

**КОРРЕКЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУЛЕВОЙ МАШИНЫ  
С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ  
МОРСКОГО СУДНА**

*Розглянуто систему автоматичного управління курсом морського судна з урахуванням нелінійної статичної характеристики і запізнювання рульової машини. Показано, що наявність в системі управління нелінійності призводить до появи автоколивань. Розглянуто методи корекції нелінійної характеристики рульової машини з урахуванням запізнювання.*

*Рассмотрена система автоматического управления курсом морского судна с учетом нелинейной статической характеристики и запаздывания рулевой машины. Показано, что наличие в системе управления нелинейности приводит к появлению автоколебаний. Рассмотрены методы коррекции нелинейной характеристики рулевой машины с учетом запаздывания.*

*The system of automatic control the course of marine ship is considered taking into account nonlinear static description and delay of steering machine. It is shown that a presence in control system of non-linearity results in appearance of self-excited oscillations. The methods of correction of nonlinear description of steering machine are considered taking into account a delay.*

Рулевая машина морского судна с гидравлическим приводом имеет нелинейную статическую характеристику типа «люфт», а также транспортное запаздывание [2]. Наличие такого вида нелинейности приводит в некоторых режимах работы системы управления к нежелательным автоколебаниям либо к статической установившейся ошибке. Наличие автоколебаний усложняет работу рулевой машины, приводит к дополнительному сопротивлению движению судна, снижению его скорости.

В работе [2] выполнена компенсация нелинейной характеристики рулевой машины с помощью интегратора (схема компенсации рассмотрена далее), но не учтено запаздывание. Так как в схеме компенсации интегратор и рулевая машина образуют замкнутый контур, то наличие запаздывания в контуре существенно влияет на динамику этого контура, а значит и на динамику всей системы управления курсом судна. В данной работе приведены результаты исследования путем моделирования в пакете MATLAB-Simulink системы управления курсом судна с учетом нелинейной характеристики рулевой машины и методы корректирования характеристики рулевой машины с учетом запаздывания.

На рис.1 показана упрощенная схема управления курсом судна. Передаточные функции  $W_y(P)$ ,  $W_{uy}(P)$ ,  $W_0(P)$  на рис.1 соответствуют управляющему, исполнительному устройствам и объекту управления. В качестве объекта управления рассмотрим нефтеналивное судно водоизмещением 62000 т.

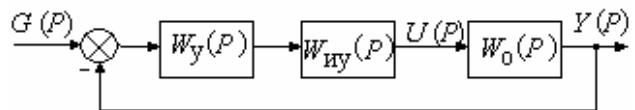


Рис.1. Структурная схема системы управления

Передаточные функции линейной части исполнительного устройства (рулевая машина) и объекта управления [2]

$$W_{uy}(P) = \frac{1 \cdot e^{-P\tau}}{3P + 1}; \quad W_0(P) = \frac{K_o}{P(T_o P + 1)}.$$

Исполнительное устройство является нелинейным звеном со статической характеристикой типа «люфт». Передаточная функция управляющего устройства (авторулевого) может быть представлена в виде

$$W_y(P) = K_y + T_y P,$$

где  $T_y \approx 160$  с, коэффициент  $K_y$  устанавливается вручную при настройке авторулевого в зависимости от условий движения судна (степень загруженности, скорость и др.).

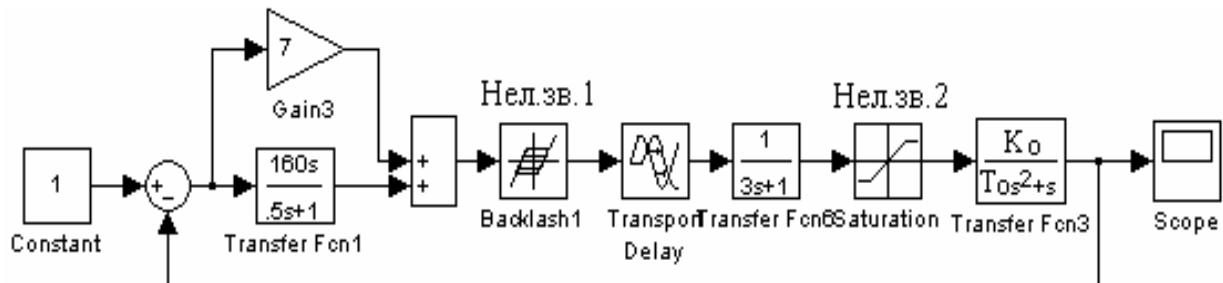


Рис.2. Схема модели системы автоматического управления курсом судна без коррекции нелинейности рулевой машины

Как показано в [2], судно в системе управления является нестационарным объектом. Нестационарные параметры – коэффициент усиления и постоянная времени объекта, значения которых изменяются в диапазоне  $150 \geq T_0 \geq 15$  (с),  $0,012 \leq K_0 \leq 0,12$ . Параметры зависят от скорости движения судна, степени его загрузки, а также от угла поворота пера руля. При увеличении скорости коэффициент усиления  $K_0$  увеличивается, а постоянная времени  $T_0$  уменьшается.

При моделировании системы управления были приняты два варианта предельных значений параметров объекта:  $T_0 = 150$  с,  $K_0 = 0,12$ , что соответствует движению судна с полным грузом и с максимальной скоростью, и  $T_0 = 15$  с,  $K_0 = 0,012$ , (движение судна без груза с максимальной скоростью). Параметры рулевой машины: величина зоны нечувствительности (люфт) – 0,25 о.е., величина запаздывания – 1,6 с.[2].

На рис.2 показана схема модели системы автоматического управления курсом судна без коррекции нелинейности рулевой машины. В модели авторулевого использовано реальное дифференцирующее звено с малой инерционностью (0,5 с.). Такая инерционность практически не влияет на динамические свойства системы, но необходима для моделирования в системе MATLAB-Simulink. Нелинейное звено 1 моделирует нелинейность типа «люфт», звено 2 – конструктивное ограничение угла поворота пера руля. Величина насыщения принята равной  $\pm 1$ , что соответствует предельной величине угла поворота пера руля.

Результаты моделирования приведены на рис.3, где показаны части переходных характеристик в увеличенном масштабе, соответствующие установившемуся режиму

(кривая 1 соответствует движению с полной загрузкой судна; 2 – без груза).

Анализируя кривые 1 и 2 на рис.3, можно сделать следующие выводы:

- 1) динамика системы управления существенно зависит от условий движения объекта;
- 2) в установившемся движении с полной нагрузкой имеют место автоколебания (кривая 1);
- 3) при движении судна без груза (кривая 2) автоколебаний нет, но есть установившаяся статическая ошибка.

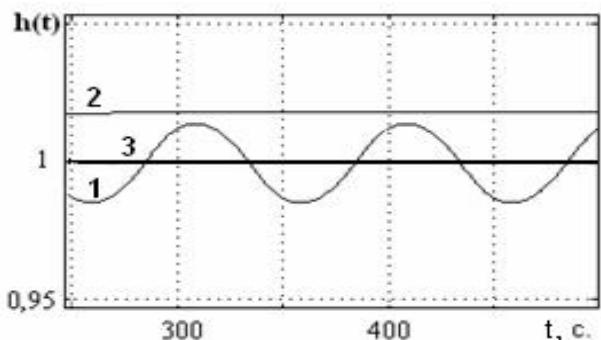


Рис.3. Результаты моделирования САУ курсом судна: 1, 2 – без коррекции нелинейности рулевой машины, 3 – при наличии коррекции

Причиной этих нежелательных явлений является нелинейность статической характеристики рулевого механизма. Отметим, что хотя амплитуда автоколебаний и незначительна (1-1,5 %), тем не менее, автоколебания нежелательны, так как при этом рулевая машина находится постоянно в работе, что приводит к дополнительному расходу энергии и к ускоренному её износу.

В данной работе рассмотрены два метода коррекции нелинейной характеристики рулевой машины: с использованием интегратора [2] и с использованием позиционного

звена с большим коэффициентом усиления [1]. Структурная схема коррекции нелинейной характеристики звена показана на рис.4.

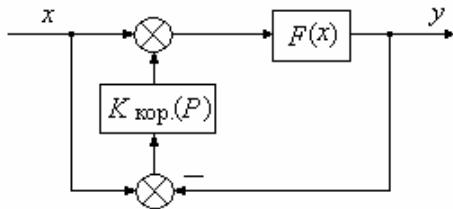


Рис.4. Структурная схема коррекции нелинейного звена

Определим ее передаточную функцию:

$$W(P) = \frac{F(x) + K_{\text{кор}}(P)F(x)}{1 + K_{\text{кор}}(P)F(x)}. \quad (1)$$

1. Моделирование системы управления курсом судна с коррекцией характеристики рулевой машины с использованием интегратора. В этом случае передаточная функция корректирующего звена

$$K_{\text{кор}}(P) = \frac{K_i}{P}. \quad (2)$$

Подставив  $K_{\text{кор}}$  в (1), получим:

$$W(P) = \frac{F(x)\left[\frac{P}{K_i} + 1\right]}{\frac{P}{K_i} + F(x)}.$$

Значение этой передаточной функции в установившемся режиме при постоянном входном сигнале определится, если подставить  $P = 0$ . Тогда она равна единице и не зависит от  $F(x)$ . Схема модели системы управления курсом судна с коррекцией характеристики рулевой машины приведена на рис.5. Результат моделирования показан

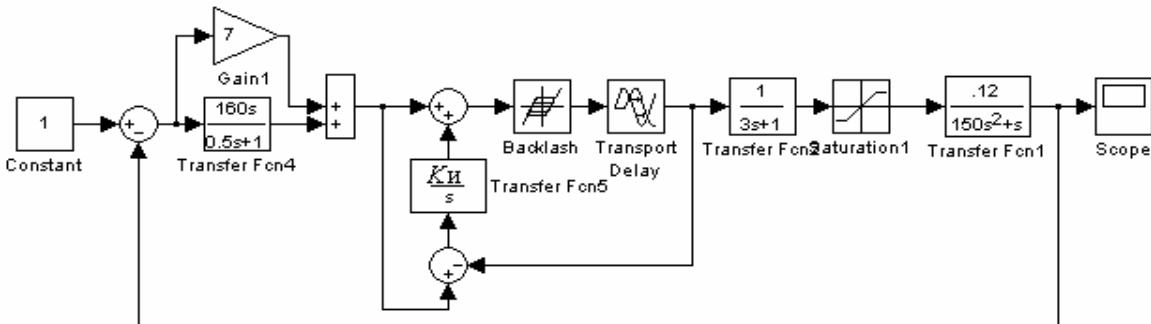


Рис.5. Схема модели с коррекцией характеристики рулевой машины интегратором

на рис.6. и рис.3. Как видно из приведенных зависимостей, автоколебания в системе с коррекцией отсутствуют.

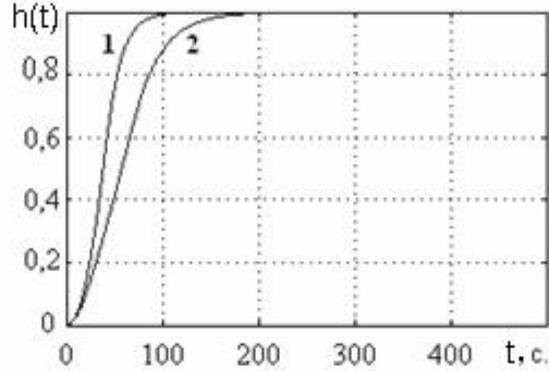


Рис.6. Результаты моделирования системы с коррекцией характеристики рулевой машины: 1 – движение с полной нагрузкой; 2 – движение без груза

При моделировании был определен диапазон значений коэффициента усиления интегратора, при котором в системе отсутствуют автоколебания:  $0,2 \leq K_i \leq 0,4$ . При моделировании выяснило, что при  $K_i < 0,2$  интегратор не полностью компенсирует люфт рулевой машины и в системе управления появляются автоколебания. Если  $K_i > 0,4$ , то возбуждается контур, образуемый рулевой машиной и интегратором в результате наличия в контуре запаздывания, что приводит к колебаниям всей системы управления.

2. Моделирование системы управления курсом судна с коррекцией характеристики рулевой машины с помощью апериодического звена первого порядка [1]. В этом случае передаточная функция корректирующего звена

$$K_{\text{кор}}(P) = \frac{K_k}{T_k P + 1}. \quad (3)$$

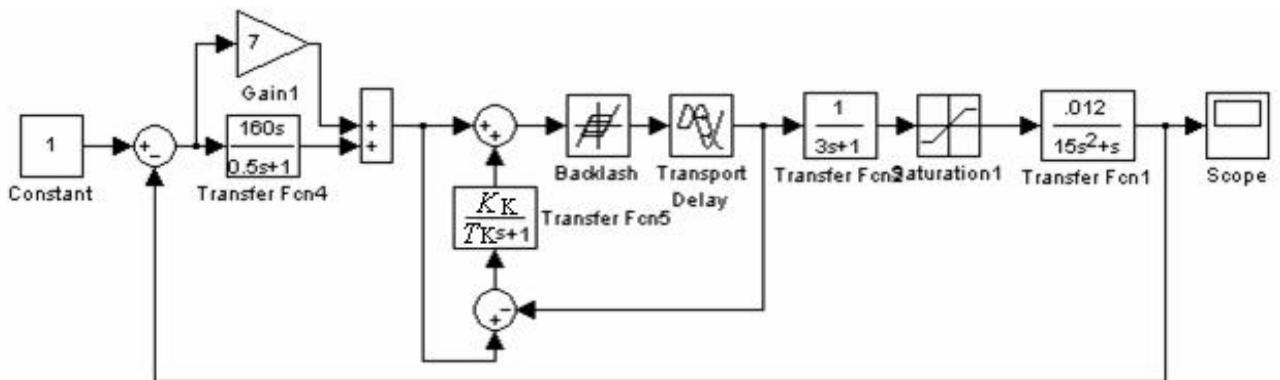


Рис.7. Схема модели с коррекцией характеристики рулевой машины инерционным звеном

Подставив (3) в (1), получим:

$$W(P) = \frac{F(x) \left( \frac{T_K P + 1}{K_K} + 1 \right)}{\frac{T_K P + 1}{K_K} + F(x)}.$$

Устремив  $K_K$  в бесконечность в пределе будем иметь:  $W(P) = 1$  и не зависит от  $F(x)$ . Как показали результаты исследований, компенсация нелинейной характеристики достигается при значениях коэффициента усиления  $K_K \geq 5$ . Ввиду наличия в внутреннем замкнутом контуре запаздывания, при увеличении коэффициента усиления сверх некоторого предела система становится неустойчивой. Чтобы обеспечить устойчивость системы при достаточно большом коэффициенте усиления в контур вводится инерционное звено (постоянная времени  $T_K$ ) [1]. Схема модели показана на рис.7.

Результат моделирования (рис.6) полностью совпадает с результатом моделирования системы по схеме рис.5. При моделировании определены диапазоны значений параметров корректирующего звена – коэффициента усиления  $K_K$  и постоянной времени  $T_K$ , при которых автоколебания в системе отсутствуют:  $5 \leq K_K \leq 25$ ,  $15 \leq T_K \leq 70$ .

**Выводы.** Введение в систему автоматического управления курсом судна устройства коррекции нелинейной характеристики рулевой машины обеспечивает отсутствие в системе автоколебаний. Схема коррекции нелинейной характеристики может быть построена с использованием интегратора либо инерционного звена первого порядка. Использование инерционного звена проще при настройке системы, так как диапазон значе-

ний параметров звена, при котором автоколебания отсутствуют, значительно больше, чем диапазон значений коэффициента усиления интегратора.

#### Список использованной литературы

- Бобриков С.А. Коррекция характеристик элементов системы управления / С.А.Бобриков, Е.Д.Пичугин // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы / Херсонский госуд. Техн. ун-т. – Херсон: – 2003. – № 1(11). – С.10-14.
- Кринецкий И.И. Исследование автоматического управления курсом судна с учетом нелинейных характеристик системы / И.И.Кринецкий, Е.Д.Пичугин // Судовождение и связь. Труды ЦНИИ морского флота. – Л.: Транспорт. – 1967. – № 83. – С.13-16.

Получено 16.02.2011



Бобриков  
Сергей Александрович,  
доц. кафедры  
«Компьютеризир. системы  
управл.» Одесск. нац.  
политехн. ун-та  
тел. (0482) 688770



Пичугин  
Евгений Дмитриевич,  
проф. кафедры  
«Компьютеризир. системы  
управл.» Одесск. нац.  
политехн. ун-та  
тел. (048) 7778045