

УДК 62-50

С. А. Бобриков, Е. Д. Пичугин, кандидаты техн. наук

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

**Аннотация.** 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.

С. О. Бобриков, Є. Д. Пічугін, кандидаты техн. наук

### КОРЕКЦІЯ НЕЛІНІЙНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУЛЬОВОЇ МАШИНИ З УРАХУВАННЯМ ЗАПІЗНЮВАННЯ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ КУРСОМ МОРСЬКОГО СУДНА

**Анотація.** 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.

S. A. Bobrikov, E. D. Pichugin, PhD

### CORRECTION OF THE NONLINEAR CHARACTERISTIC STEERING APPARATUS WITH THE DELAY IN THE CONTROL RATE OF SEA VESSEL

**Abstract.** 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  $W_y(P)$ ,  $W_{иу}(P)$ ,  $W_0(P)$  на рис.1 соответствуют управляющему, исполнительному устройствам и объекту управления. В качестве объекта управления рассмотрим нефтеналивное судно водоизмещением

62000 т.

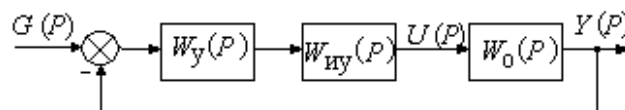


Рис.1. Структурная схема системы управления

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

$$W_{\text{иу}}(P) = \frac{1 \cdot e^{-P\tau}}{3P + 1}; \quad W_0(P) = \frac{K_0}{P(T_0P + 1)}$$

Исполнительное устройство является нелинейным звеном со статической характеристикой типа «люфт». Передаточная функция управляющего устройства (авторулевой) 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.).

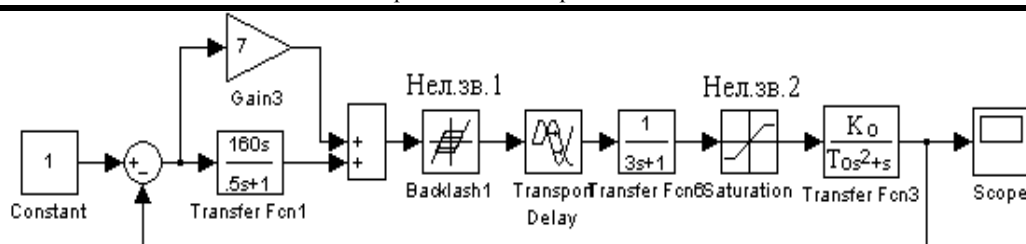


Рис.2. Схема модели системы автоматического управления курсом судна без коррекции нелинейности рулевой машины

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», нелинейное 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.

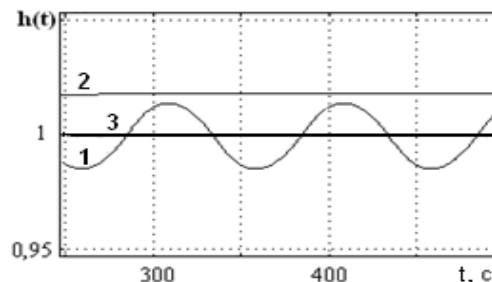


Рис.3. Результаты моделирования САУ курсом судна: 1, 2 – без коррекции нелинейности рулевой машины, 3 – при наличии коррекции

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.

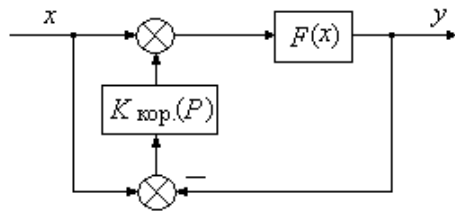


Рис.4. Структурная схема коррекции нелинейного звена

Определим ее передаточную функцию:

$$W(P) = \frac{F(x) + K_{\dot{\epsilon}}(P)F(x)}{1 + K_{\dot{\epsilon}}(P)F(x)} \quad (1)$$

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

$$K_{\dot{\epsilon}}(P) = \frac{K_{\dot{\epsilon}}}{P} \quad (2)$$

Подставив  $K_{\dot{\epsilon}}(P)$  в (1), получим:

$$W(P) = \frac{F(x) \left[ \frac{P}{K_{\dot{\epsilon}}} + 1 \right]}{\frac{P}{K_{\dot{\epsilon}}} + F(x)}$$

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 и использованием интегратора приведена на рис.5. Результат моделирования показан

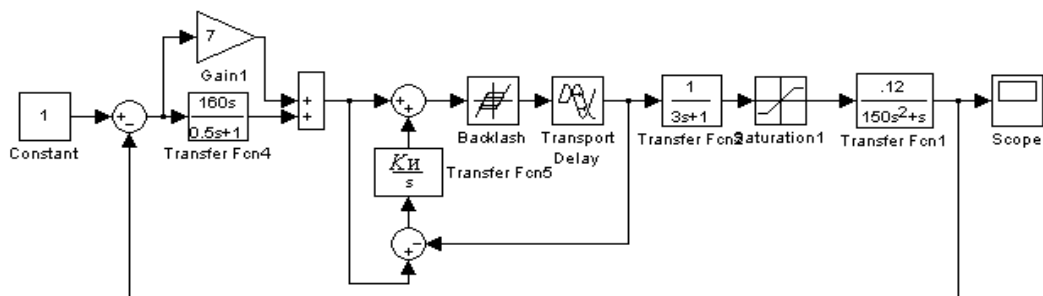


Рис.5. Схема модели с коррекцией характеристики рулевой машины интегратором

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

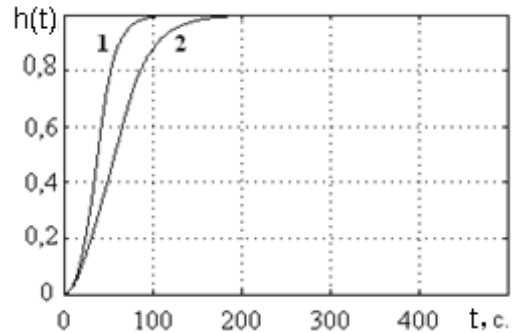


Рис.6. Результаты моделирования системы с коррекцией характеристики рулевой машины: 1 – движение с полной нагрузкой; 2 – движение без груза

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 выяснено, 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

$$K_{\dot{\epsilon}}(P) = \frac{K_{\dot{\epsilon}}}{T_{\dot{\epsilon}}P + 1} \quad (3)$$

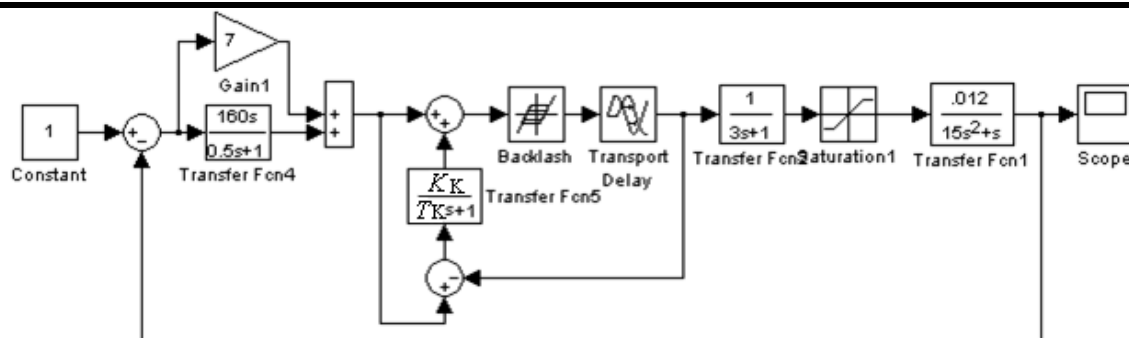


Рис.7. Схема модели с коррекцией характеристики рулевой машины инерционным звеном

Подставив (3) в (1), получим:

$$W(P) = \frac{F(x) \left( \frac{T_{\dot{e}} P + 1}{K_{\dot{e}}} + 1 \right)}{\frac{T_{\dot{e}} P + 1}{K_{\dot{e}}} + F(x)}$$

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 значений параметров звена, при котором автоколебания отсутствуют, значительно больше,

чем диапазон значений коэффициента усиления интегратора.

#### Список использованной литературы

1. 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.
2. 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