

С.Н. Холичев, С.А. Агарков

## Моделирование процесса швартовки к борту судна-партнера на финальном этапе сближения судов "борт к борту" с использованием инновационного способа управления судном

S.N. Kholichev, S.A. Agarkov

### Modeling of mooring to the partner vessel at the final stage of "side to side" approach using innovative vessel's steering methods

**Аннотация.** Проведено моделирование процесса швартовки к борту судна-партнера на финальном этапе сближения судов "борт к борту" с использованием инновационного способа. Представлены результаты модельного эксперимента, подтверждающие возможность использования данного способа на практике.

**Abstract.** Modeling of mooring to the partner vessel at the final stage of "side to side" approach using innovative vessel's steering methods has been carried out. The results of the model experiment confirming the possibility of using this method in practice have been presented.

**Ключевые слова:** способ швартовки, автоматизация швартовки, модельный эксперимент  
**Key words:** method of mooring, mooring automation, model experiment

#### 1. Введение

Аварии с судами разных типов и тоннажа происходят практически ежедневно. Для повышения безопасности проведения швартовочных операций был разработан способ управления судном при швартовке к борту судна-партнера (Холичев и др., 2015).

Наиболее опасным при проведении любой швартовочной операции является заключительный (финальный) этап – контакт судна с причалом, плавбазой или другим судном. Автоматизация процесса швартовки судов повышает безопасность любого вида швартовки, т.к. позволяет избежать ошибок человеческого элемента. В статье представлен инновационный способ швартовки к борту судна-партнера и результаты модельного эксперимента, проведенного авторами с целью доказать возможность применения данного способа на практике.

#### 2. Способ швартовки к борту судна-партнера

На кафедре судовождения МГТУ разработан способ управления швартуемым судном при выполнении им швартовочной операции к борту судна-партнера (Юдин и др., 2013а), когда в пределах контуров швартуемого судна и судна-партнера в их диаметральных плоскостях выбирают по две точки, одна из которых находится на носовой части  $A$  (швартуемое судно),  $A_n$  (судно-партнер), другая – на кормовой части  $B$  (швартуемое судно),  $B_n$  (судно-партнер) относительно мидель-шпангоута соответствующего судна.

Координаты точек  $A$ ,  $B$ ,  $A_n$ ,  $B_n$  в неподвижной координатной системе определяют непрерывно с высокой точностью ( $\pm 1,0$  м). Используя значения координат точек швартуемого судна  $A(X_{0A}, Y_{0A})$ ,  $B(X_{0B}, Y_{0B})$  и судна-партнера  $A_n(X_{0An}, Y_{0An})$ ,  $B_n(X_{0Bn}, Y_{0Bn})$  в неподвижной координатной системе, координаты тех же точек в подвижных системах координат, связанных с швартуемым судном  $A(X_A, Y_A)$ ,  $B(X_B, Y_B)$  и судном-партнером  $A_n(X_{An}, Y_{An})$ ,  $B_n(X_{Bn}, Y_{Bn})$ , координаты центров тяжести (ЦТ) швартуемого судна в связанной с ним подвижной координатной системе  $G(X_G, Y_G)$  и судна-партнера в связанной с ним подвижной координатной системе  $G_n(X_{0Gn}, Y_{0Gn})$ , а также значения расстояния между диаметрными плоскостями (ДП) швартуемых судов  $h_0$  и расстояние между ЦТ швартуемых судов  $t$  рассчитывают (Юдин и др., 2013б):

- координаты центра тяжести швартуемого судна  $G(X_{0G}, Y_{0G})$  в неподвижной координатной системе;
- координаты центра тяжести судна-партнера  $G_n(X_{0Gn}, Y_{0Gn})$  в неподвижной координатной системе;
- координаты точек  $A'_n(X_{A'n}, Y_{A'n})$  и  $B'_n(X_{B'n}, Y_{B'n})$ , расположенных на перпендикулярах к ДП судна-партнера восстановленных в точки  $A_n$  и  $B_n$  (рис. 1);

- координаты проекции ЦТ судна-партнера  $G'_n(X_{0G'n}, Y_{0G'n})$  в неподвижной координатной системе на траекторию сближения в конечной стадии швартовки, проходящую параллельно ДП судна-партнера через точки  $A'_n$  и  $B'_n$ ;
- координаты второй заданной точки  $P_2(X_{0P2}, Y_{0P2})$  в неподвижной координатной системе;
- текущее значение длины тормозного пути  $S_t$ ;
- координаты первой заданной точки  $P_1(X_{0P1}, Y_{0P1})$  в неподвижной координатной системе.

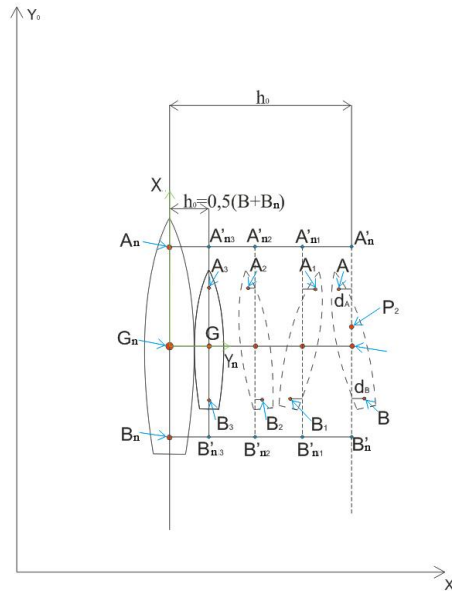


Рис. 1. Схема сближения швартуемых судов "борт к борту" в условиях открытого моря

Момент выхода швартуемого судна во вторую заданную точку  $P_2$  соответствует равенству координат ЦТ швартуемого судна и второй заданной точки, т.е.  $X_{0G} = X_{0P2}, Y_{0G} = Y_{0P2}$ .

После выхода швартуемого судна в точку  $P_2$  осуществляется дальнейшее сближение швартуемых судов до непосредственного контакта "борт к борту". С этой целью заданное текущее положение траектории сближения швартуемых судов, т.е. линия  $A'_n B'_n$  постепенно смещается параллельно ДП судна-партнера в сторону судна-партнера со скоростью не больше допустимого значения скорости поперечного движения швартуемого судна в направлении судна-партнера  $v_d$ . 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-партнера. Параллельное смещение линии  $A'_n B'_n$  в сторону судна-партнера 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 расчетным способом расстояния между ДП швартуемых судов  $h_0 = h + 0,5 \times (B_n + B)$  (здесь  $B_n$  – ширина судна-партнера,  $B$  – ширина швартуемого судна), 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-партнера, оставаясь параллельной его ДП.

Смещение линии  $A'_n B'_n$  от исходного положения в сторону судна-партнера 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-партнера 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 точек  $B$  швартуемого судна относительно текущего положения линии  $A'_n B'_n$  будет приводить к формированию управляющего сигнала средства управления швартуемым судном. Работа средства управления вернет ДП швартуемого судна на линию, совпадающую с текущим положением линии  $A'_n B'_n$ .

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

В результате применения данного изобретения достигается возможность получения технического результата – соблюдение условия завершения швартовочной операции, т.е. осуществления непосредственного контакта ("борт к борту") швартующихся судов.

### 3. Модельный эксперимент

Стратегией на данном этапе является управление танкером по отклонениям от некоторой прямой, названной прицельной линией – ПЛ. Это прямая, смещенная от точки нахождения цели в данный момент, которая имеет направление курса цели, т.е. направление ее ДП. Отклонения носовой и кормовой точек ДП танкера от прицельной линии определяются следующим образом:

$$dn = -(x_s - x_z) \times \cos(K_z) + (y_s - y_z) \times \sin(K_z) + d0 + p \times \sin(K_z - Ks);$$

$$dk = -(x_s - x_z) \times \cos(K_z) + (y_s - y_z) \times \sin(K_z) + d0 - p \times \sin(K_z - Ks).$$

Мы используем их для формирования управляющего сигнала системы управления с помощью соотношения

$$sign = -a_1 \times d_n + a_2 \times d_k,$$

при этом параметры выбраны так:  $a_1 = 1.1$  и  $a_2 = 0.9$ . Выбор этих параметров равными по величине приводит к управлению по направлению (Пашенцев, Юдин, 2013). Далее мы проведем оптимизационный подбор  $a_1$  и  $a_2$ .

Эти формулы дают возможность моделировать движение танкера на втором этапе подхода к месту швартовки. Напомним также, что для работы на этом этапе швартовочной операции мы выбрали для судна математическую модель в перемещениях. Она была идентифицирована нами ранее и используется здесь как единственная для моделирования движения. Чтобы сделать управление по отклонениям близким к реальной ситуации, нам надо получить данные о траектории движения цели. Возьмем в качестве таковой судно, лежащее в дрейфе и перемещающееся под действием внешних факторов. Выберем для этого действие ветра. Проводим моделирование движения дрейфующего судна при скорости ветра 10 м/с с направления 60°, нос судна направлен на 10°, скорость хода 0.1 м/с. Эта скорость хода необходима формально из-за структуры модели в перемещениях. В ней много членов, где скорость входит в знаменатель, поэтому она не может быть нулевой. После того, как моделирование дрейфа выполнено, координаты и курс дрейфующего судна запоминаются в трех массивах. При моделировании работы системы управления по отклонениям эти запомненные данные используются как целевые для динамического построения прицельной линии.

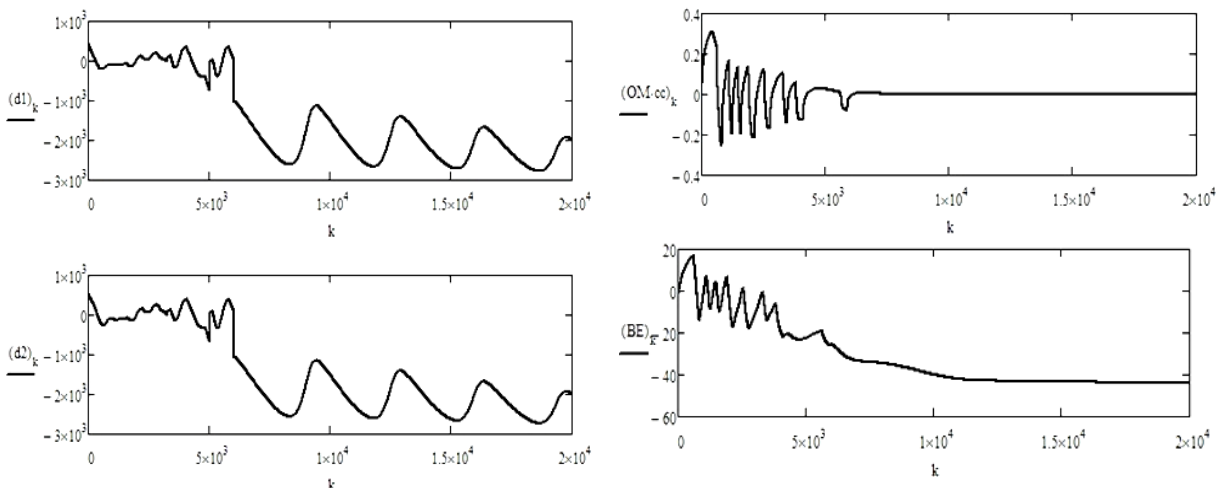


Рис. 2. Изменения во времени (сек) отклонений носовой и кормовой точек (м), угловой скорости поворота (°/с) и угла дрейфа (°) танкера при управлении по отклонениям

И только потом относительно этой линии идет управление по отклонениям. На рис. 2 и 3 приведены результаты движения швартующегося танкера при этом управлении.

На рис. 2 приведены изменения во времени отклонений носовой и кормовой точек танкера от прицельной линии, угловой скорости поворота и угла дрейфа танкера при управлении по отклонениям. Хорошо видно, что сильные изменения параметров имеют место в начальный период движения. Танкер производит разворот, во время которого происходят колебательные изменения параметров. Затем танкер ложится на устойчивый курс с небольшими изменениями кинематических параметров.

На рис. 3 приведены изменения во времени курса, управляющего сигнала, скорости перекадки руля и траектория танкера. Приведены две траектории – самого управляемого танкера (сплошная линия) и дрейфующего объекта швартовки (точечная линия). На траектории танкера хорошо виден начальный маневр с выходом на прицельную линию.

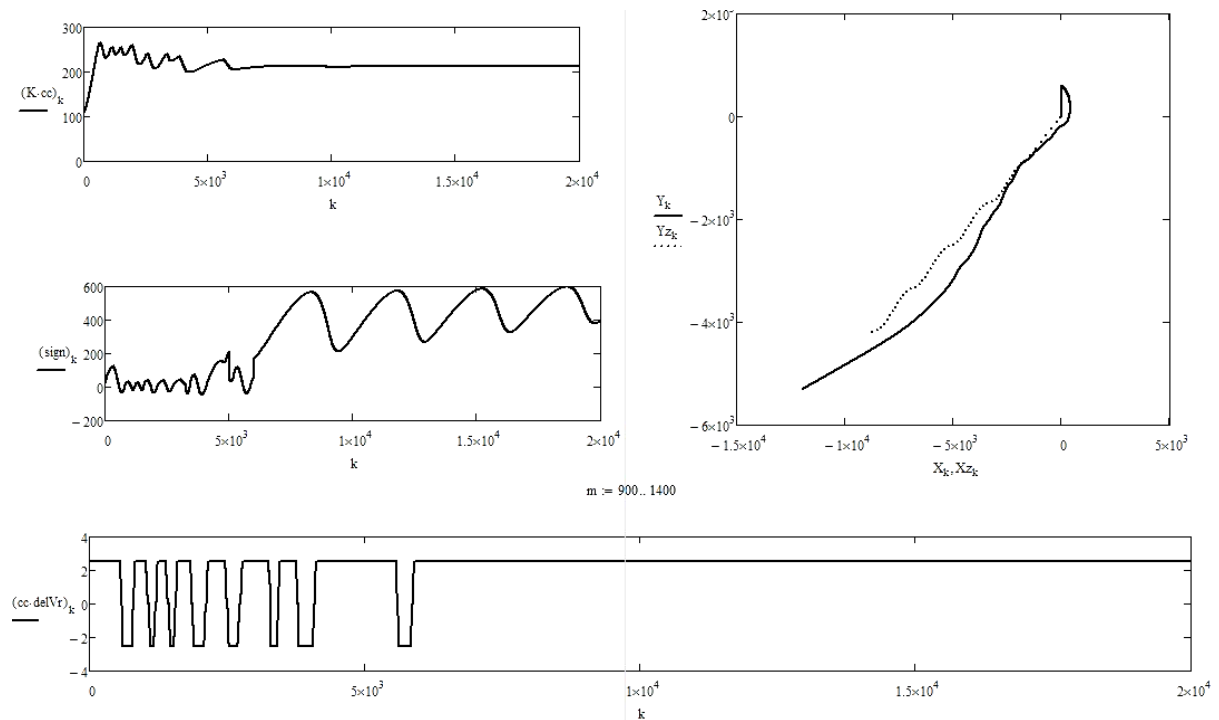


Рис. 3. Изменения во времени (сек) курса ( $^{\circ}$ ), управляющего сигнала, скорости перекадки руля ( $^{\circ}/с$ ) и траектория танкера при управлении по отклонениям

Однако на этих рисунках нет изображения самой прицельной линии. Это понятно, так как прицельная линия меняет каждую секунду свое положение. Это происходит в соответствии с перемещением цели и изменением ее курса. Но в программе моделирования в среде VB6 запрограммирована возможность проследить за положением этой целевой линии. Это делается с помощью последовательного изображения этой линии, места танкера и одновременно положения танкера относительно сторон света. Далее делается скриншот экрана программы, именно он представлен на рис. 4. Это положение судна на 3250 сек моделирования. В левой части рисунка показаны две траектории слежения за целью с разными начальными курсами танкера. Синий кружок показывает положение самого танкера, желтая прямая линия является в данный момент прицельной линией. Изображение справа дает положение танкера относительно сторон света, положение пера руля (синий отрезок), направление вектора скорости (оранжевая линия в ЦТ танкера) и целевой линии (желтая прямая выше танкера). Видно, что руль положен на правый борт для выхода на прицельную линию. Через скриншот проглядывает основное окно программы, на котором выводится информация о моделировании. На рис. 5 показан скриншот экрана программы моделирования для другого начального курса танкера в  $310^{\circ}$ . Выбран другой момент процесса моделирования, поэтому на рис. 5 справа мы видим другое относительное расположение танкера и прицельной линии. Она ниже танкера, и его руль положен на левый борт для выхода на эту линию.

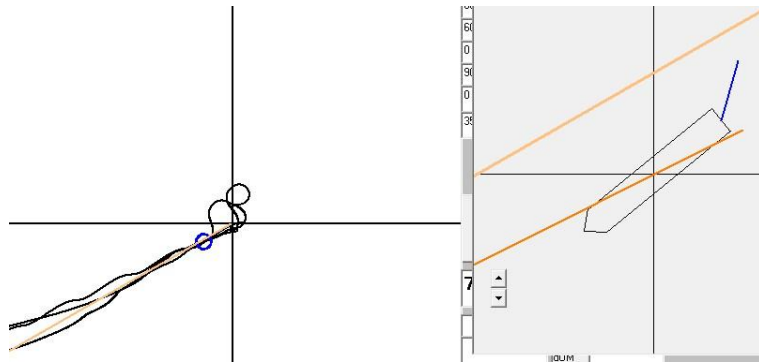


Рис. 4. Скриншот экрана программы моделирования в среде VB6

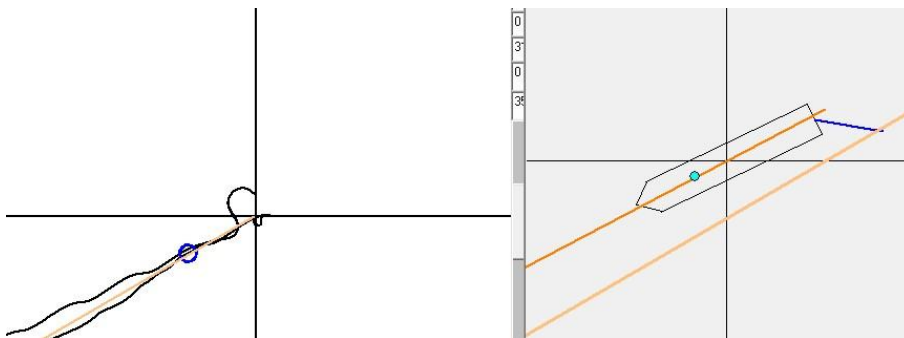


Рис. 5. Скриншот экрана программы моделирования в среде VB6 с начальным курсом танкера 310°

#### 4. Заключение

Результаты проведенного эксперимента показывают, что компьютерная модель судна успешно следит за прицельной линией, и каждый раз при смещении линии смоделированное судно движется за ней. Это позволяет сделать вывод, что реальное судно, управляемое предложенным способом, сможет точно так же сблизиться со швартуемым судном и безопасно ошвартоваться. Следовательно, предложенный способ позволяет достичь поставленной цели автоматизации швартовки в полной мере.

#### Литература

- Пашенцев С.В., Юдин Ю.И.** Моделирование процесса управляемого движения судна вдоль линии положения. Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 1. С. 141-147.
- Холичев С.Н., Юдин Ю.И., Петров С.О.** Моделирование процесса швартовки к борту судна-партнера с использованием инновационного способа управления судном. Вестник МГТУ. 2015. Т. 18, № 1. С. 81-87.
- Юдин Ю.И., Холичев С.Н., Петров С.О.** Способ управления судном при выполнении им швартовочной операции к борту судна-партнера. Пат. 2475410 РФ, МПК В 63 Н 25/00 (2006.01); заявитель и патентообладатель Мурманский гос. техн. ун-т, № 2011137696/11; заявл. 13.09.2011; опубл. 20.02.2013а, бюл. № 5. 7 с.
- Юдин Ю.И., Холичев С.Н., Петров С.О.** Способ управления судном при выполнении им швартовочной операции к борту судна, стоящего на якорю. Вестник МГТУ. 2013б. Т. 16, № 1. С. 187-192.

#### References

- Pashentsev S.V., Yudin Yu.I.** Modelirovanie protsessa upravlyayemogo dvizheniya sudna vdol linii polozheniya [Simulation of guided movement of vessel along the line of position]. Vestnik MGTU. 2013. T. 16, N 1. P. 141-147.
- Kholichev S.N., Yudin Yu.I., Petrov S.O.** Modelirovanie protsessa shvartovki k bortu sudna-partnyora s ispolzovaniem innovatsionnogo sposobaupravleniya sudnom [Modeling of the mooring to the partner vessel using innovative vessel's steering methods]. Vestnik MGTU. 2015. T. 18, N 1. P. 81-87.

**Yudin Yu.I., Kholichev S.N., Petrov S.O.** Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoi operatsii k bortu sudna-partnera [Control of the vessel carrying out mooring operation to board a ship-partner]. Pat. 2475410 RF, МПК V 63 N 25/00 (2006.01); заявитель i patentoobladatel Murmanskiiy gos. tehn. un-t, N 2011137696/11; заявл. 13.09.2011; опубли. 20.02.2013а, byul. N 5. 7 p.

**Yudin Yu.I., Kholichev S.N., Petrov S.O.** Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoi operatsii k bortu sudna, stoyashego na yakore [Control of the vessel carrying out mooring operations to board a ship at anchor]. Vestnik MGTU. 2013b. T. 16, N 1. P. 187-192.

#### **Информация об авторах**

**Холичев Сергей Николаевич** – Морская академия МГТУ, кафедра судовождения, мл. науч. сотрудник, аспирант, e-mail: kholichev.sergey@gmail.com

**Kholichev S.N.** – MSTU Marine Academy, Navigation Department, Junior Research Associate, Ph.D. Student, e-mail: kholichev.sergey@gmail.com

**Агарков Сергей Анатольевич** – Институт экономики, управления и права МГТУ, кафедра управления социально-экономическими системами, д-р экон. наук, профессор

**Agarkov S.A.** – Institute of Economics, Management and Law MSTU, Department of Management of Social and Economic Systems, Dr of Econ. Sci., Professor