

А. Б. Ваганов, А. С. Костюнин

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАНЕВРЕННОСТИ СУДОВ

A. B. Vaganov, A. S. Kostyunin

RESULTS ANALYSIS OF FULL-SCALE TESTS OF SHIPS MANEUVERABILITY

Представлены результаты натурных испытаний двух морских контейнеровозов, в результате которых получены данные, подтверждающие наличие зоны ухудшения маневренности. Сформулирован теоретический подход к объяснению случаев замедления маневренности судна и невозможности судна из установившейся циркуляции. Установлен параметр, позволяющий оценить возможное минимальное значение угла обратной перекадки для выполнения маневра с заданной скоротечностью.

Ключевые слова: знакопеременные перекадки рулей; невозможность из циркуляции; ухудшение маневренности судна; эффективный угол атаки руля.

The results of full-scale tests of two sea container ships are presented in the paper. These results demonstrate the presence of a zone of maneuverability deterioration. A theoretical approach to the explanation of ship maneuverability deterioration and impossibility to stop ship turning is developed. It is established a parameter allowing to evaluate a minimal value of inverse displacement angle for making a maneuver with a specified speed.

Key words: alternating-sign rudder displacement, impossibility to stop ship turning, ship maneuverability deterioration, effective angle of rudder attack.

По определению Р. Я. Першица [1], судно, как управляемая система, обладает маневренными свойствами – управляемостью и маневренностью, которые проявляются во время движения. Управляемость характеризует преднамеренное изменение управляемой координаты в нужном судоводителю направлении без учета скорости этого изменения, определяемой маневренностью. Таким образом, управляемость определяет принципиальную возможность совершения судном заданного движения, маневренность же определяет возможность обеспечения должной скоротечности этого процесса. Потеря маневренности системой приводит и к потере управляемости.

Под управляемостью судна будем понимать его способность двигаться по выбранной судоводителем траектории с заданными наперед кривизной или радиусом. Маневренностью судна будем называть способность системы менять элементы движения с некоторой достижимой для него скоростью.

Управляемость судна обеспечивается достаточной эффективностью средств управления. Маневренность обеспечивается, кроме того, эффективным законом угла перекадки рулей.

Если мерой управляемости судна служит угловая скорость вращения на установившейся циркуляции при определенных значениях угла перекадки рулей, то можно сказать, что мерой маневренности должно будет являться угловое ускорение при определенном законе изменения угла перекадки в областях замедления реакции. Можно отметить, что диаграмма управляемости судна характеризует свойство управляемости, а изменения скорости и направления вращения судна в окрестности диаграммы будут характеризовать свойство маневренности.

Практика эксплуатации показала, что возникает достаточно много затруднений, сбоев и даже аварийных ситуаций по таким причинам, относящимся к маневренности судна, как:

- сложные путевые и эксплуатационные условия;
- большие габаритные размеры крупных судов и, особенно, составов;
- неизбежные субъективные ошибки при глазомерном способе управления;
- возникновение ситуаций замедленной реакции судна на перекадку рулей (ухудшение маневренности).

Накоплено достаточно много фактов ухудшения маневренности судов. Такие данные приведены в работах Р. Я. Першица [1], М. И. Фейгина [2], А. Ф. Видецкого [3] и др. [4]. Таким образом, исследования маневренности судна вполне актуальны.

С целью исследования маневренности судов были проведены следующие натурные испытания:

- 1) в июне 2009 г. на морском контейнерном судне NYK Floresta в Тихом океане;
- 2) в декабре 2010 г. на морском контейнерном судне Laura Schulte в Атлантическом океане.

В таблице приведены основные технические характеристики данных судов.

Технические характеристики судов

Характеристика	Судно	NYK Floresta	Laura Schulte
Длина наибольшая, м		207,4	175,59
Ширина наибольшая, м		29,8	27,4
Осадка носом на момент проведения испытаний, м		7,2	10,1
Осадка кормой на момент проведения испытаний, м		9,45	10,3
Тип рулевого устройства		Руль	Руль
Количество рулевых устройств		1	1
Количество винтов		1	1

Испытания проводились следующим образом:

NYK Floresta. На движущемся судне руль поочередно переключался на правый борт и левый борт на небольшие углы с целью осуществить маневр «зигзаг». Испытания проводились при переключках руля $\alpha_p = \pm 3^\circ, \pm 4^\circ, \pm 5^\circ, \pm 6^\circ$.

Laura Schulte. На движущемся судне руль переключался на правый борт (на угол α_{p1}), после ухода судна с первоначального курса на 5° вправо руль переключался на левый борт (на угол $\alpha_{p2} = -\alpha_{p1}$), судно поворачивалось на 5° влево относительно первоначального курса, и руль снова переключался вправо на то же значение, что и в начале испытания (α_{p1}). Испытание останавливалось по возвращении судна на первоначальный курс. Испытания проводились при переключках руля $\alpha_{p1} = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ, 7^\circ, 8^\circ, 9^\circ, 10^\circ, 15^\circ$.

По результатам испытаний строились графики зависимости угла курса от времени и угла переключки руля от времени $\chi = f(t)$, $\alpha_p = f(t)$, затем в программе MathCad подбирался 8 или 10-степенной полином, огибающий график функции $\chi = f(t)$, далее бралась первая и вторая производная полинома, т. е. строились графики $\omega = f(t)$ и $d\omega/dt = f(t)$ (на графиках χ – угол курса судна; α_p – угол переключки руля; ω – угловая скорость поворота судна; t – время).

При анализе графиков была обнаружена зона ухудшения маневренности. В данной зоне значение углового ускорения уменьшается при сохранении значительной угловой скорости прежнего направления, что может привести к чрезмерным отклонениям судна по курсу и поперечным смещениям.

Особенно хорошо можно различить зону ухудшения маневренности на графике зависимости углового ускорения судна от времени $d\omega/dt = f(t)$.

На рис. 1 изображен график $d\omega/dt = f(t)$ для контейнеровоза NYK Floresta при переключках руля $\alpha_{p1} = -5^\circ$, $\alpha_{p2} = 6^\circ$, $\alpha_{p3} = -6^\circ$.

На рис. 2 изображен график $d\omega/dt = f(t)$ для контейнеровоза Laura Schulte при переключках руля $\alpha_{p1} = 4^\circ$, $\alpha_{p2} = -4^\circ$, $\alpha_{p3} = 4^\circ$.

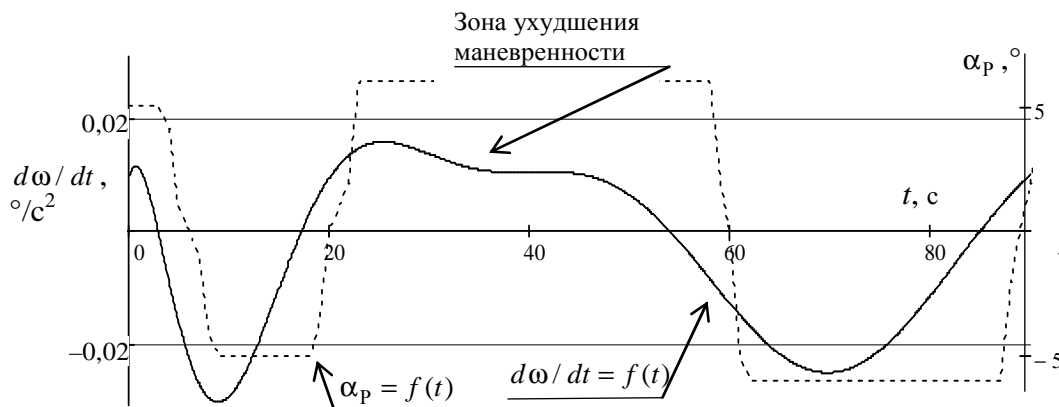


Рис. 1. Зависимость $d\omega/dt = f(t)$, контейнеровоз NYK Floresta, $\alpha_{p1} = -5^\circ$, $\alpha_{p2} = 6^\circ$, $\alpha_{p3} = -6^\circ$

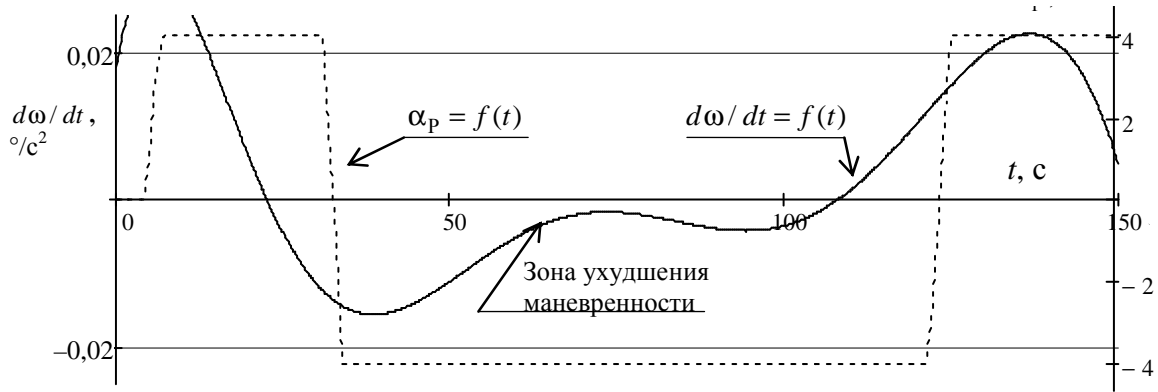


Рис. 2. Зависимость $d\omega/dt = f(t)$, контейнеровоз Laura Schulte, $\alpha_{P1} = 4^\circ$, $\alpha_{P2} = -4^\circ$, $\alpha_{P3} = 4^\circ$

Для понимания природы ухудшения маневренности при знакопеременных переключках рулей проанализируем взаимодействие моментов на корпусе и руле.

Гидродинамический момент движительно-рулевых комплексов определим так [5, 6]:

$$M_P = M_{P0} \cdot p_{Vn} \cdot (\alpha_P - \beta_P);$$

$$M_{P0} = \sum_{j=1}^{n_p} P_{P0j} \cdot L_P; \quad (1)$$

$$p_{Vn} = (p_{11}\bar{V}^2 + p_{12}\bar{V}_P\bar{n} + p_{13}\bar{n}^2),$$

где M_P – гидродинамический момент движительно-рулевых комплексов; M_{P0} – номинальное значение рулевого момента; P_{P0} – номинальное значение рулевой силы; p_{Vn} – коэффициент, учитывающий изменение скорости корпуса и частоты вращения гребного винта; α_P – задаваемый угол переключки руля; p_{11}, p_{12}, p_{13} – коэффициенты аппроксимации рулевой силы [1, 7]; β_P – потерянный угол атаки руля, равный [1, 8]:

$$\beta_P = \chi_K \chi_{VB} \cdot \beta + \chi_K \chi_{VB} \cdot \bar{L}_P \bar{\omega}. \quad (2)$$

Гидродинамический момент на корпусе судна определим в рамках линейной теории управляемости (примечание: это только для понимания сути преобразований):

$$M_K^{\Pi} = M_{KO}^{\Pi} \cdot \beta; \quad M_K^{\Delta} = -M_{KO}^{\Delta} \cdot \bar{\omega}; \quad (3)$$

$$M_K = M_K^{\Pi} + M_K^{\Delta} = M_{KO}^{\Pi} \cdot \beta - M_{KO}^{\Delta} \cdot \bar{\omega},$$

где M_K – гидродинамический момент на корпусе судна; M_K^{Π} – позиционный момент на корпусе судна; M_K^{Δ} – демпфирующий момент на корпусе судна.

Общее управляющее воздействие $M_P^{\text{ЭФ}}$ оценим в виде результирующей гидродинамических моментов на корпусе судна и рулях:

$$M_P^{\text{ЭФ}} = M_P + M_K^{\Pi} + M_K^{\Delta} = M_{P0} \cdot p_{Vn} \cdot (\alpha_P - \beta_P) + M_{KO}^{\Pi} \cdot \beta - M_{KO}^{\Delta} \cdot \bar{\omega} =$$

$$= M_{P0} \cdot p_{Vn} \cdot \left(\alpha_P - \chi_K \chi_{VB} \beta - \chi_K \chi_{VB} \bar{L}_P \bar{\omega} + \frac{M_{KO}^{\Pi}}{M_{P0} \cdot p_{Vn}} \beta - \frac{M_{KO}^{\Delta}}{M_{P0} \cdot p_{Vn}} \bar{\omega} \right) =$$

$$= M_{P0} \cdot p_{Vn} (\alpha_P - \beta_P^{\text{ЭФ}}). \quad (4)$$

Назовем величину $\beta_P^{\text{ЭФ}}$ эффективным потерянным управляющим воздействием:

$$\beta_P^{\text{ЭФ}} = \beta_P - \frac{M_{\text{КО}}^{\text{П}}}{M_{\text{Р0}} \cdot P_{Vn}} \beta + \frac{M_{\text{КО}}^{\text{Д}}}{M_{\text{Р0}} \cdot P_{Vn}} \bar{\omega} \quad (5)$$

Эффективный угол атаки $\alpha_P^{\text{ЭФ}}$ руля будет равен:

$$\alpha_P^{\text{ЭФ}} = \alpha_P - \beta_P^{\text{ЭФ}}; \text{ или } \alpha_P = \alpha_P^{\text{ЭФ}} + \beta_P^{\text{ЭФ}} \quad (6)$$

Это будет эффективное или действующее управляющее вращательное воздействие на корпус судна.

Тогда дифференциальное уравнение вращения судна принимает такой вид:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\text{Р0}} \cdot P_{Vn}}{(J_{ZZ} + \lambda_{66})} \cdot \alpha_P^{\text{ЭФ}} \quad (7)$$

Угловое ускорение будет равно нулю при равенстве

$$\alpha_P^{\text{ЭФ}} = 0 \text{ или } M_P + M_K^{\text{П}} + M_K^{\text{Д}} = 0 \quad (8)$$

Равенство (8) выполняется на кривой $\bar{\omega}(\alpha_P)$ диаграммы управляемости. В других точках поля диаграммы управляемости свободное судно должно совершать вращение с ускорением.

Кривую $\bar{\omega}(\alpha_P)$ можно использовать при геометрической иллюстрации одерживания судна в качестве нулевой линии отсчета эффективного угла $\alpha_P^{\text{ЭФ}}$ атаки руля, откладываемого в виде отрезка в сторону второй перекладки, как это показано на рис. 3 и 4.

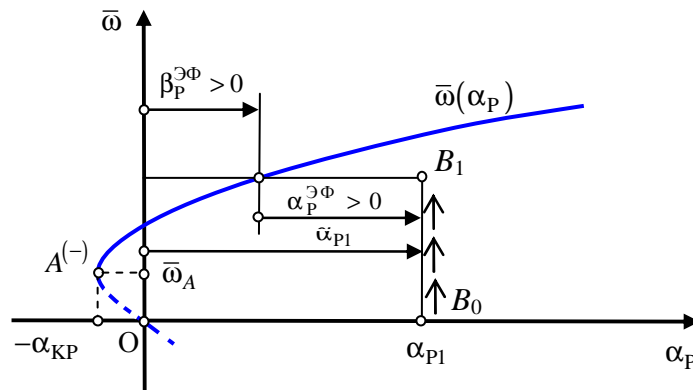


Рис. 3. Иллюстрация эффективного угла атаки руля, прямая перекладка рулей ($B_0 \rightarrow B_1$)

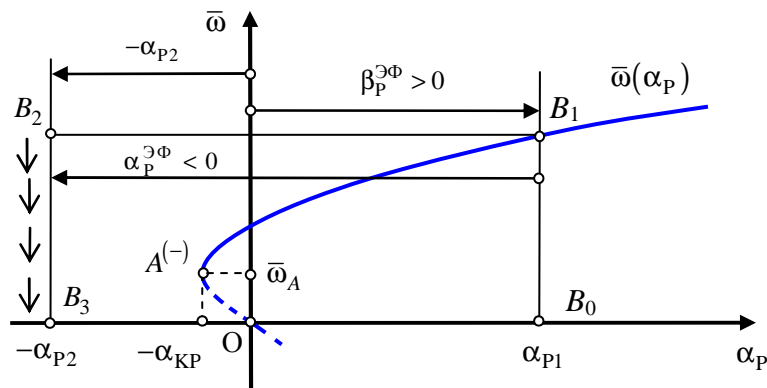


Рис. 4. Иллюстрация эффективного угла атаки руля, обратная перекладка рулей ($B_1 \rightarrow B_2$)

Отметим:

– угол α_p определяет уровень задаваемого управляющего воздействия и отсчитывается от нуля угла шкалы рулевой машины;

– угол $\beta_p^{\text{ЭФ}}$ определяет величину потерянного управляющего воздействия из-за потерянного угла атаки руля β_p и действия моментов $M_K^{\text{П}}$ и $M_K^{\text{Л}}$ на корпусе. Эффективный угол атаки руля откладывается от кривой $\bar{\omega}(\alpha_p)$ от точки B_1 в сторону второй перекаладки руля α_{p2} .

На кривой $\bar{\omega}(\alpha_p)$ в точке B_1 (рис. 4) выполняется условие динамического равновесия:

$$M_p^{\text{ЭФ}} = M_{p0} + M_K^{\text{П}} + M_K^{\text{Л}} = M_{p0} \cdot p_{Vn} (\alpha_p - \beta_p^{\text{ЭФ}}) = 0. \quad (9)$$

Следовательно, на самой диаграмме управляемости будет так:

$$\beta_3^{\text{ЭФ}} = \alpha_{p1}; \alpha_p^{\text{ЭФ}} = 0. \quad (10)$$

Множитель $\frac{1}{(J_{ZZ} + \lambda_{66})} \cdot M_{p0} \cdot p_{Vn} \approx \text{const}$, или, точнее, будет медленно меняющейся пропорционально изменению линейной скорости движения судна функцией времени. Отсюда следует, что угловое ускорение $d\omega/dt$ при выполнении одерживания будет изменяться в основном пропорционально $\alpha_p^{\text{ЭФ}}$. При одерживании судно с течением времени будет замедлять вращение ($\alpha_p^{\text{ЭФ}} < 0$), двигаясь из точки B_2 в точку B_3 . Угловая скорость и угол дрейфа уменьшаются, вследствие чего изменяется $\beta_p^{\text{ЭФ}}$ и уменьшается $\alpha_p^{\text{ЭФ}}$, достигая в точке $A^{(-)}$ минимума.

Следовательно, угловое ускорение $d\omega/dt$ в окрестности точки $A^{(-)}$ также будет иметь минимум. При приближении $\alpha_{p2} \rightarrow -\alpha_{\text{КР}}$, угол $\alpha_p^{\text{ЭФ}} \rightarrow 0$, $d\omega/dt \rightarrow 0$, и $\bar{\omega} = \bar{\omega}_A$ – угловая скорость имеет конечное значение со знаком прежнего направления.

Таким образом, образуется останова судна по ускорению вращения или потере маневренности судном.

При больших значениях $\alpha_{\text{КР}}$ у судна этим можно объяснить случаи невыхода судна из циркуляции, описанные Р. Я. Першицем и другими исследователями.

Это прежде всего должны быть суда, имеющие значительную величину критического угла перекаладки рулей и значительную величину Ω_0 .

Одним из выходов из неблагоприятной ситуации является регламентирование минимально достаточного угла обратной перекаладки рулей $\alpha_p \geq \alpha_p^{\text{min}}$ для выполнения уверенной и быстрой смены направления вращения корпуса судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1983. – 272 с.
2. Feigin M. I., Kagan M. A. Emergencies as a manifestation of the effect of bifurcation memory in controlledunstable systems // МКagan International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2004. – Vol. 14, N 7. – P. 2439–2447.
3. Видецкий А. Ф. Технично-эксплуатационные качества судов смешанного плавания. – М.: Транспорт, 1974. – 272 с.
4. Анализ управляемости судна при выполнении зигзагообразных маневров / А. Б. Ваганов, П. В. Гуров, А. С. Костюнин, И. А. Рябина // Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве». – Нижний Новгород: НГТУ, 2009. – С. 131–134.
5. Васильев А. В., Ваганов А. Б. Расчет управляемости катамаранов // Материалы по обмену опытом. НТО СП им. акад. А. Н. Крылова. Проблемы гидродинамики судов внутреннего плавания. – Л., 1978. – 14 с.

6. Ваганов А. Б. Методика расчета управляемости и обоснование характеристик движительно-рулевого комплекса катамарана // Республ. межвед. науч.-техн. сб. «Судостроение». – Вып. 27. – Киев – Одесса, 1978. – 8 с.
7. Васильев А. В. Управляемость судов. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
8. Соболев Г. В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. – Л.: Судостроение, 1980. – 477 с.

Статья поступила в редакцию 1.04.2011

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ваганов Александр Борисович – Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева; г-р техн. наук; профессор кафедры «Теория корабля и гидромеханика»; тел.: 8 (831) 436-80-13.

Vaganov Alexander Borisovich – Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev; Doctor of Technical Science; Professor of the Department "Theory of a Ship and Hydromechanics"; tel. 8 (831) 436-80-13.

Костюнин Александр Сергеевич – Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева; аспирант кафедры «Теория корабля и гидромеханика»; тел.: 8 (831) 436-80-13.

Kostyunin Alexander Sergeevich – Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev; Postgraduate Student of the Department "Theory of a Ship and Hydromechanics"; tel. 8 (831) 436-80-13.