УДК 621.313.322-52

Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, В. Е. Мельников

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АСТАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА САР ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГИДРОТУРБИНЫ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ

Анотация. В статье описана структура и принцип действия астатического регулятора САР Ч и М гидротурбины,на основе критерия минимума интеграла от произведения абсолютного значения ошибки на время выполнены параметрический синтез и оптимизация прецизионного регулятора САРЧ и М гидротурбины.

Ключевые слова. Гидроагрегат, астатический регулятор, математическая модель, параметрический синтез.

Введение

Гидравлические турбины ГЭС и ГАЭС работают в режиме резко переменных нагрузок и участвуют в покрытии пиковых и полупиковых суточных графиков. В связи с этим, основным требованием, предъявляемым к системам регулированием гидравлических турбин, является быстродействие и точность. Эти параметры в значительной степени влияют на уровень вырабатываемой мощности, поддержания необходимого баланса в энергосистеме за счет поддержания частоты и мощности.

Существующие системы регулирования гидравлических турбин основаны на ПИД-регуляторах, которые обладают рядом достоинств и недостатков. Среди достоинств можно отметить относительную простоту реализации, а к недостаткам относится недостаточная точность в статических и динамических режимах работы. Устранение этого недостатка видится в принципиально новых подходах к созданию систем управления частоты и мощности гидравлических турбин, основанных на решении обратных задач динамики.

Как показали исследования [1] такие системы значительно повышают точность регулирования частоты и мощности гидравлических турбин в статических и динамических режимах, что и определяет актуальность данной работы.

При создании САР Ч и М основным этапом является параметрический синтез регулятора, от точности выполнения которого зависят основные параметры указанные выше.

Параметрический синтез астатического регулятора САР Ч и М гидроагрегата.

Параметрический синтез прецизионного регулятора осуществлялся при помощи выбора стандартных характеристических полиномов, которые соответствовали следующему принятому функционалу оптимизации [2]:

Общий оптимизирующий функционал:

$$I = \min \int \left| \varepsilon(t) \right| dt \tag{1}$$

Такого функционал обеспечивает компромисс между статической и динамической точностью, при этом учитывается технологические ограничения: ограничения управляющего напряжения на входе(электрогидравлический усилитель) и ограничения параметров электрогидравлического привода по давлениям, расходу и потребляемой мощности [2].

Технологические ограничения следующие:

− Ограничение управляющего напряжения на входе в электрогидравлический усилитель $\left| U_{\text{у}} \right| \le U_{\max}$;

− Ограничение параметров электрогидравлического привода:

$$P \le P_{\max};\ P_{\text{п}} \le P_{\text{п.max}};\ N \le N_{\max};$$

− Желаемый характеристический полином:

$$D^*(S) = S^{2N} + \sum_{i=0}^{2N-1} d_i^* S^i = 0;\ (n = 8; k = 1; N = n + k = 9). \tag{2}$$

Матричное соотношение для определения оптимальных значений параметров регулятора:

Схема регулятора третьего порядка

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & b_0 & 0 & 0 & 0 \\ a_0 & 0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 & b_0 & 0 \\ a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 & b_0 \\ 1 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 \\ 0 & 1 & a_2 & a_1 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_{\text{н}0} \\ a_{\text{н}1} \\ a_{\text{н}2} \\ a_{\text{н}3} \\ a_{\text{н}4} \\ a_{\text{н}5} - a_0 \\ a_{\text{н}6} - a_1 \\ a_{\text{н}7} - a_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Схема регулятора второго порядка

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ r_0 \\ r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & b_0 & 0 & 0 \\ a_0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 \\ 1 & a_1 & a_0 & 0 & b_1 & b_0 \\ 0 & 1 & a_1 & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{\text{н}0} \\ a_{\text{н}1} \\ a_{\text{н}2} \\ a_{\text{н}3} \\ a_{\text{н}4} - a'_0 \\ a_{\text{н}5} - a'_1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Коэффициенты регулятора представим в линеаризованномвиде [3]:

$$\begin{cases} \omega_{\text{ГГ}} = -\dfrac{1}{T_{\text{ГГ}}}\omega_{\text{ГГ}} + \dfrac{K_{\text{мд}}}{T_{\text{ГГ}}}Q - \dfrac{\left(K_{\text{МН}}^{N}\right)_{\text{пр}}}{T_{\text{ГГ}}}N \\ \dot{Q} = -\dfrac{1}{T_{\text{вод}}}Q + \dfrac{K_{Z}^{Q}}{T_{\text{вод}}}K_{X_{\text{СМ}}}^{Z}X_{\text{см}} \\ \dot{X}_{\text{см}} = V_{\text{см}} \\ V_{\text{см}} = -\dfrac{2\xi}{T_{\text{см}}^{\text{м}}}V_{\text{см}} - \dfrac{1}{\left(T_{\text{см}}^{\text{м}}\right)^{2}}X_{\text{см}} + \dfrac{K_{\Delta P}^{X_{\text{СМ}}}}{\left(T_{\text{см}}^{\text{м}}\right)^{2}}\Delta P \\ \Delta\dot{P} = -\dfrac{K_{\dot{X}\text{Р}}}{T_{\text{Г}}^{\text{см}}}V_{\text{см}} - \dfrac{1}{T_{\text{Г}}^{\text{см}}}\Delta P + K_{X_{\text{ОЗ}}}^{P}X_{\text{оз}} \\ \dot{X}_{\text{оз}} = V_{\text{оз}} \\ \dot{V}_{\text{оз}} = -\dfrac{1}{\left(T_{\text{ЭГП}}^{\text{м}}\right)^{2}}X_{\text{оз}} - \dfrac{2\xi_{\text{ЭГП}}}{T_{\text{ЭГП}}^{\text{м}}}V_{\text{оз}} + \dfrac{K_{X_{\text{ОЗ}}}^{i}}{\left(T_{\text{ЭГП}}^{\text{м}}\right)^{2}}i \\ \dot{i} = -\dfrac{1}{T_{\text{ЭГП}}^{\text{Э}}}i + \dfrac{K_{iu}}{T_{\text{ЭГП}}^{\text{Э}}}U_{y} \end{cases} \tag{5}$$

По результатам идентификации экспериментальных данных улучшена упрощенная математическая модель контура регулирования по основным существенным факторам, влияющим на точность САР Ч и М:

$$\begin{cases} \dot{X}_{\text{з}} = V_{\text{з}}, \\ T_{\text{з}}^{2}\dot{V}_{\text{з}} + 2\xi_{\text{з}}T_{\text{з}}V_{\text{з}} + X_{\text{з}} = K_{xi}K_{x\text{оз}}^{i}\cdot i; \\ T_{\text{гц}}^{\text{х}}\dot{X}_{\text{гц}} + X_{\text{гц}} = K_{\text{х}}K_{\text{оз}}X_{\text{з}} \end{cases} \tag{6}$$

или в векторно-матричной форме:

$$\dot{\vec{X}} = A\vec{X} + b\vec{U}, \tag{7}$$

где

$$\vec{X} = \left[X_{\text{гц}};\ X_{\text{з}}; V_{\text{з}}\right]^{T} \tag{8}$$

$\vec{X}$ – вектор параметров состояния объекта;

$X_{\text{гц}}$ – перемещение штока гидроцилиндра (сервомотора);

$X_{\text{з}}$ и $V_{\text{з}}$ – перемещение и скорость отсечного золотника.

$$a = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \qquad (9)$$

– матрица объекта с элементами

$$A_{11} = -\frac{1}{T_{\text{гц}}^{\text{х}}};\; A_{12} = \frac{K_{\text{х}}}{T_{\text{гц}}^{\text{х}}};\; A_{23} = 1;\; A_{32} = -\frac{1}{T_{\text{з}}^{2}};\; A_{33} = -\frac{2\xi_{\text{з}}}{T_{\text{з}}};$$

$$A_{13} = A_{21} = A_{22} = A_{31} = 0;\; \vec{U} = i$$

$\vec{U}$ – вектор управляющих воздействий;

$$b = \left[0;\; 0;\; b_i\right]^T \qquad (10)$$

$$b_i = K_{xi} K_{\text{хоз}}^{i} / T_{\text{з}}^{2}$$

– матрица (вектор) управления.

Ориентировочные значения параметров математической модели (6) (постоянных времени, коэффициентов демпфирования и статических коэффициентов передачи), полученные в результате оценочных статических и динамических расчетов, составляют:

$$T_{\text{з}} = 4,8 \cdot 10^{-2} c; \quad \xi_{\text{з}} = \xi_{\text{эмп}} = 1; \quad K_{\text{хоз}}^{i} = 1,05 \cdot 10^{-3}\, м / А; \quad T_{\text{гц}}^{x} = 103,25\;\; c;$$

$$K_x = 4572,5; \quad K_{xi} = 15\, А / м.$$

Идентификация (уточнение параметров) исходной математической модели выполнялась методом вычислительного эксперимента путем варьирования параметров $T_{\text{з}}$, $T_{\text{гц}}^{\text{х}}$ до удовлетворительного совпадения расчетных и экспериментальных переходных и частотных характеристик системы с традиционным регулятором, формирующим закон управления вида

$$i = \left[(X_{\text{гц}}^{\text{з}} - X_{\text{гц}})\, K_{xi}\, K_1 - X_{\text{оз}}\, K_{xi}\right] K_2 \qquad (11)$$

В результате вычислительного эксперимента установлено, что удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных динамических характеристик системы имеет место при следующих значения параметров математической модели:

$$T_{\text{з}} = 2 \cdot 10^{-2} c; \quad \xi_{\text{з}} = \xi_{\text{эмп}} = 1; \quad K_{\text{хоз}}^{i} = 1,05 \cdot 10^{-3}\, м / А; \quad T_{\text{гц}}^{x} = 115\;\; c;$$

$$K_x = 4572,5; \quad K_{xi} = 15\, А / м.$$

Таким образом, математическая модель (6) при полученных в результате идентификации значениях параметров является достаточно адекватной и может использоваться для синтеза прецизионного быстродействующего регулятора электрогидравлического исполнительного механизма.

Передаточная функция гидравлического исполнительного механизма представляется в виде:

$$W_1(S) = \frac{X_{\text{гц}}(S)}{i_y^{'}(S)} = \frac{B(S)}{A(S)} = \frac{b_1 S + b_0}{a_{3F}S^3 + a_{2F}S^2 + a_{1F}S + a_{0F}}, \tag{12}$$

где $b_1 = 0, b_0 = K_{xоз}^{i} K_{\text{х}} K_{xi}, a_{3F} = T_3^2 T_{\text{гц}}^{\text{х}}, a_{2F} = 2\xi_3 T_3 T_{\text{гц}}^{\text{х}}, a_{1F} = 2\xi_3 T_3 T_{\text{гц}}^{\text{х}}, a_{1F} = 0$

Приведенная передаточная функция эквивалентного (обладающего астатизмом первого порядка; $k = 1$) объекта управления третьего порядка

$$W_1^{'}(S) = \frac{B(S)}{S^k A(S)} = \frac{B'(S)}{A'(S)} = \frac{b_1 S + b_0}{a_{3F}S^4 + a_{2F}S^3 + a_{1F}S^2 + a_{0F}S}\ , \tag{13}$$

где $b_0^{'} = b_0 / a_{3F}$; $a_3 = 1$; $a_2 = a_{2F} / a_{3F}$; $a_1 = a_{1F} / a_{3F}$; $a_0 = a_{0F} / a_{3F}$.

Решение обратной задачи динамики для эквивалентного объекта управления дает следующие выражения для закона управления:

а) в виде передаточной функции

$$W_{\text{р}}(\text{S}) = \frac{i_{\text{у}}(S)}{\varepsilon(S)} = \frac{r_0 + r_1 S + r_2 S^2 + r_3 S^3}{S(C_0 + C_1 S + C_2 S^2 + C_3 S^3 + S^4)}; \tag{14}$$

б) в дифференциальной форме

$$i_{\text{у}}^{(n+2k)}(t) + \sum_{j=0}^{n} C_j i_{\text{у}}^{(j+k)}(t) = \sum_{j=0}^{n} r_j \varepsilon^{(j)}, \tag{15}$$

или

$$\begin{aligned} &i_{\text{у}}^{(5)}(t) + C_0 i_{\text{у}}^{(1)}(t) + C_1 i_{\text{у}}^{(2)}(t) + C_2 i_{\text{у}}^{(3)}(t) + C_3 i_{\text{у}}^{(4)}(t) = \\ &= r_0 \varepsilon(t) + r_1 \varepsilon^{(1)}(t) + r_1 \varepsilon^{(2)}(t) + r_3 \varepsilon^{(3)}(t), \end{aligned} \tag{16}$$

где $n = 3$ – динамический порядок системы; $k = 1$ – принятый порядок астатизма регулятора.

Алгоритм управления универсального астатического регулятора, построенного на основе решения обратной задачи динамики в канонической форме имеет вид:

$$\begin{cases} i_1^{'} = i_2, \\ i_2^{'} = i_3, \\ i_3^{'} = i_4, \\ i_4^{'} = i_5, \\ i_5^{'} = -C_0 i_2 - C_1 i_3 - C_2 i_4 - C_3 i_5 + \varepsilon, \\ U_{\text{у}}(t) = r_0 i_1 + r_1 i_2 + r_2 i_3 + r_3 i_4; \end{cases} \tag{17}$$

Структурная схема регулятора, соответствующего закону управления (3)-(17), приведена на рис. 1.

Прецизионный астатический регулятор гидротурбины, построенный на решении обратных задач динамики, состоит из последовательно соединенного задатчика 1, электронного регулятора 2, блока предоставления переменного коэффициента усиления 3, сервоклапаны и гидравлического двигателя 4, датчика обратной связи 5 и блока коррекции показателей датчика обратной связи 6. Электронный регулятор 2 включает последовательно соединенные сумматор 7 с пятью входами, пять интеграторов (8, 9, 10, 11, 12), сумматор 13 с четырьмя входами, а также восемь пропорциональных (масштабных элементов 14, 15, 1 6, 17, 18, 19, 20, 21) - с помощью которых организовано четыре отрицательных обратных связей (масштабные элементы 14, 15, 16, 17) и четыре положительные связи (масштабы элементы 18,19, 20,21) [1].

Электрогидравлический следящий привод работает следующим образом: заданная программа работы, сформирована в задатчика 1 в виде задаваемые последовательности электронных сигналов проходит через электронный регулятор 2, где формируется закон управления (17) на основе разрешения обратной задачи динамики объекта управления. Сигнал поступает на дополнительное электронное корректирующее устройство, которое обеспечит реализацию переменного коэффициента усиления контура управления, а именно: высокий (двух- и трехкратный от номинального) коэффициент усиления в диапазоне малых смещений объекта от номинального положения с целью компенсации погрешностей, обусловленных статическими нелинейными характеристиками (нечувствительность элементов, сухое трение, люфты и др.) [1].

Практическая реализация закона управления может быть осуществлена путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (17) в микропроцессорном устройстве цифровой системы управления или путем моделирования при помощи аналоговых средств управления в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 1.

При использовании законов управления (3)-(17) передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию и по ошибке могут быть представлены в виде:

$$W(S) = \frac{X_{\text{гц}}(S)}{X^3_{\text{гц}}(S)} = \frac{R(S)}{D(S)}\, B(S), \tag{18}$$

$$W_{\varepsilon}(S) = \frac{\varepsilon\ (S)}{X^3_{\text{гц}}(S)} = \frac{C(S)}{D(S)}\, A(S), \tag{19}$$

где:

$$A(S) \ = a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S \ + a_0, \tag{20}$$

$$B(S) = b_2 S^3 + b_1 S \ + b_0, \tag{21}$$

$$C(S)=S^3+C_2S^2+C_1S+C_0, \tag{22}$$

$$D(S)=S^6+d_5S^5+d_4S^4+d_3S^3+d_2S^2+d_1S+d_0 \tag{23}$$

$$R(S)=r_2S^2+r_1S+r_0; \tag{24}$$

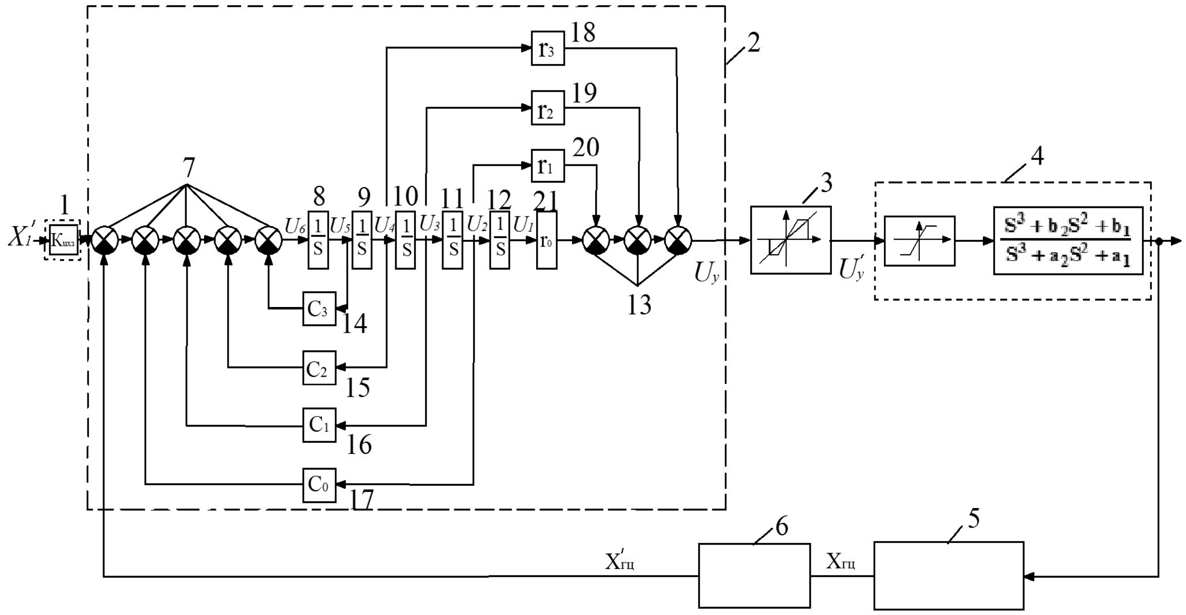

Рис. 1 – Структурная схема астатического регулятора, построенного на основе решения обратной задачи динамики для объекта первого порядка

В выражениях (20)-(24)

$d_i\,(0,\ ...5)$ – коэффициент характеристического полинома замкнутой системы;

C_j (j = 0, …2) и r_m (m = 0, …2) – коэффициенты регулятора.

Полиномиальное уравнение для определения коэффициентов регулятора

$$A'(S)C(S)+B(S)R(S)=D^*(S), \tag{25}$$

где

$$A(S)=a_3S^4+a_2S^3+a_1S^2+a_0S, \tag{26}$$

$$B(S)=b_2S^2+b_1S+b_0', \tag{27}$$

$$C(S)=S^4+C_3S^3+C_2S^2+C_1S+C_0, \tag{28}$$

$$R(S)=r_3S^3+r_2S^2+r_1S+r_0, \tag{29}$$

$$D^*(S)=S^8+d_7^*S^7+d_6^*S^6+d_5^*S^5+d_4^*S^4+d_3^*S^3+d_2^*S^2+d_1^*S+d_0^*; \tag{30}$$

Численные значения коэффициентов регулятора, определенные из соотношений (25)-(30) при исходных значениях параметров математической модели (6) и корня характеристического уравнения ω_0 составляют:

$$C_0 = 1,07 \cdot 10^7;\ r_0 = 2,75 \cdot 10^5;C_1 = -1,79 \cdot 10^5;\ r_1 = -0,3 \cdot 10^5;$$

$$C_2 = 3,1 \cdot 10^3;\ r_2 = -2,67 \cdot 10^{10};C_3 = -37,6;\ r_3 = -3,94 \cdot 10^5.$$

Выражения для передаточных функций системы регулирования (разомкнутой, замкнутой и по ошибке) имеют вид:

$$W_p(S) = \frac{X_{\text{гц}}(S)}{\Delta X(S)} = \\ = \frac{b_3 S^3 + b_2 S^2 + b_1 S + b_0}{a_{p8}S^8 + a_{p7}S^7 + a_{p6}S^6 + a_{p5}S^5 + a_{p4}S^4 + a_{p3}S^3 + a_{p2}S^2 + a_{p1}S + a_{p0}} \tag{31}$$

$$W_з(S) = \frac{X_{\text{гц}}(S)}{X^з_{\text{гц}}(S)} = \\ = \frac{b_3 S^3 + b_2 S^2 + b_1 S + b_0}{a_{з8}S^8 + a_{з7}S^7 + a_{з6}S^6 + a_{з5}S^5 + a_{з4}S^4 + a_{з3}S^3 + a_{з2}S^2 + a_{з1}S + a_{з0}} \tag{32}$$

$$W_з(S) = \frac{X_{\text{гц}}(S)}{X^з_{\text{гц}}(S)} = \\ = \frac{b_3 S^3 + b_2 S^2 + b_1 S + b_0}{a_{з8}S^8 + a_{з7}S^7 + a_{з6}S^6 + a_{з5}S^5 + a_{з4}S^4 + a_{з3}S^3 + a_{з2}S^2 + a_{з1}S + a_{з0}} \tag{33}$$

где:

$$b_3 = K_{xi} K^i_{\text{хоз}} K_{xr3};\ b_2 = K_{xi} K^i_{\text{хоз}} K_{xr2}; b_1 = K_{xi} K^i_{\text{хоз}} K_{xr1}; b_0 = K_{xi} K^i_{\text{хоз}} K_{xr0}. \tag{34}$$

$$a_{p8} = a_{\text{н}8} = 1,\ a_{p7} = a_{\text{н}7} = 5{,}2\omega_0,\ a_{p6} = a_{\text{н}6} = 12{,}8\omega_0^2,\ a_{p5} = a_{\text{н}5} = 21{,}6\omega_0^3,$$

$$a_{p4} = a_{\text{н}4} = 25{,}75\omega_0^4,\ a_{p3} = a_{\text{н}3} = 22{,}2\omega_0^5,\ a_{p2} = a_{\text{н}2} = 13{,}3\omega_0^6,\ a_{p1} = a_0 c_0,\ a_{p0} = 0,$$

$$a_{з8} = a_{\varepsilon 8} = a_{P8},\ a_{з7} = a_{\varepsilon 7} = a_{P7},\ a_{з6} = a_{\varepsilon 6} = a_{P6},\ a_{з5} = a_{\varepsilon 5} = a_{P5},\ a_{з4} = a_{\varepsilon 4} = a_{P4},$$

$$a_{з3} = a_{p3} + b_3,\ a_{з2} = a_{p2} + b_2,\ a_{з1} = a_{p1} + b_1,\ a_{з0} = a_{p0} + b_0,$$

$$a_{\varepsilon 3} = a_{з3} + b_3,\ a_{\varepsilon 2} = a_{з2} + b_2,\ a_{\varepsilon 1} = a_{з1} + b_1,\ a_{\varepsilon 0} = a_{з0} + b_0;$$

В статическом режиме (S=0) передаточная функция замкнутой системы

$$W_з(S) = \frac{X_{\text{гц}}(S)}{X^з_{\text{гц}}(S)} = \frac{b_0}{a_{з0}} = \frac{b_0}{a_{\text{р}0} + b_0} = \frac{b_0}{b_0} = 1.$$

Это означает, что статическая ошибка системы с синтезированным регулятором равна нулю, несмотря на наличие перетечек рабочей жидкости в сервомоторе. Наличие 1% внутренних перетечек обусловливает статическую ошибку регулирования положения сервомотора до 0,1%. Таким образом, предложенный регулятор делает систему регулирования астатической и позволяет повысить ее точность на 0,1 %.

На рис. 2 приведены переходные характеристики базового объекта и объекта с предложенным регулятором, параметры которого оптимизированы по критерию минимума интеграла от произведения абсолютного значения ошибки на время.

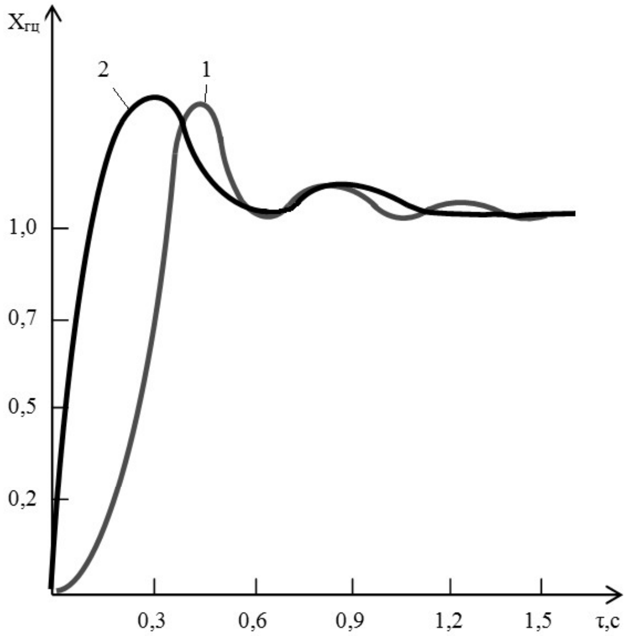

Рис. 2 – Сравнение переходных характеристик
базового объекта и объекта с предложенным регулятором

Система с предложенным регулятором имеет время первого согласования 0,12 с и время регулирования 0,7 с, а базовый объект, соответственно, 0,3 с и 1,5 с. Таким образом, предложенный регулятор обеспечивает более чем двукратное повышение быстродействия по сравнению с базовым вариантом. При этом максимальное перерегулирование в системе с предложенным регулятором на 12-15 % меньше, чем в базовом варианте, что свидетельствует о более высоком запасе устойчивости.

Выводы

Разработанный регулятор способен обеспечить повышение точности регулирования частоты и мощности гидро агрегатов гидравлических электростанций (и, соответственно, стабильности частоты производимой электро энергии) в 3-5 раз (с0,3 до0,1-0,05%) и доведение этих показателей до уровня международных стандартов.

На основе критерия минимума интеграла от произведения абсолютного значения ошибки на время выполнены параметрический синтез и оптимизация прецизионного регулятора САРЧ и М гидротурбины.

 ISSN 1560-8956

Список использованной литературы

1. Г. И. Канюк Прецизионная система автоматического регулирования гидротурбины / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, В. Е. Мельников // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2015. – № 17. – С. 91-96.

2. Мельников В. Е. Параметрический синтез астатического регулятора САР частоты вращения гидротурбины на основе решения обратной задачи динамики [Текст] * / В. Е. Мельников // *Материалы XXIII межд. науч. конф.* (*автоматика-2016*). – Сумы, 2016. – С. 94 –95.

3. Канюк Г. И. Модели и методы структурного и параметрического синтеза прецизионных электрогидравлических следящих систем автоматизированных испытательных стендов:дис. ... д- ра техн. наук. – Харьков. –2009 г. – С. 425-439.