

УДК 62-50

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

КОМПЕНСАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА

Аннотация. Исследована путем моделирования система компенсации волновых возмущений при управлении морским судном. Волновые возмущения измеряются сопоставлением курса судна с сигналом на выходе модели системы автоматического управления. Показана возможность существенного уменьшения влияния волновых возмущений на курс судна.

Ключевые слова: волновые возмущения, система компенсации волновых возмущений, модель системы автоматического управления.

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

COMPENSATION OF WAVE DISTURBANCES IN THE SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF SHIP COURSE

Abstract. The system of indemnification of wave indignations is investigational by a design at a management a marine ship. Wave indignations are measured by comparing of course of ship to the signal on the output of model of the system of automatic control. Possibility of the substantial diminishing of influence of wave indignations is shown on the course of ship.

Keywords: wave indignations, system of indemnification of wave indignations, model of the system of automatic control.

С.А.Бобриков, Є.Д. Пічугін, кандидати техн. наук

КОМПЕНСАЦІЯ ХВИЛЬОВИХ ЗБУРЕНЬ В СИСТЕМІ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ КУРСОМ СУДНА

Анотація. Досліджено шляхом моделювання система компенсації хвильових збурень при управлінні морським судном. Хвильові збурення вимірюються зіставленням курсу судна з сигналом на виході моделі системи автоматичного управління. Показано можливість істотного зменшення впливу хвильових збурень на курс судна.

Ключові слова: хвильові збурення, система компенсації хвильових збурень, модель системи автоматичного управління.

Волны на поверхности моря и ветер могут оказывать существенное возмущающее воздействие на систему управления курсом судна. Уменьшение влияния возмущений на курс судна может быть получено, если в системе автоматического управления наряду с принципом управления по отклонению использовать принцип управления по возмущающему воздействию (комбинированная система управления).

Для построения канала управления по возмущающему воздействию необходимо иметь возможность его измерить, что практически представляет серьезную проблему. Один из возможных методов получения сигнала, пропорционального возмущающему воздействию, описан в [1]. Метод основан на том, что используется модель системы управления, сигнал на выходе которой сравнивается с выходным сигналом системы управления. Разность двух сигналов (на выходе модели и на выходе системы) подается

на вход компенсирующего устройства. Последнее включено в цепь компенсации возмущений.

В данной работе проведено исследование путем моделирования в пакете MATLAB-Simulink системы автоматического управления (САУ) курсом судна с компенсацией возмущений. Измерение возмущающих воздействий со стороны волн и ветра осуществляется с помощью модели САУ. Разность двух сигналов (модели и реального курса) через компенсирующее звено подается на вход исполнительного механизма (рулевая машина) с тем, чтобы влияние возмущений на курс судна было минимальным.

Отметим, что в самом принципе измерения возмущения подобным образом заложена невозможность получить, полную компенсацию возмущающего воздействия, так как при отсутствии отклонений от заданного курса нет разности между выходными сигналами САУ и модели и сигнал в компенсирующей цепи равен нулю. Однако, как по-

© Бобриков С.А., Пичугин Е.Д., 2012

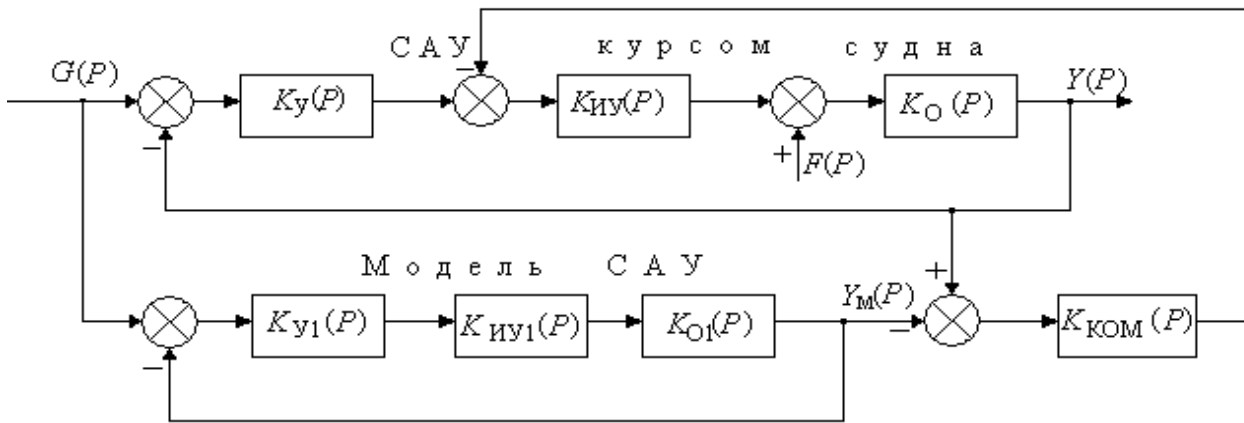


Рис. 1. Структурная схема САУ курсом судна

казали результаты исследований, используя этот принцип управления, можно получить существенное уменьшение влияния возмущающих воздействий на курс судна.

На рис. 1 показана структурная схема САУ курсом судна с компенсацией возмущающего воздействия – $F(P)$. Измерение возмущающего воздействия осуществляется путем сравнения сигналов на выходе САУ – $Y(P)$ и на выходе модели – $Y_M(P)$. Задающим входным воздействием является сигнал $G(P)$. Передаточные функции $K_y(P)$, $K_{иу}(P)$, $K_o(P)$ на рис. 1 соответствуют управляющему, исполнительному устройству и объекту управления. Передаточные функции звеньев модели равны соответствующим передаточным функциям САУ:

$$K_{y1}(P) = K_y(P), \quad K_{иу1}(P) = K_{иу}(P), \\ K_{o1}(P) = K_o(P).$$

В качестве объекта управления принято нефтеналивное судно водоизмещением 62000 т. Передаточные функции линейной части исполнительного устройства (рулевая машина) и объекта управления имеют вид [4]:

$$K_{\text{Б0}}(P) = \frac{1 \cdot e^{-P\tau}}{3P + 1}; \quad K_o(P) = \frac{K_o}{(T_o P + 1)P}.$$

Передаточная функция управляющего устройства (авторулевой) может быть представлена в виде $K_y(P) = 7 + 160P$.

Исполнительное устройство является нелинейным звеном со статической характеристикой типа «люфт» и с запаздыванием $\tau = 1,6$ с. Нелинейность может быть ском-

пенсирована [2] и в данной работе не рассматривается.

Как показано в [4], судно в системе управления является нестационарным объектом. Нестационарные параметры – постоянная времени объекта и коэффициент усиления. Их значения изменяются в диапазоне $150 \geq T_o \geq 15(\text{с})$, $1,2 \times 10^{-2} \leq K_o \leq 12 \times 10^{-2}$. Параметры зависят от скорости судна, степени его загрузки, а также от угла поворота пера руля. При увеличении скорости коэффициент усиления K_o увеличивается, а постоянная времени T_o уменьшается. При моделировании системы управления были приняты два варианта предельных значений параметров объекта: $T_o = 150$ с, $K_o = 12 \times 10^{-2}$ (соответствует движению судна с полным грузом и с максимальной скоростью) и $T_o = 15$ с, $K_o = 1,2 \times 10^{-2}$ (движение судна без груза с максимальной скоростью).

В соответствии со структурной схемой рис. 1, используя формулу Мейсона [5], определим зависимость выходной величины системы $Y(P)$ от внешних сигналов и $Y_M(P)$:

$$Y(P) = G(P)W_1(P) + F(P)W_2(P) - [Y(P) - Y_M(P)]W_3(P), \quad (1)$$

где

$$W_1(P) = \frac{K_y(P)K_{иу}(P)K_o(P)[1 + W_{к1}(P)]}{\Delta(P)} =$$

$$= \frac{Y(P)}{G(P)},$$

$$W_2(P) = \frac{K_o(P)[1 + W_{к1}(P)]}{\Delta(P)} = \frac{Y(P)}{F(P)},$$

$$W_3(P) = \frac{K_{\text{КОМ}}(P)K_{\text{ИУ}}(P)K_O(P)[1+W_{K1}(P)]}{\Delta(P)} =$$

$$= \frac{Y(P)}{Y(P)-Y_M(P)},$$

$$\Delta(P) = 1 + W_K(P) + W_{K1}(P) + W_{K2}(P) +$$

$$+ W_K(P)W_{K1}(P) + W_{K1}(P)W_{K2}(P),$$

$$W_K(P) = K_Y(P)K_{\text{ИУ}}(P)K_O(P),$$

$$W_{K1}(P) = K_{Y1}(P)K_{\text{ИУ}1}(P)K_{O1}(P),$$

$$W_{K2}(P) = K_{\text{КОМ}}(P)K_{\text{ИУ}}(P)K_O(P).$$

Приняв условие, что задающее воздействие равно нулю, имеем $G(P)=0$, $Y_M(P)=0$. Подставив эти значения в (1), определим

$$Y(P) = F(P) \frac{W_2(P)}{1+W_3(P)}. \quad (2)$$

Подставив передаточные функции $W_2(P)$ и $W_3(P)$ в (2), после преобразований получим

$$Y(P) =$$

$$= \frac{F(P)K_O(P)[1+W_{K1}(P)]}{\Delta(P) + K_{\text{КОМ}}(P)K_{\text{ЕО}}(P)K_O(P)[1+W_{K1}(P)]}.$$

Из последнего выражения видно, что компенсирующее устройство влияет на зависимость выходной величины $Y(P)$ от возмущающего воздействия $F(P)$. Предположим, что $K_{\text{КОМ}}(P)=K=\infty$, тогда выходная величина не будет зависеть от возмущающего воздействия. Отсюда можно сделать вывод, что чем больше коэффициент усиления компенсирующего звена, тем меньше выходная величина зависит от возмущающего воздействия.

Компенсирующее устройство вместе с исполнительным и объектом управления образуют замкнутый контур, поэтому его передаточная функция должна быть такой, чтобы при максимально возможной величине коэффициента усиления не были нарушены условия устойчивости. Как показано в [3], при наличии в системе запаздывания управляющее (корректирующее) устройство следует выбирать таким, чтобы выполнялось условие

$$W_{K2}(P) = \frac{Ke^{-P\tau}}{P}. \quad (3)$$

Подставив в (3) $W_{K2}(P)$ из (1), получим

$$K_{\text{ЕИ}}(P)K_{\text{ЕО}}(P)K_O(P) = \frac{Ke^{-P\tau}}{P}.$$

Из последнего равенства определим передаточную функцию компенсирующего устройства

$$K_{\text{КОМ}}(P) = \frac{Ke^{-P\tau}}{PK_{\text{ИМ}}(P)K_O(P)} = \quad (4)$$

$$= \frac{Ke^{-P\tau}(3P+1)(T_O P+1)P}{Pe^{-P\tau}K_O} = \frac{K(3P+1)(T_O P+1)}{K_O}.$$

Рассмотрим случай, когда судно идет с полной нагрузкой и с максимальной скоростью. Подставив в (4) параметры объекта, соответствующие этому режиму работы,

$$K_{\text{ЕИ}}(P) = \frac{K}{0,12}(3P+1)(150P+1). \quad (5)$$

Последнее звено в виде (5) не может быть реализовано. Для выполнения реального устройства в знаменатель передаточной функции должны быть введены дополнительные, малые по величине постоянные времени, с тем, чтобы степень числителя была не больше степени знаменателя. С учетом условия реализуемости принимаем

$$K_{\text{ЕИ}}(P) = \frac{K(3P+1)(150P+1)}{0,12(0,1P+1)(0,1P+1)}.$$

Ввиду наличия запаздывания (рулевая машина) в замкнутом контуре, образуемом компенсирующим звеном, рулевой машиной и объектом, при определенной величине коэффициента усиления контур становится неустойчивым и в нём возникают автоколебания. Очевидно, коэффициент усиления в контуре не должен превышать критического значения.

Определим критическое значение коэффициента усиления $K_{\text{кр}}$ контура. Для этого воспользуемся логарифмическими частотными характеристиками.

Передаточная функция разомкнутого контура компенсации

$$W_{K2}(P) = K_{\text{КОМ}}(P)K_{\text{ИУ}}(P)K_O(P). \quad (6)$$

Подставив передаточные функции звеньев в (6), получим

$$W_{K2}(P) = \frac{Ke^{-1,6P}}{(0,1P+1)(0,1P+1)P}.$$

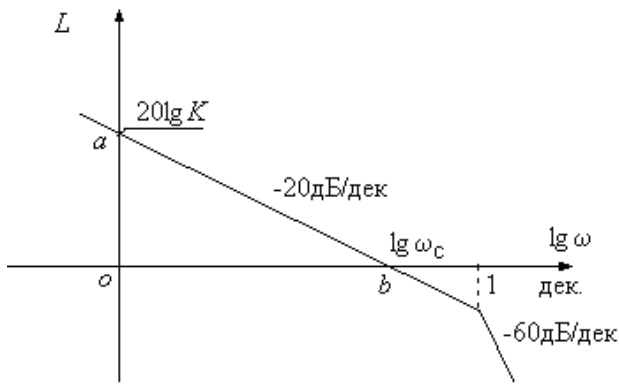


Рис. 2. Асимптотическая ЛАЧХ

Рассмотрим асимптотическую ЛАЧХ этого контура (рис. 2). Линия *ab*, соответствующая интегрирующему звену, имеет наклон -20 дБ/дек, откуда следует

$$\frac{-20 \lg K}{\lg \omega_c} = -20, \quad K = \omega_c.$$

Определим значение фазовой характеристики на частоте среза ω_c

$$\varphi(\omega_c) = -\frac{\pi}{2} - \omega_c \tau - 2 \arctg 0,1 \omega_c. \quad (7)$$

Учитывая, что $\omega_c < 10$ (рис. 2), имеем $0,1 \omega_c < 1$. Предварительно будем считать, что $0,1 \omega_c \leq 0,1$. Тогда (7) можно представить следующим образом

$$\varphi(\omega_c) = -\frac{\pi}{2} - \omega_c \tau - 0,2 \omega_c. \quad (8)$$

Контур будет находиться на границе устойчивости, если $\varphi(\omega_c) = -\pi$. Подставив это значение в (8), а также приняв условие $\omega_c = K = K_{кр}$, получим

$$-\frac{\pi}{2} = -K_{кр} \tau - 0,2 K_{кр},$$

откуда следует

$$K_{кр} = \frac{1,57}{\tau + 0,2} = \frac{1,57}{1,6 + 0,2} = 0,87.$$

Для уточнения полученного значения $K_{кр}$ подставим его в (7)

$$\varphi(\omega_c) = -\frac{\pi}{2} - \omega_c \tau - 2 \arctg 0,1 \omega_c = -1,57 - 0,87 \times 1,6 - 2 \arctg 0,087 = -3,1355 \approx -\pi.$$

Таким образом, принимаем $K_{кр} = 0,87$. Для исключения автоколебаний следует принять величину $K < K_{кр}$. Принимаем $K = (0,5 \dots 0,8) K_{кр}$. При этом коэффициент усиления корректирующего звена

$$K_{кр} = \frac{(0,5 \div 0,8) 0,87}{0,12} = 3,6 \div 5,8.$$

При моделировании принята величина $K_{ком} = 5$.

На рис. 3 приведена схема набора модели САУ в пакете MATLAB–Simulink. В качестве возмущающего воздействия принят синусоидальный сигнал с частотой $0,1$ рад/с и амплитудой $0,4$. На рис. 4 приведены результаты моделирования САУ для движения судна с полной нагрузкой и максимальной скоростью. Параметры компенсирующей цепи установлены в соответствии с расчетными. На рис. 5 приведены результаты моделирования для движения судна без груза с полной скоростью. При этом параметры компенсирующей цепи не изменены.

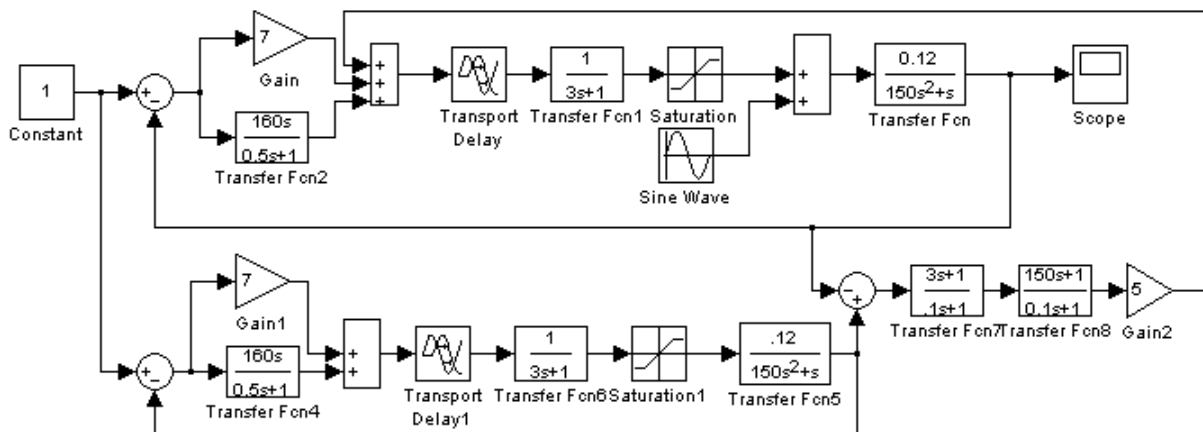


Рис. 3. Схема моделирования САУ в пакете MATLAB–Simulink

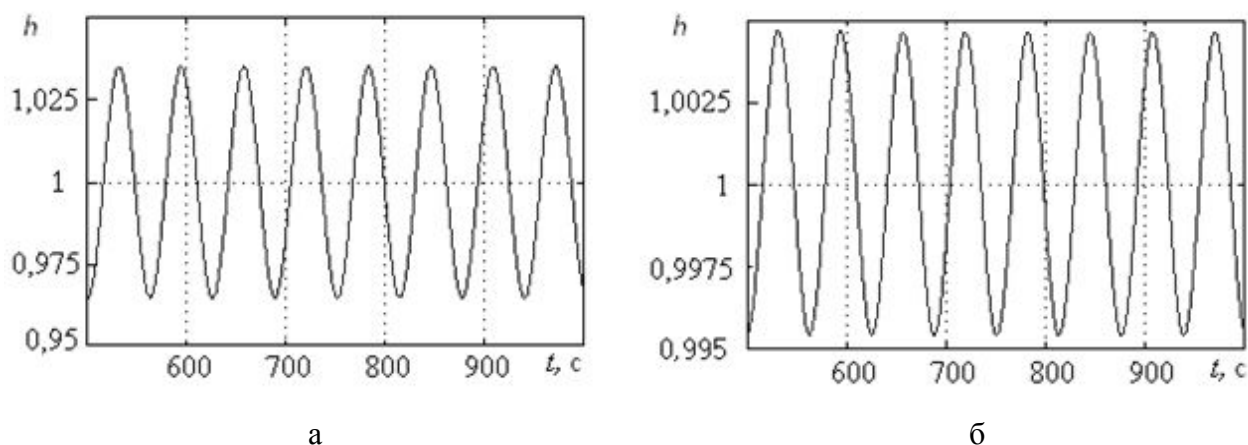


Рис. 4. Результаты моделирования движения судна с полной нагрузкой и максимальной скоростью:

а – без компенсации возмущений; б – с компенсацией возмущений

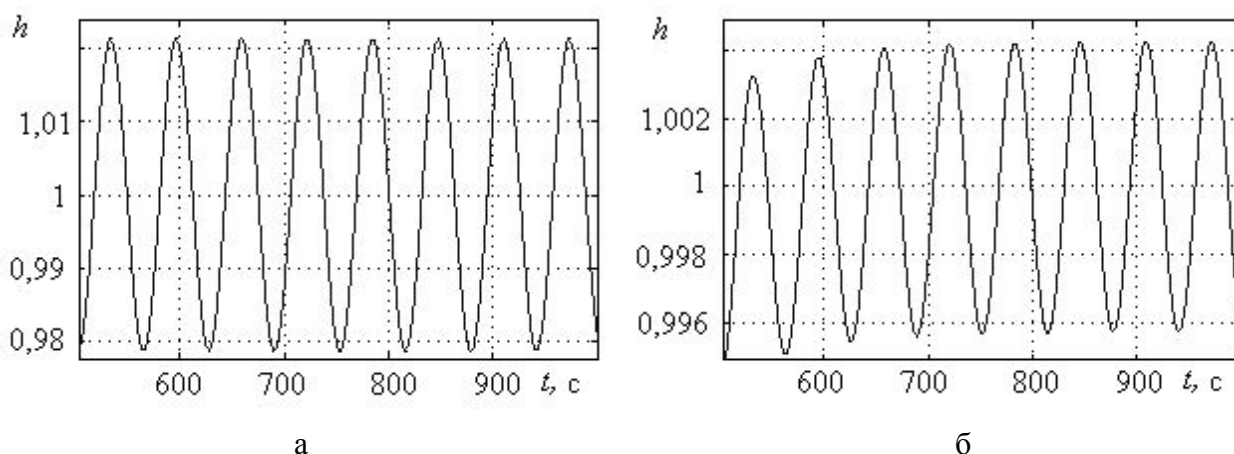


Рис. 5. Результаты моделирования для движения судна без груза с максимальной скоростью:

а – без компенсации возмущений; б – с компенсацией возмущений

Оценивая кривые на рис. 4 и 5 можно сделать выводы о степени снижения влияния волновых возмущений на курс судна. В первом случае уменьшение амплитуды колебаний равно примерно 10, во втором – 7-8.

Выводы. Для уменьшения влияния волновых колебаний на курс судна может быть использован принцип управления по возмущающему воздействию с измерением возмущений, путем сравнения истинного курса судна с сигналом на выходе модели системы управления. Компенсирующее устройство должно быть настроено на режим для работы системы управления курсом судна. Система компенсации при других режимах движения судна работает менее эффективно, но положительный эффект имеет место.

Список использованной литературы

1. Бобриков С.А. Управление по возмущающему воздействию с измерением возмущений по модели системы управления / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К.: Техника. – 2011. – № 04(80). – С. 15–18.
2. Бобриков С.А. Коррекция нелинейной характеристики рулевой машины с учетом запаздывания в системе управления курсом морского судна / С.А.Бобриков, Е.Д.Пичугин // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К.: Техника. – 2011. – № 02(78). – С.26–29.

3. Бобриков С.А. Оптимальная настройка цифрового регулятора для объекта высокого порядка с запаздыванием / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // *Электромашиностроение и электрооборудование*. – К.: Техніка. – 2010. – № 75. – С.57–61.

4. 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.

5. Теория автоматического управления.. / Теория линейных систем автоматического управления. Ч.1. [Н.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А. Воронова и др.]; под ред. А.А.Воронова. – [2-е изд.]. – М.: Высш. шк., 1986. – 367 с.

5. Babakov N.A., Voronov A.A., Voronova A.A. and others. The theory of automatic control / The theory of linear control systems // Edited A.A.Voronova. – [2nd ed.]. – Moscow: – Higher School. – Part 1, 1986. – 367 p. [in Russian].



Бобриков
Сергей Александрович,
доц.каф.компьют. систем
управл. Одесского нац.
политехн. ун-та,
т: (0482) 68-87-70



Пичугин
Евгений Дмитриевич,
проф. каф.компьют.систем
управл.Одесск.нац. поли-
техн. ун-та,
т: (048)-777-80-45

Получено 16.02.2012

References

1. Bobrykov S. A., Pichugin E.D. Office of the import-muschayuschemu exposed to the measurement of vvozmuscheny model management / *Electrotechnology and computer systems*. – Kiev: – Technika. – 2011. № 04(80). – P. 15–18 [in Russian].

2. Bobrykov S.A., Pichugin E.D. Correction of the nonlinear characteristics of the steering apparatus, taking into account the delay in the management of the course the ship / *Electrical and computer system theme*. – Kiev: Technika. – 2011. – № 02(78). – P.26–29 [in Russian].

3. Bobrykov S.A., Pichugin E.D. The optimal configuration of digital controller for an object-order with delay / *Electrical machinery and electrical equipment*. – Kiev: Technika. – 2010. – № 75. – P.57–61 [in Russian].

4. Krinetsky I.I., Pichugin E.D. Investigation of automatic control of the vessel taking into account the rate of non-linear characteristics of the system / *Sudovozh-assertion and communication*. – Proceedings of the Central Research Institute of Marine flota. – Leningrad: – Transport. – 1967. – № 83. – P.13–16 [in Russian].