

УДК 656.61.052.4 : 656.61.052.7

Способ управления судном при выполнении им швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре

Ю.И. Юдин, С.О. Петров, С.Н. Холичев

Морская академия МГТУ, кафедра судовождения

Аннотация. Предложен способ управления судном при выполнении им швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре, с применением современных компьютерных технологий на базе используемых в судовождении технических средств.

Abstract. The method of steering the vessel during mooring operations to another vessel at anchor has been proposed. Some modern computer technologies based on present aids used in navigation have been applied.

Ключевые слова: безопасная швартовка; судно, стоящее на якоре; способы швартовки; швартовные маневры; подход к борту судна

Key words: safe mooring, vessel at anchor, mooring methods, mooring maneuvers, approach to vessel

1. Введение

Проведенный анализ описания поведения судна, стоящего на якоре, а также способов выполнения швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре, дает основания сделать вывод о необходимости совершенствования способов и методов осуществления указанной операции.

Судоводитель, управляющий швартующимся судном, должен непрерывно контролировать текущее состояние трёх взаимодействующих систем – внешней среды, собственного судна и судна, стоящего на якоре, к борту которого осуществляется швартовка, а также прогнозировать характер протекания динамических процессов в этих системах. Это значит, что судоводитель должен непрерывно получать и оценивать огромное количество информации о состоянии всех контролируемых систем. На основании этого он должен непрерывно принимать решения, касающиеся характера действий швартующегося судна, что прежде всего относится к управлению основными параметрами движения судна (курс, скорость).

Эффективность швартовной операции в указанных условиях во многом зависит от уровня профессиональных знаний и практического опыта судоводителя, управляющего швартующимся судном. Однако не всегда профессиональных знаний и практического опыта оказывается достаточно, чтобы безопасно выполнить такое сложное маневрирование, как швартовная операция к борту судна, стоящего на якоре. Необходимо признать: в рассматриваемых условиях осуществление безопасного маневрирования возможно только в том случае, когда большая часть информационной нагрузки судоводителя будет с него снята за счёт использования современных информационных технологий, в частности компьютерных. В статье предлагается новый способ управления движением судна, которое осуществляет выполнение швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре.

2. Способ швартовки к судну, стоящему на якоре

Для решения задач, связанных с совершенствованием способов и методов выполнения швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре, на наш взгляд, прежде всего следует обратить внимание на методы и способы применения современных компьютерных технологий на базе существующих технических средств, используемых в судовождении. В данном случае имеются в виду судовые технические средства, позволяющие осуществлять непрерывный контроль за основными кинематическими и динамическими параметрами движения судна и управлять им в соответствии с заданными сигналами управления, рассчитываемыми по установленному алгоритму, исходя из складывающихся в процессе маневрирования обстоятельств.

Основными техническими средствами в предлагаемом нами способе управления являются:

- приёмники спутниковой навигационной системы (СНС), установленные в двух разнесённых по длине судна точках и определяющие текущие координаты последних;
- бортовой компьютер, обеспечивающий обработку информации, поступающей с приёмников СНС и определяющий параметры сигнала управления;
- судовые средства управления движением швартующегося судна, осуществляющие управление им в заданном режиме движения.

Суть предлагаемого способа управления судном при выполнении им швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре, заключается в следующем.

Сигнал управления движением швартуемого судна формируется исходя из величин поперечных смещений расположенных на его диаметральной плоскости носовой A и кормовой B точек от текущего положения траектории сближения (рис. 1, 3).

Для вычисления поперечных смещений носовой A и кормовой B точек швартуемого судна их координаты в неподвижной координатной системе $A(X_{0A}, Y_{0A}), B(X_{0B}, Y_{0B})$ измеряют с помощью спутниковой навигационной системы с дифференциальными поправками; перекладку руля судна производят в зависимости от комбинации поперечных смещений носовой d_A и кормовой d_B точек швартуемого судна относительно текущего положения траектории сближения, которое определяют используя заданную точку как объект, с которым происходит сближение швартуемого судна и его центр тяжести (рис. 2). Текущие положения заданной точки и центра тяжести швартуемого судна определяют положение траектории сближения, проходящей через две точки в виде прямой линии, которая соединяет текущее положение заданной точки и центра тяжести швартуемого судна G . Текущие координаты его центра тяжести в неподвижной координатной системе рассчитывают по формулам:

$$\begin{aligned} Y_{0G} &= Y_{0A} - [(Y_{0A} - Y_{0B}) \times (X_A - X_G)] / (X_A - X_B); \\ X_{0G} &= X_{0A} - [(X_{0A} - X_{0B}) \times (X_A - X_G)] / (X_A - X_B), \end{aligned} \quad (1)$$

где X_{0G}, Y_{0G} – координаты центра тяжести швартуемого судна в неподвижной координатной системе; X_{0A}, Y_{0A} – координаты точки A в неподвижной координатной системе; X_{0B}, Y_{0B} – координаты точки B в неподвижной координатной системе; X_A, X_B – абсцисса носовой и кормовой точек швартуемого судна соответственно, в координатной системе (X, Y) , связанной с судном; X_G – абсцисса центра тяжести швартуемого судна в координатной системе, связанной с судном, текущие координаты заданной точки определяют с помощью спутниковой навигационной системы с дифференциальными поправками.

Текущие координаты заданной точки определяют с помощью спутниковой навигационной системы с дифференциальными поправками.

Затем определяют с помощью СНС с дифференциальными поправками координаты носовой $A_n(X_{0An}, Y_{0An})$ и кормовой $B_n(X_{0Bn}, Y_{0Bn})$ точек, расположенных на диаметральной плоскости судна, стоящего на якоре в неподвижной координатной системе, рассчитывают:

– координаты центра тяжести судна, стоящего на якоре $G_n(X_{0Gn}, Y_{0Gn})$, в неподвижной координатной системе по формулам:

$$\begin{aligned} Y_{0Gn} &= Y_{0An} - [(Y_{0An} - Y_{0Bn}) \times (X_{An} - X_{Gn})] / (X_{An} - X_{Bn}); \\ X_{0Gn} &= X_{0An} - [(X_{0An} - X_{0Bn}) \times (X_{An} - X_{Gn})] / (X_{An} - X_{Bn}), \end{aligned} \quad (2)$$

где X_{0Gn}, Y_{0Gn} – координаты центра тяжести судна, стоящего на якоре, в неподвижной координатной системе; X_{0An}, Y_{0An} – координаты точки A_n в неподвижной координатной системе; X_{0Bn}, Y_{0Bn} – координаты точки B_n в неподвижной координатной системе; X_{An}, X_{Bn} – абсцисса носовой и кормовой точек судна, стоящего на якоре, соответственно, в координатной системе (X_n, Y_n) , связанной с судном, стоящим на якоре; X_{Gn} – абсцисса центра тяжести судна, стоящего на якоре, в координатной системе, связанной с судном, стоящим на якоре;

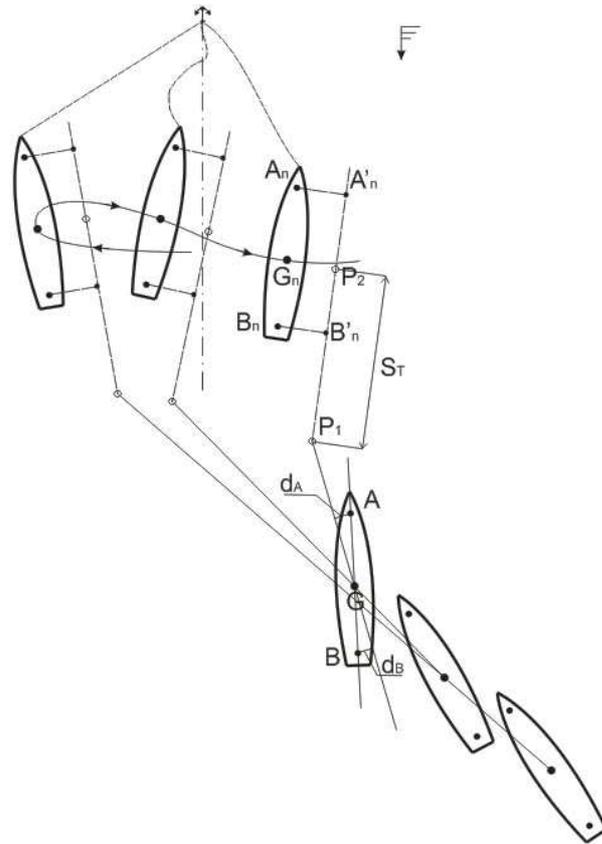
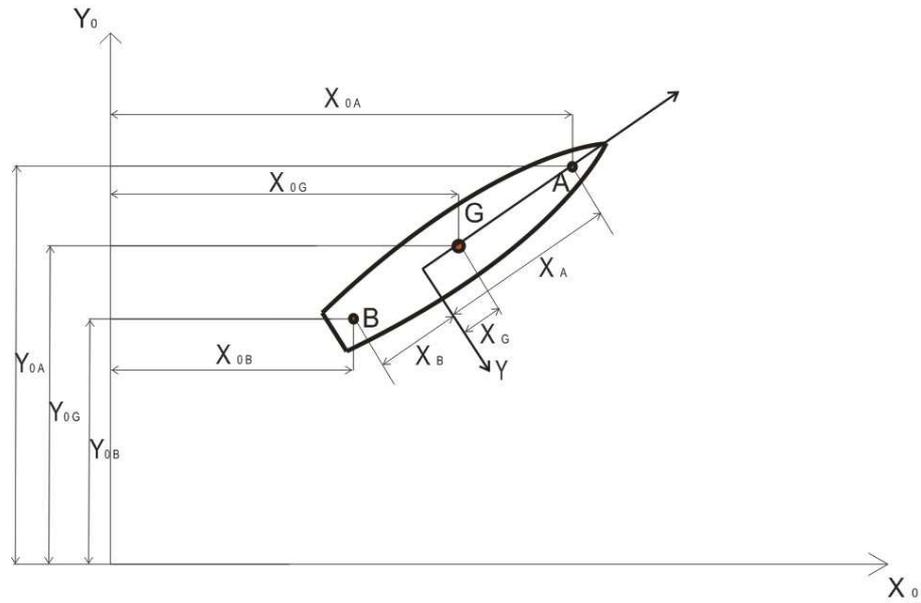
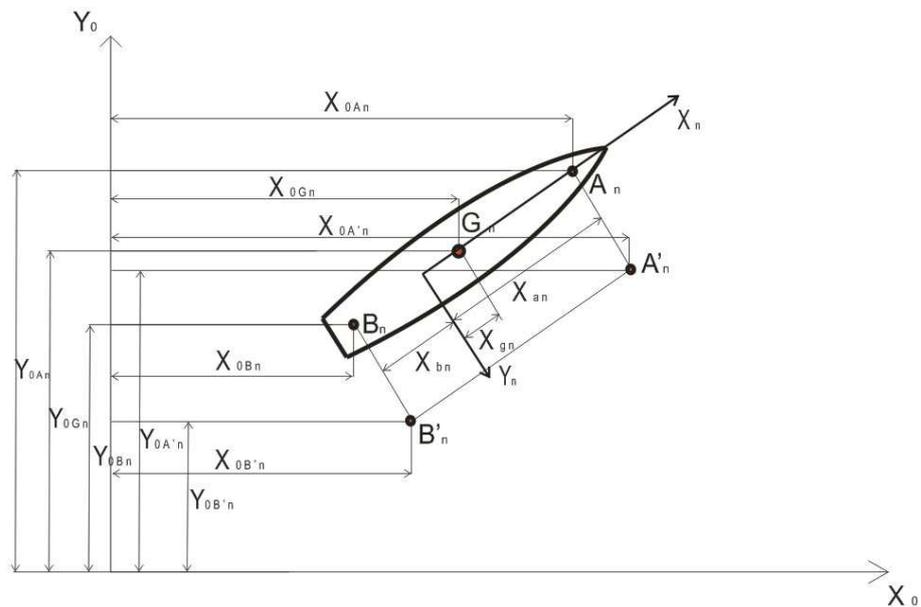


Рис. 1. Движение швартуемого судна при швартовке с судном, стоящим на якоре



а)



б)

Рис. 2. Определение координат точек швартуемого судна (а) и судна-партнера (б)

– координаты точек $A'_n(X_{A'n}, Y_{A'n})$ и $B'_n(X_{B'n}, Y_{B'n})$, расположенных на перпендикулярах к диаметральной плоскости судна, стоящего на якорь, восстановленных в точки A_n и B_n соответственно, по формулам:

$$\begin{aligned}
 X_{A'n} &= X_{A_n} + [h + 0,5(B + B_n)] \times \cos \psi_n; \\
 Y_{A'n} &= Y_{A_n} - [h + 0,5(B + B_n)] \times \sin \psi_n; \\
 X_{B'n} &= X_{B_n} + [h + 0,5(B + B_n)] \times \cos \psi_n; \\
 Y_{B'n} &= Y_{B_n} - [h + 0,5(B + B_n)] \times \sin \psi_n,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

при этом величина отрезков $A_n A'_n = B_n B'_n = h_0$ определяется с помощью зависимости, представленной формулой:

$$h_0 = h + 0,5(B + B_n),
 \tag{4}$$

где B – ширина швартуемого судна; B_n – ширина судна, стоящего на якоре; ψ_n – курс судна, стоящего на якоре. Значение курса судна, стоящего на якоре, ψ_n рассчитывается с использованием значений координат точек A_n и B_n в неподвижной координатной системе, а именно:

$$\psi_n = \arctg[(X_{0A_n} - X_{0B_n}) / (Y_{0A_n} - Y_{0B_n})]; \quad (5)$$

– координаты проекции центра тяжести судна, стоящего на якоре $G'_n(X_{0G'_n}, Y_{0G'_n})$ в неподвижной координатной системе, на траекторию сближения в конечной стадии швартовки. Данная траектория проходит параллельно диаметральной плоскости судна, стоящего на якоре, через точки A'_n и B'_n :

$$\begin{aligned} X_{0G'_n} &= X_{0G_n} + h_0 \times \cos \psi_n; \\ Y_{0G'_n} &= Y_{0G_n} - h_0 \times \sin \psi_n; \end{aligned} \quad (6)$$

– координаты второй заданной точки $P_2(X_{0P_2}, Y_{0P_2})$ в неподвижной координатной системе:

$$\begin{aligned} X_{0P_2} &= X_{0G'_n} + m \times \sin \psi_n; \\ Y_{0P_2} &= Y_{0G'_n} + m \times \cos \psi_n; \end{aligned} \quad (7)$$

– координаты первой заданной точки $P_1(X_{0P_1}, Y_{0P_1})$ в неподвижной координатной системе:

$$\begin{aligned} X_{0P_1} &= X_{0P_2} - S_T \times \sin \psi_n; \\ Y_{0P_1} &= Y_{0P_2} - S_T \times \cos \psi_n, \end{aligned} \quad (8)$$

где S_T – тормозной путь швартуемого судна (рис. 3) при переходе его со скорости $v = v_n$ к скорости $v = v_k = v_{st}$ (v_n – начальная скорость, т.е. скорость швартуемого судна в первой заданной точке P_1 , v_k – конечная скорость, т.е. скорость швартуемого судна во второй заданной точке P_2 , v_{st} – скорость течения в районе якорной стоянки), длина тормозного пути равна расстоянию, преодолеваемому швартуемым судном при переходе его из заданной точки P_1 в заданную точку P_2 .

Текущее значение длины тормозного пути швартуемого судна может быть рассчитано с использованием уравнения его движения:

$$dv/ds = f(v, C_1, C_2, C_3, \dots), \quad (9)$$

где v – текущее значение скорости швартуемого судна; s – путь; C_1, C_2, C_3, \dots – текущие значения параметров уравнения движения швартуемого судна, зависящие от текущих значений параметров, характеризующих текущее состояние загрузки судна и внешней среды (водоизмещения швартуемого судна; параметров посадки корпуса; направления и скорости ветра; параметров волнения; направления и скорости течения; глубины акватории в районе выполнения швартовочной операции).

Текущее значение длины тормозного пути швартуемого судна в процессе его сближения с судном, стоящим на якоре, определяется интегрированием уравнения движения швартуемого судна (9) в пределах от $v = v_n$ до $v = v_{st}$, т.е.

$$S_T = \int_{v_n}^{v_{st}} f(v, C_1, C_2, C_3, \dots) dv. \quad (10)$$

При этом текущие значения параметров уравнения движения швартуемого судна (9) C_1, C_2, C_3, \dots в процессе выполнения швартовочной операции могут непрерывно идентифицироваться с использованием метода, описанного в работах (Юдин, 2007; Юдин и др., 2009).

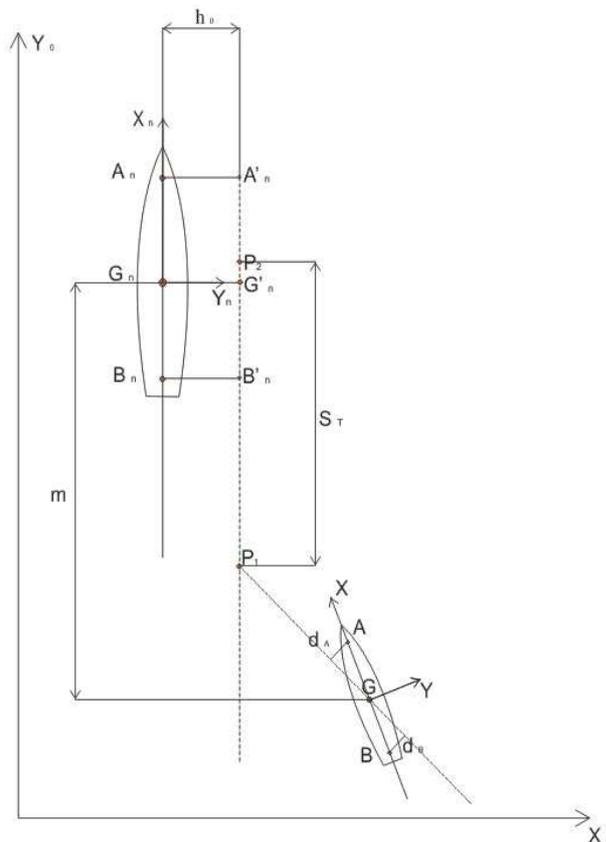


Рис. 3. Движение швартуемого судна по траекториям сближения

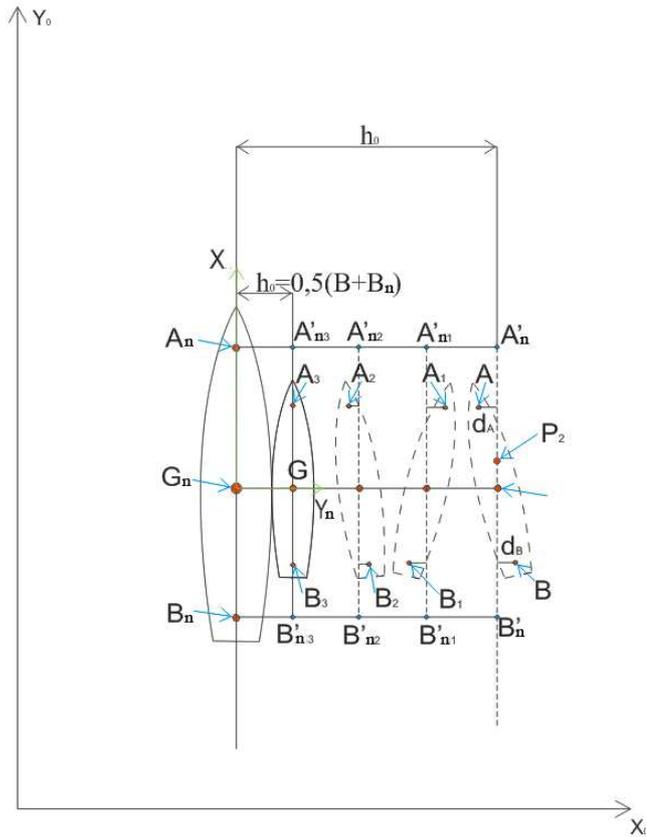


Рис. 4. Движение швартуемого судна на третьем этапе швартовки

Наличие полученных указанным способом данных позволяет осуществлять сближение швартуемого судна с судном, стоящим на якоре, в три этапа.

1-й этап – выход швартуемого судна в первую заданную точку P_1 . Текущее положение первой заданной точки $P_1(X_{0P1}, Y_{0P1})$ на текущем положении линии, проходящей через текущее положение точек $A'_n(X_{A'n}, Y_{A'n})$ и $B'_n(X_{B'n}, Y_{B'n})$, определяется величиной отрезка P_1P_2 . Его длина равна расстоянию, проходимому швартуемым судном при снижении его текущей скорости v до значения, равного скорости течения v_n , в момент выхода швартуемого судна на траверз судна, стоящего на якоре, т.е. в момент, когда центр тяжести швартуемого судна будет находиться в точке P_2 . Управление швартуемым судном во время сближения с судном, стоящим на якоре, осуществляется по величинам поперечных отклонений носовой d_A и кормовой d_B точек швартуемого судна от текущего положения траектории сближения, проходящей через текущее положение центра тяжести швартуемого судна $G(X_{0G}, Y_{0G})$ и текущего положения первой заданной точки $P_1(X_{0P1}, Y_{0P1})$.

Возникающие поперечные смещения вырабатывают сигнал на отклонение рулевого органа, например руля швартуемого судна, по закону:

$$\alpha_r = -k_A \times d_A + k_B \times d_B, \quad (11)$$

где k_A, k_B – коэффициенты усиления по поперечным смещениям носовой и кормовой точек швартуемого судна от текущего положения траектории сближения. Это положительные величины, причём k_A больше k_B . Угол перекадки руля α_r считается положительным при его перекадке в сторону правого борта швартуемого судна.

Окончание 1-го этапа сближения швартуемого судна с судном, стоящим на якоре, совпадает с моментом выхода швартуемого судна в первую заданную точку, т.е. в момент, когда центр тяжести швартуемого судна будет находиться в точке P_1 .

2-й этап – выход швартуемого судна во вторую заданную точку P_2 . Текущее положение второй заданной точки $P_2(X_{0P2}, Y_{0P2})$ на текущем положении линии, проходящей через точки $A'_n(X_{A'n}, Y_{A'n})$ и $B'_n(X_{B'n}, Y_{B'n})$, определяется заданным расстоянием m между центрами тяжести швартуемого судна и судна, стоящего на якоре, в конечной стадии швартовки. Управление швартуемым судном во время сближения с судном, стоящим на якоре, осуществляется по величинам поперечных отклонений носовой d_A и кормовой d_B точек швартуемого судна от текущего положения траектории сближения, в качестве которой используется текущее положение линии, проходящей через точки $A'_n(X_{A'n}, Y_{A'n})$ и $B'_n(X_{B'n}, Y_{B'n})$. Окончание 2-го этапа сближения швартуемого судна с судном, стоящим на якоре, совпадает с моментом выхода швартуемого судна во вторую заданную точку, т.е. в момент, когда центр тяжести швартуемого судна будет находиться в точке P_2 .

3-й этап. После выхода швартуемого судна в точку P_2 осуществляется дальнейшее сближение швартуемых судов до непосредственного контакта "борт к борту" (рис. 4).

С этой целью заданное текущее положение траектории сближения швартуемых судов, т.е. линия $A'_nB'_n$, постепенно смещается параллельно ДП судна, стоящего на якоре, в сторону данного судна со скоростью не больше допустимого значения скорости поперечного движения швартуемого судна в направлении судна-партнёра v_d . Скорость v_d определяется исходя из безопасности швартовочной операции,

а именно из условия безопасного гашения поперечной скорости движения швартуемого судна в момент непосредственного контакта швартуемых судов средствами кранцевой защиты борта судна, стоящего на якоре. Параллельное смещение линии $A'_n B'_n$ в сторону судна, стоящего на якоре, обусловлено смещением точек A'_n и B'_n , текущее положение которых рассчитывается непрерывно в зависимости от значения расстояния h между бортами швартуемых судов. Постепенное уменьшение значения h в соответствии с законом

$$dh/dt = f(v_d, h, h_0, \dots)$$

приводит к изменению значения задаваемого расчётным способом расстояния между ДП швартуемых судов $h_0 = h + 0,5 \times (B_n + B)$, что, в свою очередь, изменяет координаты точек A'_n и B'_n , и в конечном итоге линия $A'_n B'_n$ смещается в сторону судна, стоящего на якоре, оставаясь параллельной его ДП.

Смещение линии $A'_n B'_n$ от исходного положения в сторону судна, стоящего на якоре, образует смещение d_A , d_B носовой A и кормовой B точек швартуемого судна соответственно. Формируется сигнал управления

$$\alpha = -k_A \times d_A + k_B \times d_B,$$

и ДП швартуемого судна приводится к новому положению линии $A'_n B'_n$ до их полного совпадения. Далее процесс смещения линии $A'_n B'_n$ по указанному алгоритму в сторону судна, стоящего на якоре, будет повторяться многократно, также многократно будут образовываться смещения носовой d_A и кормовой d_B точек швартуемого судна относительно текущего положения линии $A'_n B'_n$. Смещения носовой A и кормовой B точек швартуемого судна относительно текущего положения линии $A'_n B'_n$ будет приводить к формированию управляющего сигнала средства управления швартуемым судном. Работа средства управления вернёт ДП швартуемого судна на линию, совпадающую с текущим положением линии $A'_n B'_n$.

Смещение линии $A'_n B'_n$ в сторону судна, стоящего на якоре, будет происходить до тех пор, пока расстояние h_0 между ДП швартуемых судов не будет равно значению, определяемому из выражения $h_0 = 0,5 \times (B_n + B)$, т.е. в этот момент расстояние между бортами швартуемых судов будет равно нулю: $h = 0$. Указанный момент в предлагаемом способе управления судном при выполнении им швартовки операции к борту судна, стоящего на якоре, считается моментом окончания 3-го, последнего этапа швартовки операции.

3. Заключение

Управление судном, осуществляющим сложное маневрирование во время выполнения швартовки операции к борту судна, стоящего на якоре, сопряжено с достаточно большим риском аварийного происшествия или, в худшем случае, аварии. Вышеизложенный способ направлен на обеспечение безопасности выполнения швартовки операции к борту судна, стоящего на якоре, посредством постоянного контроля положения швартуемого судна относительно корпуса швартуемого судна, что позволяет в значительной степени повысить эффективность выполнения работ, связанных с необходимостью применения данного метода швартовки.

Литература

- Юдин Ю.И. Синтез моделей механизма предвидения для экспертных систем, обеспечивающих безопасную эксплуатацию судна. *Мурманск, МГТУ*, 198 с., 2007.
- Юдин Ю.И., Пашенцев С.В., Мартюк Г.И., Юдин А.Ю. Теоретические основы безопасных способов маневрирования при выполнении точечной швартовки. *Мурманск, МГТУ*, 152 с., 2009.