



9. *Вяткин С.И. и др.* Эффективные растеризационные методики с рекурсивным делением плоскости изображения и объектного пространства. //www.ixbt.com
10. *Изабеков З.А.* Воксельное представление полигональной модели выпуклого тела. Нелинейная динамика и прикладная синергетика. Ч.2: Материалы междунар. науч. конф. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2003. – С. 23-27.
11. *Изабеков З.А.* Программа для ЭВМ: Визуализация пространства октарного дерева. ГОУВПО “КнАГТУ”. Свидетельство об официальной регистрации №2004611128. 2004.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Олейниковым.

УДК 629.12.073

© 2006 г. **Г.Е. Кувшинов**, д-р техн. наук,

К.В. Чупина, канд техн. наук

(Дальневосточный государственный технический университет, Владивосток)

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДЛИНЫ ТРОСА ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ БУКСИРУЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Рассматривается применение критериев апериодической устойчивости и оптимального модуля для определения параметров регулятора длины дополнительного троса, обеспечивающего высокую точность регулирования глубины погружения буксируемого подводного объекта (БПО).

Введение

Для исследования и освоения Мирового океана широко применяются буксируемые подводные объекты (БПО). БПО связаны с судном-носителем гибкой механической связью – тросом или кабель-тросом. Эта связь используется для управления глубиной погружения БПО, для передачи электроэнергии, управляющих и информационных сигналов на БПО. При использовании длинных тросов систему трос-БПО необходимо рассматривать как многомассовую систему, учитывая упругие, инерционные и демпфирующие свойства гибкой связи [1].

Чем длиннее трос и чем выше степень волнения, тем больше резонансных частот многомассовой системы находится в диапазоне качки судна-носителя. При этом вертикальная качка БПО может в несколько раз превосходить качку точки крепления троса к судну-носителю, что делает проведение некоторых подводных работ невозможным или сильно затруд-

няет их [1]. Упругие свойства гибкой связи существенно влияют на поведение комплекса при обработке управляющих и возмущающих сигналов. Эти сигналы связаны с процессами изменения глубины погружения БПО, возникающими как при изменении длины троса или скорости буксирной лебедки [2], так и при компенсации вызываемых качкой продольных колебаний в механической связи. Такую компенсацию целесообразно производить с помощью амортизирующей лебедки (АЛ), установленной на БПО [3]. На барабан лебедки намотан дополнительный трос, свободный конец которого прикреплен к кабель-тросу.

Основное перемещение БПО осуществляется за счет изменения длины кабель-троса с помощью судовой буксирной лебедки, а стабилизация глубины погружения БПО, компенсация качки и устранение слабину и рывков в гибкой связи – с помощью АЛ за счет изменения длины дополнительного троса. При этом мощность, требуемая для компенсации, уменьшается более чем в 10 раз по сравнению с другими известными системами и устройствами, а надежность системы судно-трос-БПО увеличивается за счет повышения долговечности кабель-троса [3].

Параметры АЛ определяются с помощью принципа модального регулирования [2]. Часть этих параметров реализуется в регуляторе длины дополнительного троса. С помощью этого регулятора осуществляется точное подрегулирование глубины погружения БПО или расстояния между БПО и дном океана.

Регулятор длины должен обеспечить минимальную установившуюся ошибку (т.е. в его состав входит интегральный регулятор) и малое перерегулирование (чтобы не было удара БПО о дно или о другой подводный объект).

Определение параметров регулятора длины

Для синтеза регуляторов системы автоматического управления (САУ) используют как универсальные критерии, так и критерии, соответствующие типовым внешним воздействиям [4]. Аналитические зависимости между параметрами регулятора и объекта можно найти с помощью части универсальных критериев. К их числу относятся критерий апериодической устойчивости и критерий оптимального модуля, которые обеспечивают переходные процессы с малым перерегулированием и с малым временем регулирования. Поэтому представляется целесообразным производить синтез параметров регулятора длины с использованием обоих этих критериев.

Таким образом, ставится задача определить передаточную функцию регулятора длины с помощью критерия оптимального модуля при соблюдении условий, что расположение полюсов передаточных функций замкнутой САУ удовлетворяет критерию апериодической устойчивости

Установлено, что интегральный показатель качества демпфирования

внешнего возмущения (качки судна) мало зависит от длины троса. Это дает основание предположить: таким же свойством обладает рассматриваемая САУ и применительно к управляющим воздействиям на нее через регулятор глубины. Поэтому предлагается определить параметры регулятора глубины, исходя из параметров САУ с коротким тросом, а затем проверить, нужна ли адаптация параметров регулятора к изменению длины троса, рассмотрев переходные процессы при разных значениях длины троса.

Передаточная функция по управлению средней длиной дополнительного троса имеет вид:

$$W_{зл}(s) = \frac{x_{л}(s)}{x_{зл}(s)} = \frac{A_p(s)}{m_{\Sigma}s^3 + k_{\Sigma}s^2 + c_{л}s + B_{л}} = \frac{L(s)}{M(s)}, \quad (1)$$

где $A_p(s)$ – передаточная функция регулятора длины: $A_p(s) = B_{л}/s$ – для интегрального (И)-регулятора; $A_p(s) = c_p + B_{л}/s$ – для пропорционально-интегрального (ПИ)-регулятора; $A_p(s) = k_p s + c_l + B_{л}/s$ – для пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД)-регулятора; m_{Σ} , k_{Σ} , $c_{л}$, $B_{л}$ – параметры БПО и автоматизированной АЛ.

Критерий апериодической устойчивости требует, чтобы ближайший слева к мнимой оси корень был действительным и имел максимальную кратность [4]. При этом

$$m_{\Sigma}s^3 + k_{\Sigma}s^2 + c_{л}s + B_{л} = m_{\Sigma}(s + a)^3. \quad (2)$$

Параметр a выбирается таким, чтобы дисперсия перемещений БПО при качке судна была минимальной. Параметры автоматизированной лебедки, входящие, помимо параметров БПО, в k_{Σ} и $c_{л}$, настраиваются в соответствии с выражением (2) так, чтобы выполнялись следующие соотношения: $k_{\Sigma} = 3m_{\Sigma}a$, $c_{л} = 3m_{\Sigma}a^2$. Параметр $B_{л}$ делается равным $m_{\Sigma}a^3$.

Оптимальные настройки регулятора находятся на основании соотношения, соответствующего критерию оптимального модуля [4]:

$$\frac{d^k}{dw} \left[\frac{|L(jw)|^2}{|M(jw)|^2} \right]_{w=0} = 0. \quad (3)$$

Дифференцируя зависимости

$$|L(jw)|^2 = L(jw)L(-jw), \quad (4)$$

$$|M(jw)|^2 = M(jw)M(-jw), \quad (5)$$

используя формулу Лейбница, можно записать условие (3) в виде

$$\left. \sum_{k=0}^m (-1)^k \cdot \binom{m}{k} \cdot L^{(m-k)}(jw) \cdot L^{(k)}(jw) \right|_{w=0} - \left. \sum_{k=0}^m (-1)^k \cdot \binom{m}{k} \cdot L^{(m-k)}(jw) \cdot L^{(k)}(jw) \right|_{w=0} = 0, \quad (6)$$

где $m=2, 4 \dots 2l$; l – число определяемых параметров; $\binom{m}{k}$ – биномиальные коэффициенты.

Благодаря тому, что m – всегда четное, выражение (6) можно записать в более удобном виде, при котором суммирование короче:

$$\left| 2 \sum_{k=0}^{\frac{m}{2}-1} (-1)^k \cdot \binom{m}{k} \cdot L^{(m-k)}(s) \cdot L^{(k)}(s) + (-1)^{\frac{m}{2}} \cdot \binom{m}{\frac{m}{2}} \cdot \left(L^{\left(\frac{m}{2}\right)}(s) \right)^2 \right|_{s=0} - \quad (7)$$

$$- \left| 2 \sum_{k=0}^{\frac{m}{2}-1} (-1)^k \cdot \binom{m}{k} \cdot M^{(m-k)}(s) \cdot M^{(k)}(s) + (-1)^{\frac{m}{2}} \cdot \binom{m}{\frac{m}{2}} \cdot \left(M^{\left(\frac{m}{2}\right)}(s) \right)^2 \right|_{s=0} = 0.$$

На основании соотношения (7) находятся оптимальные настройки регуляторов.

С учетом выражения (1) при использовании И-регулятора передаточная функция замкнутой системы с коротким тросом $W_{злИ}(s)$ и передаточная функция И-регулятора $W_I(s)$ имеют вид

$$W_{злИ}(s) = \frac{B_l}{m_\Sigma s^3 + k_\Sigma s^2 + c_l s + B_l}, \quad W_I(s) = \frac{B_l}{s} = \frac{m_\Sigma s^3}{s}, \quad (8)$$

а для ПИ-регулятора передаточная функция замкнутой системы $W_{злПИ}(s)$ и передаточная функция ПИ-регулятора $W_{ПИ}(s)$ определяются выражениями:

$$W_{злПИ}(s) = \frac{c_p s + B_l}{m_\Sigma s^3 + k_\Sigma s^2 + c_l s + B_l}, \quad (9)$$

$$W_{ПИ}(s) = \frac{c_p s + B_l}{s} = \frac{c_p s + m_\Sigma s^3}{s},$$

где настраиваемым параметром будет параметр c_p .

Числитель передаточной функции

$$L(s) = B_l + c_p s \quad (10)$$

с учетом выражения (2) запишется в виде

$$L(s) = a^3 m_\Sigma + c_p s, \quad (11)$$

а знаменатель –

$$M(s) = m_\Sigma (s+a)^3. \quad (12)$$

Поскольку в этом случае определяется только один параметр, то в уравнении (7) следует принять, что $m = 2$, и дифференцировать функции (11), (12) один раз по s , а затем в полученных производных положить $s = 0$.

Таким образом:

$$L^{(0)}(0) = a^3 m_\Sigma, \quad L^{(1)}(0) = c_p, \quad L^{(2)}(0) = 0,$$

$$M^{(0)}(0) = a^3 m_{\Sigma}, \quad M^{(1)}(0) = 3a^3 m_{\Sigma}, \quad M^{(2)}(0) = 6a^3 m_{\Sigma}. \quad (13)$$

При подстановке зависимостей (13) в выражение (11) получается

$$c_p = \sqrt{3} \cdot m_{\Sigma} \cdot a^2. \quad (14)$$

При использовании ПИД-регулятора передаточная функция замкнутой системы –

$$W_{\text{злПИД}}(s) = \frac{k_p s^2 + c_p s + B_{\text{л}}}{m_{\Sigma} s^3 + k_{\Sigma} s^2 + c_{\text{л}} s + B_{\text{л}}}, \quad (15)$$

где определяемыми параметрами являются k_p и c_p . Произведя аналогичные действия, можно получить искомые параметры:

$$k_p = \sqrt{3} m_{\Sigma} a; \quad (16)$$

$$c_p = m_{\Sigma} a^2 \sqrt{3 + 2\sqrt{3}}. \quad (17)$$

Передаточная функция ПИД-регулятора

$$W_{\text{ПИД}}(s) = \frac{k_p s^2 + c_p s + B_{\text{л}}}{s} = m_{\Sigma} a \frac{s^2 \sqrt{3} + a s \sqrt{3 + 2\sqrt{3}} + a^2}{s}, \quad (18)$$

Выбор разновидности регулятора можно осуществить, сравнивая качество переходных процессов при отработке заданного приращения длины троса АЛ, что удобно выполнить путем моделирования с использованием, например, пакета MATLAB.

На рис. 1 приведены результаты моделирования переходной характеристики изменения средней длины дополнительного троса для регуляторов типа И, ПИ и ПИД при длине кабель-троса 2,5 и 8 км. Суммарная масса m_{Σ} , которая определяется массой БПО и приведенным к скорости дополнительного троса моментом инерции привода АЛ, равна 5930 кг. Параметр a принят равным $0,102 \text{ с}^{-1}$.

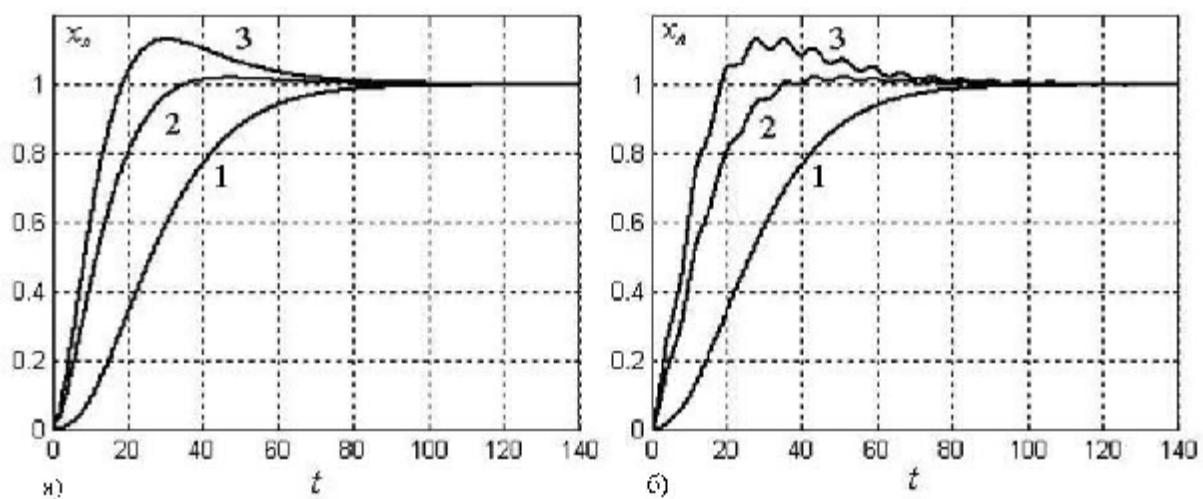


Рис. 1. Отработка САУ АЛ с кабель-тросом длиной 2,5 км (а) и 8 км (б) скачкообразного задающего воздействия:

1 – И-регулятор; 2 – ПИ-регулятор; 3 – ПИД-регулятор.

Заключение

Анализ результатов показал, что как при интегральном, так и при пропорционально-интегральном законах регулирования переходные процессы протекают практически без перерегулирования. Увеличение длины кабель-троса приводит к росту колебательности. Время переходного процесса также не зависит от длины троса, а определяется типом регулятора. Поэтому параметры, найденные для случая применения короткого троса, не следует менять в зависимости от изменяемой длины кабель-троса. Использование ПИ-регулятора предпочтительно, так как позволяет сократить время регулирования более чем в два раза по сравнению с использованием И-регулятора. Применение ПИД-регулятора нежелательно, так как он вызывает заметное перерегулирование.

Таким образом, предложенная методика синтеза регулятора глубины позволяет обеспечить устойчивость и требуемое качество переходных процессов в САУ АЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кувшинов Г.Е.* Управление глубиной погружения буксируемых объектов. – Владивосток: Изд-во ДВ ун-та, 1987.
2. *Чупина К.В.* Управление глубиной погружения буксируемого подводного объекта с помощью установленной на нем лебедки: автореф... дис. канд. техн. наук. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 1997.
3. *Пат. 2114756С1 РФ.* Спуско-подъемное устройство / Кувшинов Г.Е., Чупина К.В. // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 1998. – № 19.
4. *Гурецкий Х.* Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.