

АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА

С целью минимизации негативных последствий происшествий и аварий постоянно ужесточаются требования к системам судовой автоматики. Безаварийность эксплуатации морского судна напрямую связана с обеспечением его безопасного движения, особенно в ситуациях расхождения с другими судами, маневрирования в узкостях и движения в условиях сильного морского волнения. В связи с этим разработка новых перспективных систем управления движением судна, призванных повысить безопасность мореплавания, снизить эксплуатационные расходы и разгрузить штурманский состав, является актуальной и важной задачей.

В известных исследованиях и публикациях, посвященных аналитическому конструированию систем управления движением судна, основное внимание уделяется схемотехническим решениям в классе систем по отклонению и систем по возмущению [1, 2]. Более широкими возможностями обладают компенсационные системы управления, объединяющие управление по отклонению и по возмущению [3].

В настоящей работе дана оценка ошибки системы управления по возмущению и разработаны меры по уменьшению отклонения от заданного курса путем аналитического конструирования компенсационной системы управления движением судна.

Структурная схема системы управления движением судна по возмущению приведена на рис. 1.

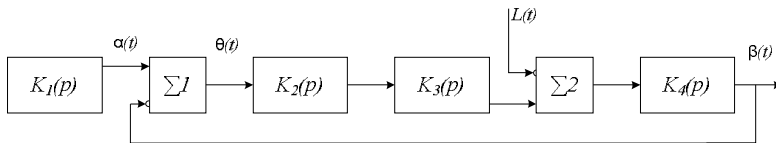


Рис. 1. Структурная схема системы управления по возмущению: $\alpha(t)$ – заданное направление движения судна; $L(t)$ – суммарное внешнее возмущающее воздействие, включающее ветер, течение, волнение и т.п.; $\beta(t)$ – текущее значение курса; $\theta(t)$ – отклонение текущего значения от заданного направления (ошибка системы); $K_1(p)$, $K_2(p)$, $K_3(p)$, $K_4(p)$ – передаточные функции задатчика курса, информационно-управляющего устройства, средства управления, объекта управления соответственно; Σ_1 – элемент сравнения; Σ_2 – сумматор

Согласно рис. 1 уравнения элементов системы имеют вид:

$$\begin{cases} \theta(p) = \alpha(p) - \beta(p); \\ \beta(p) = [K_2(p) \cdot K_3(p) \cdot \theta(p) - L(p)] \cdot K_4(p), \end{cases}$$

где $\alpha(p)$, $\theta(p)$, $\beta(p)$, $L(p)$ – изображения по Лапласу соответственно заданного направления, ошибки системы, текущего значения и внешнего воздействия.

Исключив из уравнения $\beta(p)$ и приравняв $\alpha(p)$ нулю, находим уравнение системы для ошибки:

$$[1 + K_2(p) \cdot K_3(p) \cdot K_4(p)] \cdot \theta(p) = K_4(p) \cdot L(p).$$

Отсюда передаточная функция системы управления по ошибке

$$K_{i.o}(p) = \frac{\theta(p)}{L(p)} = \frac{K_4(p)}{1 + K_2(p) \cdot K_3(p) \cdot K_4(p)}. \quad (1)$$

Динамика элементов системы управления движением судна по возмущению описываются следующими передаточными функциями [2, 4 – 8]:

информационно-управляющего устройства с ПИД-регулятором классического типа авторулевого

$$K_2(p) = \frac{k_2 \cdot (\dot{O}_E p + 1)}{T_E p} \cdot \frac{(\dot{O}_A p + 1)}{(\dot{O}_2 p + 1)},$$

средства управления

$$K_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$$

объекта управления, описываемого моделью Номото первого порядка

$$K_4(p) = \frac{k_4}{p \cdot (T_4 p + 1)},$$

где k_2 , k_3 , k_4 – коэффициенты передачи соответствующих элементов системы; $T_{и}$, $T_{д}$, T_2 , T_3 , T_4 – постоянные времени интегрирующего канала, дифференцирующего канала ПИД-регулятора, информационно-управляющего устройства, средства управления, объекта управления соответственно.

Подставив значения передаточных функций элементов системы в (1) получаем

$$K_{i.o}(p) = \frac{\theta(p)}{L(p)} = \frac{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p}{b_0 p^5 + b_1 p^4 + b_2 p^3 + b_3 p^2 + b_4 p + b_5}, \quad (2)$$

где

$$a_0 = T_E \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot k_4; \quad a_1 = T_E \cdot (\dot{O}_2 + \dot{O}_3) \cdot k_4; \quad a_2 = T_E \cdot k_4; \quad b_0 = T_E \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4;$$

$$b_1 = T_{\dot{E}} \cdot [(T_2 + T_3) \cdot T_4 + T_2 \cdot T_3]; \quad b_2 = T_{\dot{E}} \cdot (T_2 + T_3 + T_4);$$

$$b_3 = T_{\dot{E}} \cdot (k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot T_A + 1); \quad b_4 = k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (T_{\dot{E}} + T_{\dot{A}}); \quad b_5 = k_2 \cdot k_3 \cdot k_4.$$

Как видно из (2) система управления движением судна по возмущению является астатической с астатизмом первого порядка.

Определим установившуюся ошибку системы при разных законах изменения возмущающего воздействия: ступенчатом $L(t) = L_0 \cdot 1(t)$, линейном $L(t) = L_0 + L_1 t$ и квадратичном $L(t) = L_0 + L_1 t + L_2 t^2$.

Изображение ошибки системы в соответствии с (1)

$$\theta(p) = K_{i_0}(p) \cdot L(p). \quad (3)$$

Установившаяся ошибка системы в соответствии с теоремой операционного исчисления о конечном значении функции [9]

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \theta(p). \quad (4)$$

После подстановки в (4) выражения (3) получаем

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot K_{i_0}(p) \cdot L(p). \quad (5)$$

При изменении возмущающего воздействия по закону ступенчатой функции $L(t) = L_0 \cdot 1(t)$ установившуюся ошибку определим, подставив в (5) изображение возмущающего воздействия $L(t) = \mathcal{L}[L_0 \cdot 1(t)] = L_0/p$ и значение передаточной функции системы по ошибке (2)

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p}{b_0 p^5 + b_1 p^4 + b_2 p^3 + b_3 p^2 + b_4 p + b_5} \cdot \frac{L_0}{p} = 0.$$

Если возмущающее воздействие изменяется по линейному закону $L(t) = L_0 + L_1 t$, то для определения установившейся ошибки нужно подставить в (5) изображение такого воздействия

$$L(t) = \mathcal{L}[L_0 + L_1 t] = \frac{L_0}{p} + \frac{L_1}{p^2},$$

тогда

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p}{b_0 p^5 + b_1 p^4 + b_2 p^3 + b_3 p^2 + b_4 p + b_5} \cdot \left[\frac{L_0}{p} + \frac{L_1}{p^2} \right] =$$

$$= \frac{a_2}{b_5} \cdot L_1 = \frac{\dot{O}_{\dot{E}}}{k_2 \cdot k_3} \cdot L_1. \quad (6)$$

Если возмущающее воздействие изменяется по закону квадратичной функции (с постоянным ускорением) $L(t) = L_0 + L_1 t + L_2 t^2$, изображение которого

$$L(p) = \frac{L_0}{p} + \frac{L_1}{p^2} + \frac{2!L_2}{p^3},$$

то установившаяся ошибка

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p}{b_0 p^5 + b_1 p^4 + b_2 p^3 + b_3 p^2 + b_4 p + b_5} \cdot \left[\frac{L_0}{p} + \frac{L_1}{p^2} + \frac{2!L_2}{p^3} \right] = \infty.$$

Как видно из (6) для уменьшения установившейся ошибки следует повышать коэффициенты передачи информационно-управляющего устройства, содержащего ПИД-регулятор авторулевого и средства управления, однако при этом уменьшаются запасы устойчивости системы управления движением судна по возмущению. В рассматриваемой системе имеет место противоречие между условиями повышения статической точности и устойчивости, поэтому приходится принимать компромиссное решение.

Определенного уменьшения установившейся ошибки можно добиться с помощью различных корректирующих устройств [9], однако они не устраняют необходимости в компромиссной настройке системы.

Введение в замкнутую систему управления движением судна разомкнутой компенсационной связи по возмущающему воздействию [3, 10] позволяет повысить статическую точность без уменьшения запасов устойчивости.

Структурная схема компенсационной системы управления движением судна приведена на рис. 2.

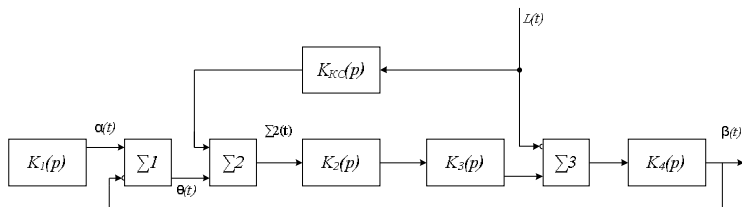


Рис. 2. Структурная схема компенсационной системы управления: $K_{кс}(p)$ – передаточная функция компенсационной связи

В соответствии с рис. 2 уравнения элементов системы определяются следующими соотношениями:

$$\begin{cases} \theta(p) = \alpha(p) - \beta(p); \\ \Sigma 2(p) = K_{\text{кн}}(p) \cdot L(p) + \theta(p); \\ \beta(p) = [K_2(p) \cdot K_3(p) \cdot \Sigma 2(p) - L(p)] \cdot K_4(p). \end{cases}$$

После преобразования получаем уравнение, связывающее изображение ошибки системы $\theta(p)$ и изображение суммарного внешнего воздействия $L(p)$:

$$\begin{aligned} & [1 + K_2(p) \cdot K_3(p) \cdot K_4(p)] \cdot \theta(p) = \\ & = K_4(p) \cdot [1 - K_{\dot{E}N}(p) \cdot K_2(p) \cdot K_3(p)] \cdot L(p). \end{aligned} \quad (7)$$

Из выражения (7) получаем передаточную функцию по ошибке компенсационной системы управления движением судна

$$K_{i_0}(p) = \frac{\theta(p)}{L(p)} = \frac{K_4(p) \cdot [1 - K_{\dot{E}N}(p) \cdot K_2(p) \cdot K_3(p)]}{1 + K_2(p) \cdot K_3(p) \cdot K_4(p)}.$$

Для повышения порядка астатизма с первого до второго относительно возмущающего воздействия необходимо с помощью компенсационной связи по этому воздействию ввести в систему первую производную от $L(t)$ [9].

В соответствии с этим требованием физически реализуемая передаточная функция $K_{\dot{E}N}(p)$ связи по возмущающему воздействию должна иметь вид:

$$K_{\dot{E}N}(p) = \frac{\tau p}{\dot{O}_{\dot{E}N} p + 1}.$$

После подстановки значений передаточных функций элементов получим передаточную функцию компенсационной системы управления движением судна по ошибке

$$K_{i_0}(p) = \frac{\theta(p)}{L(p)} = \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p}{(\dot{O}_{\dot{E}N} p + 1) \cdot (b_0 p^5 + b_1 p^4 + b_2 p^3 + b_3 p^2 + b_4 p + b_5)}, \quad (8)$$

где $a_0 = k_4 \cdot T_{\dot{E}N} \cdot T_{\dot{E}} \cdot T_2 \cdot T_3$; $a_1 = k_4 \cdot T_{\dot{E}} \cdot [T_{\dot{E}N} \cdot (\dot{O}_2 + \dot{O}_3) + \dot{O}_2 \cdot \dot{O}_3]$;

$a_2 = k_4 \cdot T_{\dot{E}} \cdot (T_{\dot{E}N} + \dot{O}_2 + \dot{O}_3)$; $a_3 = k_4 \cdot (T_{\dot{E}} - \tau \cdot k_2 \cdot k_3)$.

Необходимо отметить, что параметр $T_{\dot{E}N}$ компенсационной связи по возмущающему воздействию не входит в характеристическое уравнение замкнутой части системы (2), (8), а следовательно, не влияет на ее устойчивость. Однако введение компенсационной связи вносит новый корень в характеристическое уравнение (8).

Из (8) следует, что компенсационная система в общем случае (при произвольном значении τ) также, как система по возмущению (2) имеет астатизм первого порядка.

Условием повышения порядка астатизма компенсационной системы до второго является

$$T_{\dot{E}} - \tau \cdot k_2 \cdot k_3 = 0, \quad (9)$$

откуда

$$\tau = \frac{T_{\dot{E}}}{k_2 \cdot k_3}.$$

При выполнении условия (9) передаточная функция по ошибке (8) показывает, что система приобретает астатизм второго порядка:

$$K_{i_0}(p) = \frac{\theta(p)}{L(p)} = \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^6 + b_1 p^5 + b_2 p^4 + b_3 p^3 + b_4 p^2 + b_5 p + b_6},$$

где $b_0 = T_{\dot{E}N} \cdot T_{\dot{E}} \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4$; $b_1 = T_{\dot{E}} \cdot \{T_{\dot{E}N} \cdot [(T_2 + T_3) \cdot T_4 + T_2 \cdot T_3] + T_2 \cdot T_3 \cdot T_4\}$;

$$b_2 = T_{\dot{E}} \cdot [T_{\dot{E}N} \cdot (T_2 + T_3 + T_4) + (T_2 + T_3) \cdot T_4 + T_2 \cdot T_3];$$

$$b_3 = T_{\dot{E}} \cdot [T_{\dot{E}N} \cdot (k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot T_{\dot{A}} + 1) + T_2 + T_3 + T_4];$$

$$b_4 = T_{\dot{E}N} \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (T_{\dot{E}} + T_{\dot{A}}) + T_{\dot{E}} \cdot (k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot T_{\dot{A}} + 1);$$

$$b_5 = k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (T_{\dot{E}N} + T_{\dot{E}} + T_{\dot{A}}); \quad b_6 = k_2 \cdot k_3 \cdot k_4.$$

Определим установившуюся ошибку системы при разных законах изменения возмущающего воздействия:

при изменении по закону ступенчатой функции

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^6 + b_1 p^5 + b_2 p^4 + b_3 p^3 + b_4 p^2 + b_5 p + b_6} \cdot \frac{L_0}{p} = 0;$$

при изменении по линейному закону

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^6 + b_1 p^5 + b_2 p^4 + b_3 p^3 + b_4 p^2 + b_5 p + b_6} \cdot \left[\frac{L_0}{p} + \frac{L_1}{p^2} \right] = 0;$$

при изменении по закону квадратичной функции

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^6 + b_1 p^5 + b_2 p^4 + b_3 p^3 + b_4 p^2 + b_5 p + b_6} \cdot \left[\frac{L_0}{p} + \frac{L_1}{p^2} + \frac{2!L_2}{p^3} \right] = \\ &= \frac{a_2 \cdot 2!L_2}{b_6}. \end{aligned}$$

Таким образом показано, что в системе уравнений движения судна по возмущению, имеющей астатизм первого порядка, установившаяся ошибка при ступенчатом законе изменения возмущающего воздействия равна нулю, при линейном – ограничена конечным значением, а при квадратичном стремится к бесконечности.

Разработанная математическая модель компенсационной системы управления движением судна позволила повысить порядок астатизма с первого до второго и вследствие этого установившаяся ошибка равна нулю при ступенчатом и линейном законах изменения возмущения, а при квадратичном ограничена конечным значением.

Дальнейшие исследования предполагают аналитическое конструирование компенсационной системы управления движением судна с

ПИД регулятором авторулевого других типов (параллельным, стандартным) и объектом управления, в большей мере учитывающим различные режимы работы судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Навигационная безопасность при лоцманской проводке судов / [Вильский Г. Б., Мальцев А. С., Бездольный В. В., Гончаров Е. И.]. – Николаев-Одесса: Фенікс, 2007. – 456 с.
2. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал – Одесса: Фенікс; –М: ТрансЛит, 2007. – 376 с.
3. Львов В. Е. Метод улучшения компенсационных свойств системы управления курсом судна / В. Е. Львов, А. С. Мальцев // Судовождение. – 2008. – Вып. 15. – С. 99 – 104.
4. Березин С. Я. Системы автоматического управления движением судна по курсу / С. Я. Березин, Б. А. Тетюев – Л.: Судостроение, 1990. – 256 с.
5. Фрейдзон И. Р Судовые автоматизированные электроприводы и системы. /И. Р. Фрейдзон – Л.: Судостроение, 1988. – 472 с.
6. Ткаченко А. Н. Судовые системы автоматического управления и регулирования. /А. Н. Ткаченко – Л.: Судостроение, 1984. – 288 с.
7. Мордовченко Д. Н. техническая эксплуатация авторулевых /Д. Н. Мордовченко, Л. Г. Панякин, А. Ф. Таратин. – М.: Транспорт, 1989. – 128с.
8. Богданов В. И. Оптимизация параметров судового ПИД-регулятора с помощью генетического алгоритма //В. И. Богданов, С. А. Подпорин //Сб. науч. тр. Севастопольского нац. техн. универ. – 2004. – Вып. 7. – С. 184 – 189
9. Стеклов В. К. Проекування систем автоматичного керування. / В. К. Стеклов – К.: Вища шк., 1995. – 231 с.
10. Андреев А. И. Повышение точности цифровых систем управления инерционными объектами /А. И. Андреев, В. Е. Львов // Судовождение. – 2007. – Вып. 14. – С. 9 – 13.