ДООАО «Центрэнергогаз».

Особенностью функционирования АВО масла является широкий диапазон изменения температуры охлаждающего воздуха. В связи с этим известные системы управления АВО требуют перенастройки регуляторов [1].

Цель настоящей работы заключается в структурно-параметрическом синтезе системы управления АВО масла, отличающейся малой чувствительностью к изменению параметров объекта, связанных с изменением температуры охлаждающего воздуха.

В связи с поставленной целью при выборе структурного построения будем ориентироваться на хорошо известные в области следящих электроприводов и электромагнитных подшипников многоконтурные системы с одной измеряемой координатой [2, 3]. Отличительная особенность таких систем заключается в слабой зависимости качества регулирования и устойчивости от вариации параметров объекта управления. Минимальное количество контуров в многоконтурных системах с одной измеряемой координатой – два.

Применительно к АВО масла структурная схема двухконтурной системы с одной измеряемой координатой принимает вид, приведенный на рис. 1. На ней представлены прежде всего передаточные функции обобщенного объекта управления, под которым понимается совокупность теплообменника, вентилятора и асинхронного электродвигателя.

Передаточная функция теплообменника по отношению к управляющему воздействию – объемному расходу воздуха G_e имеет вид динамического звена второго порядка [4]

$$W_y(p) = \frac{T_m(p)}{G_e(p)} = -\frac{k_G}{a_0 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (1)$$

где T_m – температура масла на выходе теплообменника;
 a_0 , a_1 и k_G – коэффициенты, зависящие от параметров теплообменника, объемного расхода воздуха и температуры окружающей среды;
 p – комплексная переменная.

Передаточную функцию (1), как правило, можно представить в виде двойного аperiodического звена

$$W_y(p) = -\frac{k_G}{(T_{11}p + 1)(T_{22}p + 1)}, \quad (2)$$

где постоянные времени T_{11} и T_{22} определяются из разложения знаменателя (1), причем для определенности будем полагать, что $T_{22} \geq T_{11}$.

Процесс теплообмена характеризуется также передаточными функциями по отношению к возмущающим воздействиям – изменениям температур масла $T_{m,ex}$ и воздуха $T_{e,ex}$ на входе в АВО:

$$W_{e1}(p) = \frac{T_m(p)}{T_{m,ex}(p)} = \frac{\frac{a_0 \Delta T_m(\tau)}{\Delta T_{m,ex}} p^2 + \left[k_{e1} b_0 + \frac{a_1 \Delta T_m(\tau)}{\Delta T_{m,ex}} + \frac{a_0}{\Delta T_{m,ex}} \frac{dT_m(\tau)}{dt} \right] p + k_{e1}}{a_0 p^2 + a_1 p + 1} e^{-\tau p};$$

$$W_{e2}(p) = \frac{T_m(p)}{T_{e,ex}(p)} = \frac{k_{e2}}{a_0 p^2 + a_1 p + 1},$$

где τ – величина транспортного запаздывания, определяемая скоростью движения масла и длиной трубки теплообменника;

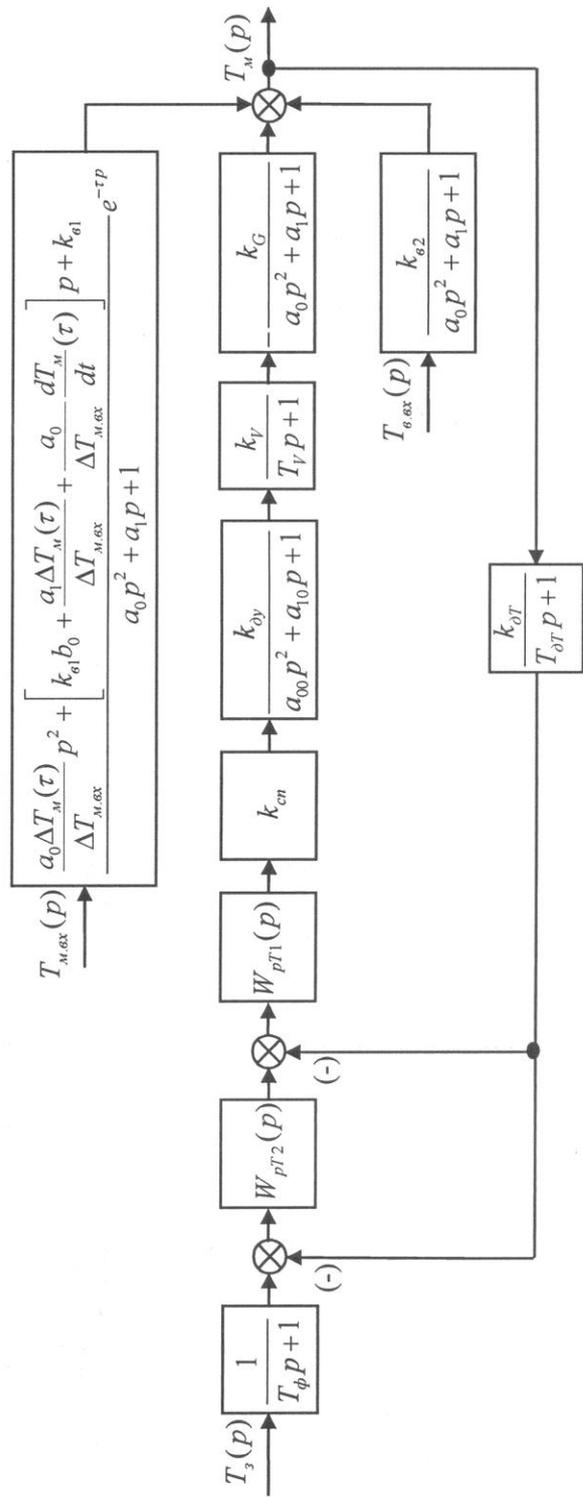


Рис. 1. Структурная схема системы управления АВО масла

b_0 , k_{e1} и k_{e2} – коэффициенты, зависящие от параметров теплообменника;
 Δ – знак приращения.

Вентилятор представлен апериодическим звеном

$$W_V(p) = \frac{G_e(p)}{\omega(p)} = \frac{k_V}{(T_V p + 1)}, \quad (3)$$

где ω – скорость вращения рабочего колеса вентилятора;

k_V – коэффициент передачи;

T_V – постоянная времени, зависящая от длины воздуховода и скорости ω .

Асинхронный электродвигатель в первом приближении рассматривается в виде динамического звена второго порядка

$$W_{dy}(p) = \frac{\omega(p)}{f_1(p)} = \frac{k_{dy}}{a_{00} p^2 + a_{10} p + 1}, \quad (4)$$

где f_1 – частота питающего напряжения на статоре;

k_{dy} – коэффициент передачи, определяемый числом пар полюсов;

a_{00} и a_{10} – коэффициенты, зависящие от параметров схемы замещения электродвигателя и частоты f_1 .

Система управления замкнута по датчику температуры, установленному на выходе теплообменника, с передаточной функцией

$$W_{dT}(p) = \frac{k_{dT}}{T_{dT} p + 1}, \quad (5)$$

где k_{dT} и T_{dT} – коэффициент передачи и постоянная времени датчика соответственно.

Силовой преобразователь (частотно-регулируемый привод) представлен безынерционным звеном с коэффициентом передачи k_{en} , поскольку его инерционностью по сравнению с инерционностью объекта управления можно пренебречь.

Каждый контур системы управления оснащен своим регулятором. Регулятор внутреннего контура предназначен для компенсации наибольшей постоянной времени объекта управления. Поэтому он выбран пропорционально-дифференциальным с передаточной функцией

$$W_{pT1}(p) = -k_{nd}(T_{nd} p + 1), \quad (6)$$

где k_{nd} и T_{nd} – коэффициент передачи и постоянная времени пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора.

Знак минус в передаточной функции регулятора учитывает тот факт, что увеличение его сигнала приводит к уменьшению выходной величины. Постоянная времени ПД-регулятора должна быть равной наибольшей постоянной времени теплообменника

$$T_{nd} = T_{22}. \quad (7)$$

Выбору величины коэффициента передачи k_{nd} этого регулятора в дальнейшем будет уделено особое внимание.

С учетом выражений (1) – (7) передаточная функция первого (внутреннего) замкнутого контура принимает вид

$$W_1(p) = \frac{T_{\delta T} p + 1}{k_{\delta T} [a_{01} p^5 + a_{11} p^4 + a_{21} p^3 + a_{31} p^2 + a_{41} p + 1]}, \quad (8)$$

где $a_{01} = \frac{a_{00} T_V T_{11} T_{\delta T}}{k}$; $a_{11} = \frac{a_{00} T_{11} T_V + T_{\delta T} [a_{10} T_{11} T_V + a_{00} (T_{11} + T_V)]}{k}$;

$$a_{21} = \frac{a_{10} T_{11} T_V + a_{00} (T_{11} + T_V) + T_{\delta T} [T_{11} T_V + a_{10} (T_{11} + T_V) + a_{00}]}{k}$$
;
$$a_{31} = \frac{T_{11} T_V + a_{10} (T_{11} + T_V) + T_{\delta T} (a_{10} + T_{11} + T_V)}{k}$$
; $a_{41} = \frac{a_{10} + T_{11} + T_V + T_{\delta T}}{k}$;
$$k = k_{n\delta} k_{cn} k_{\delta y} k_V k_G k_{\delta T}.$$

Регулятор второго (внешнего) контура выбирается интегральным с передаточной функцией

$$W_u(p) = \frac{1}{T_u p},$$

где T_u – постоянная времени интегрального регулятора.

Интегральный регулятор предназначен для компенсации всех помех, действующих в замкнутой системе после его выхода, и в частности для компенсации возмущений по входной температуре масла $T_{м.вх}$ и температуре охлаждающего воздуха $T_{в.вх}$.

Передаточная функция второго замкнутого контура

$$W_2(p) = \frac{T_{\delta T} p + 1}{k_{\delta T} [a_{01} T_u p^6 + a_{11} T_u p^5 + a_{21} T_u p^4 + a_{31} T_u p^3 + a_{41} T_u p^2 + T_u p + 1]}. \quad (9)$$

На входе системы установлен апериодический фильтр с передаточной функцией

$$W_\phi(p) = \frac{1}{T_\phi p + 1},$$

где T_ϕ – постоянная времени фильтра, величина которой выбирается из соотношения

$$T_\phi = T_{\delta T}$$

для компенсации форсирующей составляющей в (9). С учетом фильтра передаточная функция всей замкнутой системы

$$W_3(p) = \frac{1}{k_{\delta T} [a_{01} T_u p^6 + a_{11} T_u p^5 + a_{21} T_u p^4 + a_{31} T_u p^3 + a_{41} T_u p^2 + T_u p + 1]}.$$

Она представляет собой динамическое звено шестого порядка, свойства которого целесообразно исследовать численными методами компьютерного моделирования.

В большинстве случаев величинами a_{00} , a_{10} и T_V можно пренебречь, тогда передаточная функция (8) примет вид

$$W_1(p) \approx \frac{T_{\delta T} p + 1}{k_{\delta T} \left[\frac{T_{\delta T} T_{11}}{k} p^2 + \frac{T_{\delta T} + T_{11}}{k} p + 1 \right]},$$

передаточная функция (9) также упростится

$$W_2(p) \approx \frac{T_{\partial T} p + 1}{k_{\partial T} \left[\frac{T_{11} T_{\partial T} T_u}{k} p^3 + \frac{(T_{11} + T_{\partial T}) T_u}{k} p^2 + T_u p + 1 \right]},$$

а движение всей замкнутой системы стабилизации температуры масла опишется выражением

$$W_3(p) \approx \frac{1}{k_{\partial T} \left[\frac{T_{11} T_{\partial T} T_u}{k} p^3 + \frac{(T_{11} + T_{\partial T}) T_u}{k} p^2 + T_u p + 1 \right]}. \quad (10)$$

Анализ (10) показывает, что условие устойчивости синтезируемой системы вытекает из теоремы Вышнеградского [5]

$$T_u > \frac{T_{11} T_{\partial T}}{T_{11} + T_{\partial T}}. \quad (11)$$

Выбор параметров регуляторов $k_{\partial T}$ и T_u предлагается производить исходя из областей качества регулирования динамической системы третьего порядка [3].

Характеристическое уравнение передаточной функции (10) имеет третий порядок

$$a_{02} p^3 + a_{12} p^2 + a_{22} p + 1 = 0, \quad (12)$$

где $a_{02} = \frac{T_{11} T_{\partial T} T_u}{k}$; $a_{12} = \frac{(T_{11} + T_{\partial T}) T_u}{k}$; $a_{22} = T_u$.

Уравнение (12) в рамках границы устойчивости (11)

$$a_{12} a_{22} \geq a_{02}$$

может иметь либо три отрицательных вещественных корня, что соответствует аperiodическому переходному процессу, либо один вещественный и пару комплексно-сопряженных корней. Второй случай можно разбить на два возможных варианта. Если действительный корень находится ближе к мнимой оси, чем комплексно-сопряженные, то это соответствует монотонному характеру переходного процесса, при котором не будет наблюдаться перерегулирования. В случае, когда комплексно-сопряженные корни находятся ближе к мнимой оси, переходный процесс будет иметь колебательный характер. Учитывая, что колебательный переходный процесс нежелателен для системы управления АВО масла, определим области сочетания параметров, где наблюдаются аperiodический и монотонный переходные процессы.

Область аperiodичности переходных процессов определяется системой неравенств [2]

$$\left. \begin{aligned} a_{12} &\leq \frac{a_{22}^2}{3}; \\ a_{02(1)} &< a_{02} < a_{02(2)}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где

$$a_{02(1,2)} = \frac{1}{27} \left(9a_{12} a_{22} - 2a_{22}^3 \mp 2\sqrt{a_{22}^6 - 9a_{12} a_{22}^4 + 27a_{12}^2 a_{22}^2 - 27a_{12}^3} \right). \quad (14)$$

Подставляя в (13) и (14) значения коэффициентов из (12), получим систему неравенств, выраженную через параметры настройки системы управления АВО масла

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{11} + T_{\partial T}}{k} &\leq \frac{T_u}{3}; \\ \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} &\underset{(1)}{<} \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(1,2)}{<} \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(2)}{<} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где

$$\frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(1,2)}{=} \frac{1}{27} \left(\frac{9(T_{11} + T_{\partial T})T_u}{k} - 2T_u^2 \mp 2 \sqrt{T_u^4 - \frac{9(T_{11} + T_{\partial T})T_u^3}{k} + \frac{27(T_{11} + T_{\partial T})^2 T_u^2}{k^2} - \frac{27(T_{11} + T_{\partial T})^3 T_u}{k^3}} \right). \quad (16)$$

Область монотонности переходных процессов определяется системой неравенств [2]

$$\left. \begin{aligned} a_{12} &\leq \frac{3a_{22}^2}{8}; \\ a_{02(3)} &< a_{02} < a_{02(4)}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где

$$a_{02(3,4)} = \frac{1}{6} \left(a_{12} a_{22} \mp \sqrt{a_{12}^2 a_{22}^2 - \frac{8}{3} a_{12}^3} \right). \quad (18)$$

Подставляя значения коэффициентов a_{02} , a_{12} и a_{22} из (12) в (17) и (18), получим следующую систему неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{11} + T_{\partial T}}{k} &\leq \frac{3T_u}{8}; \\ \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} &\underset{(3)}{<} \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(3,4)}{<} \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(4)}{<} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где

$$\frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(3,4)}{=} \frac{1}{6} \left(\frac{(T_{11} + T_{\partial T})T_u}{k} \mp \sqrt{\frac{(T_{11} + T_{\partial T})^2 T_u^2}{k^2} - \frac{8(T_{11} + T_{\partial T})^3 T_u}{3k^3}} \right). \quad (20)$$

Выражения (15), (16), (19) и (20) позволяют построить области качества регулирования системы управления АВО масла на плоскости параметров $\frac{T_{11} T_{\partial T}}{k}$ и

$\frac{T_{11} + T_{\partial T}}{k}$, промасштабированных через величину постоянной времени T_u (рис. 2).

Области качества регулирования позволяют настроить систему управления АВО масла на желаемый характер переходного процесса.

Методика настройки разрабатываемой системы управления АВО масла заключается в следующем. Для того чтобы получить отработку задающего процесса без перерегулирования, необходимо расположить изображающую точку М на плоскости параметров таким образом, чтобы она находилась либо в области аperiodичности, либо в области монотонности. При этом следует учитывать, что параметры объекта управления меняются в широких пределах. Поэтому изображающую точку необходимо располагать с некоторым запасом от границы области колебательности. Следует также помнить, что чем дальше изображающая

точка от оси абсцисс и ближе к оси ординат, тем большего быстродействия можно добиться от системы управления АВО масла.

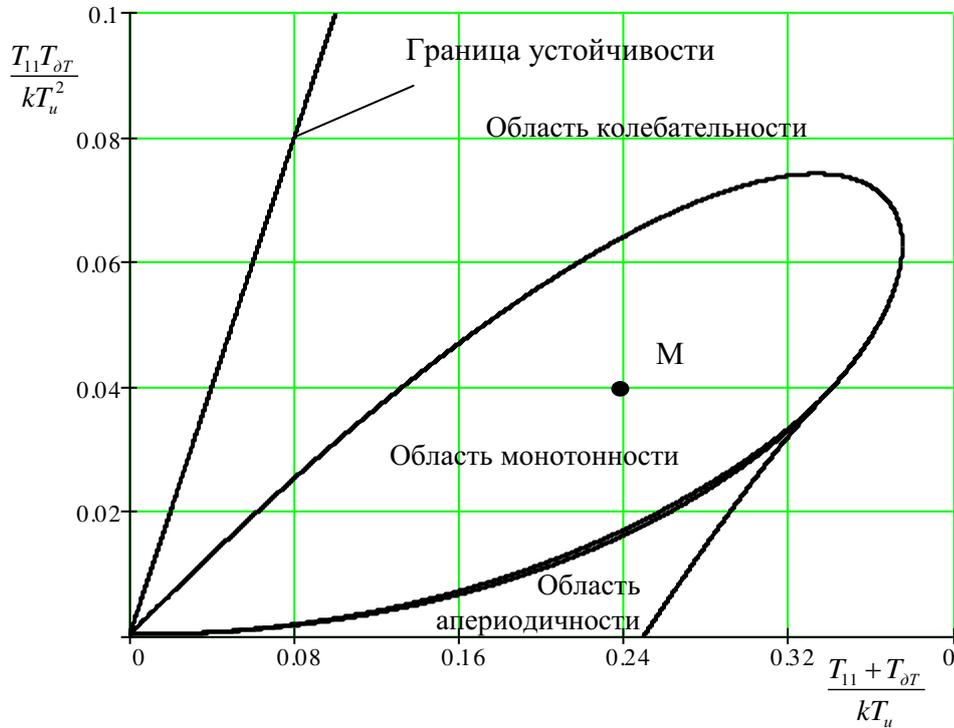


Рис. 2. Области качества регулирования синтезируемой системы управления АВО масла

Для рассматриваемого примера, приведенного на рис. 2, изображающая точка имеет координаты $M(0,24; 0,04)$. Эти координаты позволяют составить систему уравнений для определения требуемых параметров регуляторов k_{no} и T_u :

$$\left. \begin{aligned} T_{11}T_{\delta T} &= 0,04kT_u^2; \\ T_{11} + T_{\delta T} &= 0,24kT_u. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Полагая, что величины постоянных времени T_{11} и $T_{\delta T}$ известны, подстановкой kT_u из второго уравнения (21) в первое получим выражение для определения постоянной времени T_u интегрального регулятора

$$T_u = \frac{6T_{11}T_{\delta T}}{T_{11} + T_{\delta T}}.$$

Коэффициент передачи k разомкнутого внутреннего контура определяется из второго уравнения системы (21)

$$k = \frac{T_{11} + T_{\delta T}}{0,24T_u}.$$

Отсюда вытекает требуемая величина коэффициента передачи ПД-регулятора

$$k_{nd} = \frac{T_{11} + T_{\delta T}}{0,24T_u k_{cn} k_{\delta y} k_V k_G}.$$

Полученные результаты позволяют записать более общие выражения для расчета параметров регуляторов из областей качества регулирования:

$$T_u = \frac{d_a T_{11} T_{\delta T}}{d_o (T_{11} + T_{\delta T})}; k_{nd} = \frac{T_{11} + T_{\delta T}}{d_a T_u k_{cn} k_{\delta y} k_V k_G},$$

где d_a – абсцисса;

d_o – ордината изображающей точки $M(d_a; d_o)$ на плоскости параметров

$$\frac{T_{11} T_{\delta T}}{k T_u^2} \text{ и } \frac{T_{11} + T_{\delta T}}{k T_u}.$$

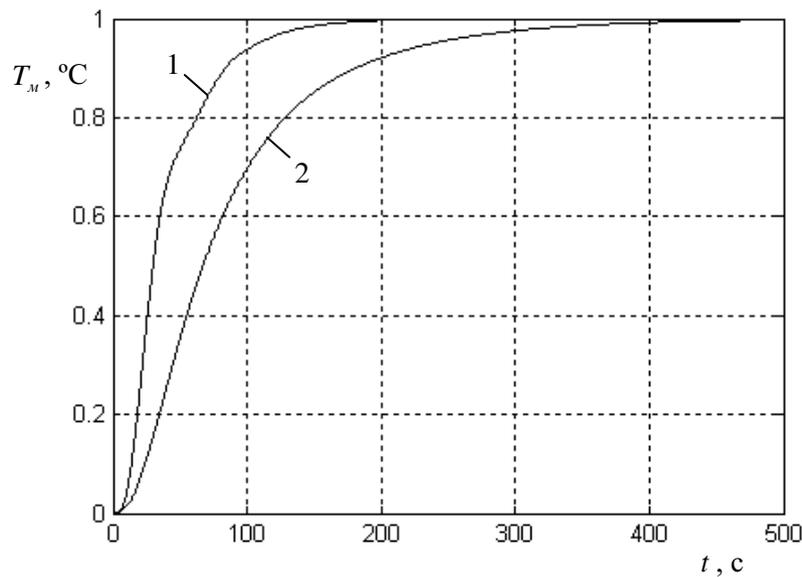


Рис. 3. Графики переходных процессов по управляющему воздействию с учетом вариации параметров объекта управления

Применительно к АВО масла типа 06-10 произведем расчет параметров регуляторов для изображающей точки, изображенной на рис. 2. Параметры регуляторов необходимо выбирать для режима, когда объект управления имеет наибольшие значения коэффициента передачи и постоянных времени. Этому режиму соответствуют температура окружающего воздуха $T_{6.вх} = -30$ °С, объемная скорость воздуха $G_{60} = 0,54$ м³/с и параметры обобщенного объекта управления: $k_G = 0,9943$ с·град./м³; $T_{11} = 6,8156$ с; $T_{22} = 60,4694$ с; $k_V = 0,4042$ м³/рад; $T_V = 1,202$ с; $k_{\delta y} = 1,57$ рад; $a_{00} = 0,1011$ с²; $a_{10} = 0,5939$ с. Коэффициент передачи силового преобразователя принципиально равен $k_{cn} = 1$. Датчик температуры, установленного в АВО масла, характеризуется постоянной времени $T_{\delta T} = 40$ с. Поскольку задающий сигнал в системе управления формируется в тех же величинах, что и выходная величина, то коэффициент передачи датчика температуры $k_{\delta T} = 1$.

Для исходных данных, приведенных выше, несложно рассчитать требуемые

параметры настройки регуляторов и аperiodического фильтра:

$$T_{nd} = 60,4694 \text{ с}; k_{nd} = 8,9; T_u = 35 \text{ с}; T_\phi = 40 \text{ с}.$$

Моделирование синтезированной системы управления АВО масла показывает, что при выбранных настройках регуляторов она устойчиво работает с обеспечением монотонных переходных процессов во всем возможном диапазоне температур охлаждающего воздуха – от -30 до $+40$ °С (рис. 3). Кривая 1 соответствует начальным условиям $T_{в.вх} = -30$ °С, $G_{в0} = 0,54$ м³/с, а кривая 2 – $T_{в.вх} = 40$ °С, $G_{в0} = 27,2$ м³/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Россеев Н. Н.* Создание энергоэффективной системы автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения масла на основе частотно-регулируемого электропривода // Дисс. ... канд. техн. наук. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2006. – 126 с.
2. *Галицков С. Я., Галицков К. С.* Многоконтурные системы управления с одной измеряемой координатой: Монография. – Самара: СГАСУ, 2004. – 140 с.
3. *Макаричев Ю. А., Стариков А. В.* Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
4. *Алимов С. В., Мигачева Л. А., Титов А. Р.* Передаточные функции теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 4 (36). – Самара: СамГТУ, 2012. – С. 198–205.
5. *Бесекинский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975.

Статья поступила в редакцию 5 января 2014 г.

STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEM BY THE USE OF OIL AIR-COOLING UNIT

S. V. Alimov¹, L. A. Migacheva², A. V. Starikov², A. R. Titov³

¹ OAO "GASPROM"

16, Nametkina, Moscow, GSP-7, 117997, Russian Federation

² Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

³ DOAO "Centrenergogas"

3 str., h. 23, Obrucheve, Moscow, 117630, Russian Federation

The two-circuit system of stabilization of temperature for oil air-cooling unit is synthesized. The block diagram of stabilization temperature is developed. Parametrical synthesis of the regulators is made, allowing to adjust a control system of the device of oil air cooling on desirable character of transient process. Quality regulation areas of the developed system are constructed. The technique of parameters choice of regulators is developed.

Keywords: *air-cooling unit of oil, control system, block diagram, transfer function, proportional-differential regulator, integral regulator, aperiodic filter.*

Sergey V. Alimov, First Deputy Head of the Department.

Liudmila A. Migacheva (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Alexander V. Starikov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Andrey R. Titov, Deputy Director General.