УДК 656.61.052 **DOI: 10.31653/2306-5761.27.2017.170-177**

REFINEMENT OF ANULTRA LARGE CONTAINER VESSEL MATHEMATICAL MODEL BASED ON THE SPEED TRIALS RESULTS

УТОЧНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ХОДКОСТИ КОНТЕЙНЕРОВОЗА КЛАССА ULCS ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

O. Pipchenko[1], *PhD, captain,* **S. Kopanskiy[2]**, *SDPO,* **V. Shevchenko[1],** *PhD*

А.Д. Пипченко[1], *ктн,кдп,* **С. В. Копанский[2],** *SDPO,* **В. А. Шевченко[1],** *ктн*

[1]*NationalUniversity "OdessaMaritimeAcademy", Ukraine*

[2]*MUTAVI, UAE*

[1]*Национальный университет «Одесская Морская Академия»,Украина*

[2]*MUTAVI, ОАЭ*

ABSTRACT

To represent vessel's speed manoeuvre dynamics one degree of freedom model forlongitudinal motion was built and compared versus sea trial data. Due to certain ambiguity in process of coefficients calculation, which caused by use of generic formulas usually applied to a wide range of ships, big discrepancies between estimation and trial results were observed. To minimize that discrepancies numerical optimization techniques has been used. Model coefficients were refined applying Nelder-Mead's method, which provided satisfactory accuracy of simulated data.

Keywords:vessel maneuvering, mathematical model, ultra large container vessel, sea trials, numerical optimization.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

На сегодняшний день все более актуальной становится проблема моделирования движения контейнеровозов особо крупного размера (более 10 000 TEU) с целью применения их на симуляторах и при расчетах безопасности судоходных путей. Это связано с увеличением количества аварийных случаев именно с судами такого типа. В свою очередь экономические потери, связанные с инцидентами особо крупных контейнеровозов, имеют колоссальный масштаб.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Моделированию движения судна посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. Существуют как линейные модели,

предусматривающие управление курсом при постоянной средней скорости, так и нелинейные модели, позволяющие просчитать динамику судна в широком диапазоне параметров движения.

Разделение уравнений движения по различным осям является наиболее целесообразным методом моделирования. Различные виды общей системы управления судном отображены в работах [1, 2, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 17].

Наибольшей проблемой при разработке модели, как правило, является определение ее коэффициентов. В основном, без данных эксперимента, коэффициенты модели можно определить по обобщенным формулам, что не всегда позволяет получить результат удовлетворительной точности.

Поэтому для последующего уточнения модели прибегают к методам численной оптимизации [12, 16]. Однако корректировка модели сразу по всем степеням свободы может негативно отразится на качестве результатов. Более эффективным является поэтапная корректировка, когда в первую очередь уточняется модель ходкости, а затем вся система уравнений полностью.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

В данной работе авторы решили сфокусироваться на ходкости особо крупного контейнеровоза и определить коэффициенты модели, наиболее точно отображающие его характеристики разгона и торможения.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

3. Структура модели ходкости судна

Уравнение продольного движения судна, можно выразить следующим образом [1,4, 6, 8, 10]:

$$(m+m_x)\dot{u}_G = X \tag{1}$$

где m – водоизмещение судна; m_x, m_y– присоединенные массы, u_G–продольная составляющая поступательной скорости; X–гидродинамическая сила, действующая на судно в продольном направлении.

В развернутом виде продольную гидродинамическую силу представим, как:

$$X = X_H + X_R + X_P\,, \tag{2}$$

где H - корпус;R – руль;P – винт.

Перо руля влияет на скорость судна, когда находится в ненулевом положении, и в данном случае учитываться не будет.

4. Силы и моменты, действующие на корпус

Сила сопротивления воды X_H выражается следующим образом:

$$X_H = X_0^{'}(U)\cdot\left(\frac{\rho}{2}LdU^2\right), \tag{3}$$

где ρ – плотность воды, X_0– коэффициент силы сопротивления, действующей в продольном направлении, L–длина судна между перпендикулярами, d–средняя осадка судна, U – скорость судна.

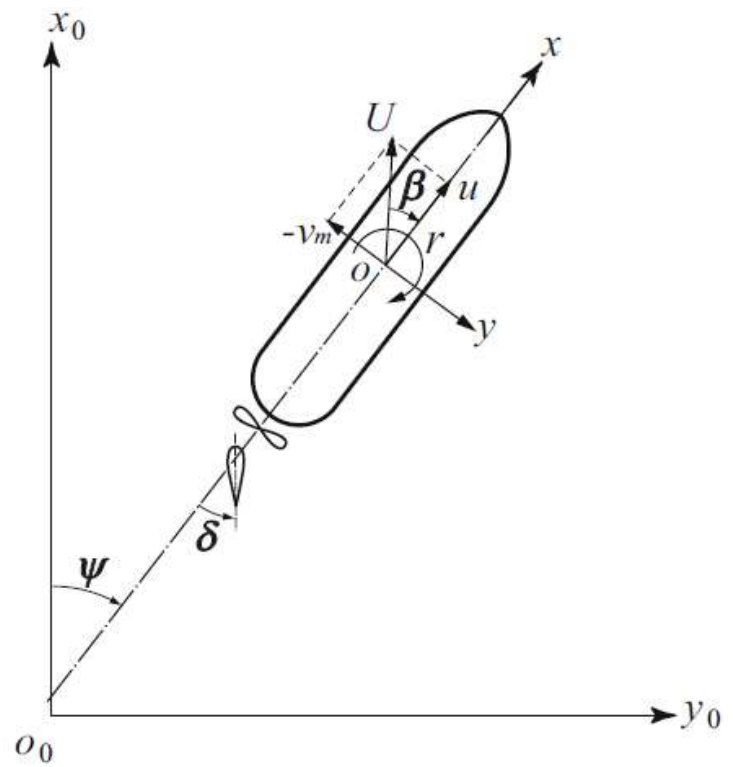

Рис. 1. Системы координат для моделирования движения судна

Силу упора, создаваемую винтом, можно рассчитать по формуле:

$$X_P = (1 - t_P) \cdot T; \tag{4}$$

$$T = \rho \cdot n_P^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T\left(J_P\right); \tag{5}$$

$$K_T(J_P) = k_0 + k_1 \cdot J_P + k_2 \cdot J_P^2 + k_3 \cdot J_P^3; \tag{6}$$

$$J_P = \frac{u\left(1 - w_P\right)}{n_P D_P}, \tag{7}$$

где T – упор винта, t_P– коэффициент уменьшения упора, n_P – обороты винта, D_P – диаметр винта, K_T – коэффициент упора, J_P – скольжение винта, w_P – коэффициент влияния корпуса, $k_{0\text{-}3}$ – коэффициенты, аппроксимируемые по результатам испытаний.

Коэффициенты уравнений (3) и(4) могут быть определены согласно методикам приведенным в [1, 2, 6-13,15, 17] либо могут взяты из базы данных для судна с пропорциональным размерами.

5. *Моделирование и последующая корректировка по результатам испытаний*

Типовыми маневрами при испытаниях ходкости судов являются разгон, активное и пассивное торможение. Эти данные возьмём из отчета о ходовых испытаниях контейнеровозаMaersk Sirac, 2015 года постройки, вместимостью 10 000 TEU. В таблице 1 приведены основные параметры данного судна.

Maersk Sirac – сведения о судне

Параметр	**Значение**
Длина наибольшая, м	300
Длина между перпендикулярами, L,м	287
Ширина судна, B, м	48.2
Осадка (средняя / максимальная) в грузу,d, м	12.5/15.0
Осадка носом на испытаниях, м	4.02
Осадка кормой на испытаниях, м	10.16
Диаметр винта,D_P, м	9.7
Коэффициент полноты (в балласте), C_b	0.6044
Площадь смоченной поверхности, Ω, м^2	11656
Коэффициент плоскости мидель-шпангоута, C_M	0.9735
Площадь пера руля, A_R, м2	78.95

Непосредственно для расчетов уравнение поступательного движения по оси X можно выразить следующим образом:

$$\dot{u} = \frac{(1-t_P)\cdot\rho\cdot n_P^2\cdot D_P^4\cdot K_T\left(J_P\right)+\frac{1}{2}X_0\cdot\rho\cdot L\cdot d\cdot U^2}{m+m_x}. \quad (8)$$

Коэффициент X_0 = - 0.014 в данном случае, взят из расчетов сопротивления судна [7].Важно отметить, что отсутствие достоверного значения X_0 значительно увеличивает неопределённость при уточнении других коэффициентов. При отсутствии экспериментального значения X_0 применяются методы расчета сопротивления на тихой воде такие как [3].

Коэффициентыt_Pи w_Pможно определить по приближенным формулам:

$$t_P = 0.325\cdot C_b - \frac{0.1885\cdot D_P}{\sqrt{B\cdot d}};$$

$$w_P = 0.5C_b - 0.05.$$

Коэффициенты при J_P аппроксимируются по имеющимся данным испытаний винтов. В нашем случае, эти данные отсутствуют и в первом приближении в результате расчетов зависимости скорости судна от оборотов винта получается результат, отображенный на рис.2-4.

При этом, если обратить внимание на формулы коэффициентов упора K_Tи скольженияJ_P, при задании отрицательных оборотов, коэффициент упора может

обрести неправильное значение. Это связано с тем, что скольжение будет отрицательным при положительной скорости, и, соответственно, составляющие уравнения (2) будут вычитаться из коэффициента k_0.

Для корректного отображения маневра на задний ход формулы (5) и (7) необходимо представить в виде:

$$T = \rho \cdot D_P^4 \cdot K_T\left(J_P\right) \cdot n_P \cdot \left|n_P\right|; \tag{9}$$

$$J_P = \left|\frac{u\left(1 - w_P\right)}{n_P D_P}\right|. \tag{10}$$

После подбора коэффициентов уравнения (6) методом Нелдера-Мида результат расчетов практически совпадает с экспериментом, среднее отклонение от которого составляет 0.26 узла. Целевая функция, использованная при оптимизации, имеет вид:

$$Z = \frac{\sum_{n=1}^{N}\left|U_{Tn} - U_{Sn}\right|}{N}, \tag{11}$$

где U_T – скорость, измеренная при испытаниях, U_S–скорость, полученная в результате симуляции.

Однако последующий расчет манёвров активного и инерционного торможения не дают удовлетворительного результата. Это связано с тем, что оптимизационная программа корректирует только коэффициент k_0, а остальные коэффициенты уменьшает практически до нуля. Это в свою очередь исключает эффект скольжения винта из модели. Поэтому для корректной оптимизации при расчете целевой функции необходимо учитывать сразу три маневра: разгон, инерционное торможение и активное торможение.

С учетом выше изложенного целевая функция (11) примет вид:

$$Z = w_1 \frac{\sum_{n=1}^{N}\left|U_{Tn} - U_{Sn}\right|}{N} + w_2 \frac{\sum_{n=1}^{N}\left|U_{CSTn} - U_{CSSn}\right|}{N} + w_3 \frac{\sum_{n=1}^{N}\left|U_{ISTn} - U_{ISSn}\right|}{N} + w_4 \frac{\sum_{n=1}^{N}\left|D_{CSTn} - D_{CSSn}\right|}{N} + w_5 \frac{\sum_{n=1}^{N}\left|D_{ISTn} - D_{ISSn}\right|}{N}, \tag{12}$$

где D – пройденная дистанция, w – весовой коэффициент, индекс CS–активное торможение, IS–инерционное торможение.

Так как погрешности дистанции и скорости имеют разные порядки, их необходимо приводить к одному порядку при помощи весовых коэффициентов. В данном случае w = [1 1 1 0.001 0.001].

В результате повторной оптимизации уточняются коэффициенты k_1, k_2 и k_3, что позволяет получить результат удовлетворительной точности, отображенный на рис. 2-4 и в таблице 2.

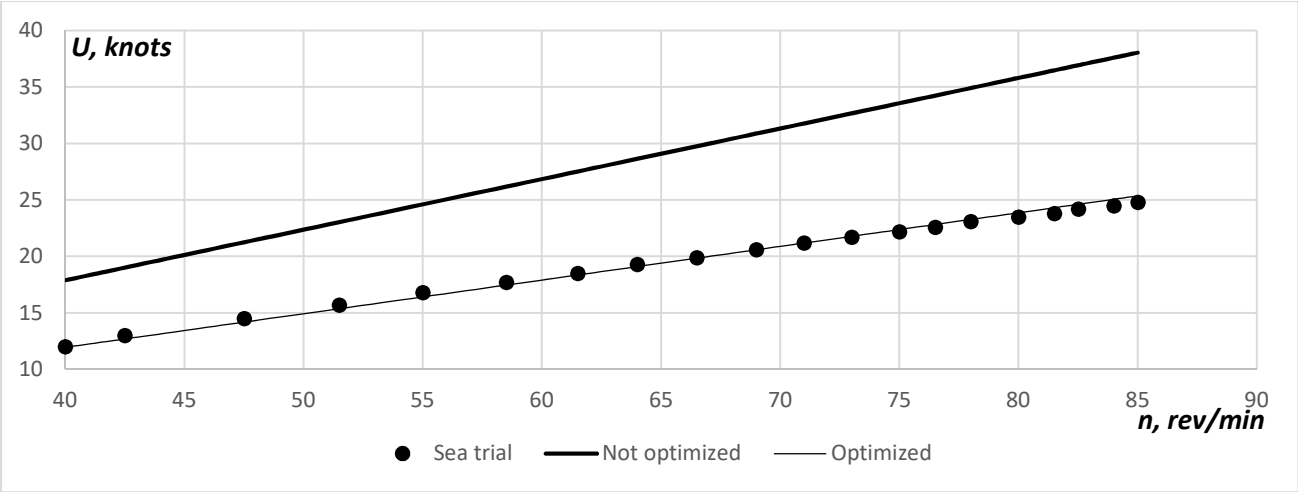

Рис. 2. Зависимость скорости от оборотов

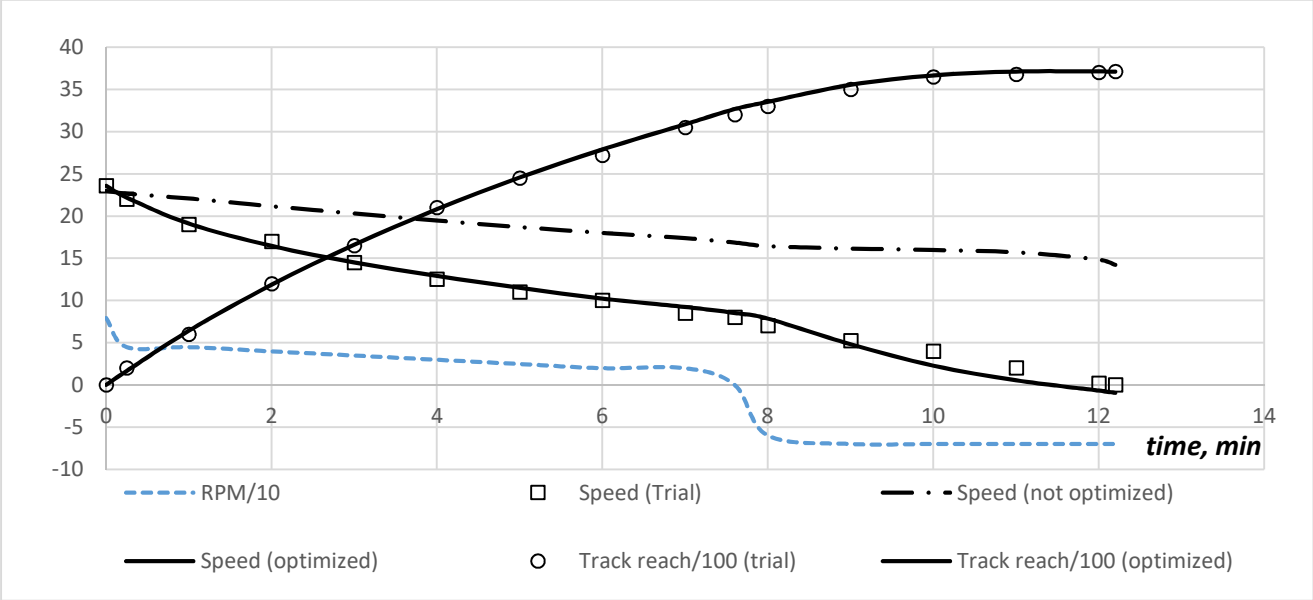

Рис. 3. Кривые активного торможения

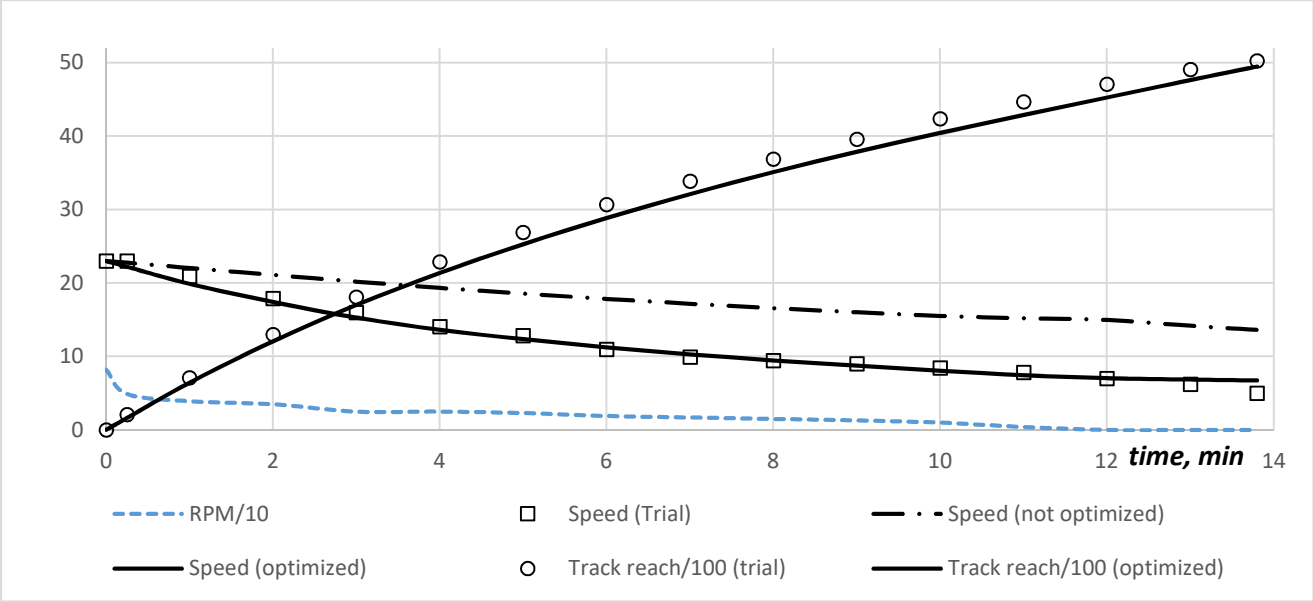

Рис. 4. Кривые пассивного торможения

Результаты корректировки математической модели

Параметр	Значение
Среднее отклонение скорости при разгоне, Δ_U	0.26 узла
Среднее отклонение скорости при активном торможении, Δ_{UCS}	0.59 узла
Среднее отклонение скорости при инерционном торможении, Δ_{UIS}	0.50 узла
Относительная погрешность расчета дистанции активного торможения, Δ_{DCS}	0.04 % / 1.0 м
Относительная погрешность расчета дистанции инерционного торможения, Δ_{DIS}	1.5 % / 77.1 м

Коэффициенты до корректировки				Коэффициенты после корректировки			
k_0	k_1	k_2	k_3	k_0	k_1	k_2	k_3
0.16	-0.068	0.074	0.022	0.06104	0.8632	-1.0901	0.067

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

В статье представлена методика корректировки модели ходкости особо крупного контейнеровоза (более 10 000 TEU) по данным испытаний. Предложена целевая функция, позволяющая получить оптимальный результат с применением метода симплексного поиска Нелдера-Мида.

В таком виде модель ходкости, может быть далее интегрирована в общую модель маневрирования судна. Соответственно, аналогичная корректировка коэффициентов должна быть произведена и для общей модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. ABS Guide for Vessel Maneuverability, 2006
2. Fossen T. I. Marine Control Systems. Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles / T. I. Fossen– Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002 – 570 p.
3. Holtrop J. An Approximate Power Prediction Method / Holtrop J., Mennen G. // International Shipbuilding Progress, 29, 335, 1982, pp. 166–170.
4. Ho-Young Lee. The Prediction of ship's manoeuvring performance in initial design stage / Ho-Young Lee, Sang-Sung Shin // Practical Design of Ships and Mobile Units. Elsevier Science, 1998. – 7 p.
5. IMO MSC 76/23, “Resolution MSC.137 (76),Standards for Ship Manoeuvrability,” Report of the Maritime Safety Committee on Its Seventy-Sixth Session-Annex 6, 2002
6. Kijima, K. On a Prediction Method of Ship Manoeuvring Characteristics/Kijima, K., Tanaka, S. Furukawa, Y. and Hori, T. // Proc. of MARSIM-93, Vol.1, 1993. – pp. 285-294.

7. MAERSK SIRAC – Sea Trial results. Hyundai Heavy Industries. 2015. – 15 p.
8. Perez T. Mathematical Ship Modeling for Control Applications. (Technical Report) / T. Perez, M. Blanke–DTU Technical University of Denmark, 2003. – 22 p.
9. The Manouvering Committee. Final Report and Recommendations to the 24th ITTC, 2005. – 62 p.
10. Yasukawa H. Introduction of MMG standard method for ship maneuveringpredictions / YasukawaH., YoshimuraY. // Journal of Marine Science&Technology (2015)20, 2015 – pp. 37–52.
11. Басин А.М. Гидродинамика судов на мелководье / А.М.Басин, И.О.Веледницкий, А.Б. Ляховицкий.. – Л.: Судостроение, 1976.– 215с.
12. Вагущенко А. Л. Улучшение модели движения судна по результатам маневренных испытаний / Вагущенко А. Л., Вагущенко Л. Л. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 12. – Одесса: «ИздатИнформ», 2006 - С. 31-36.
13. Вагущенко Л.Л.Системы автоматического управления движением судна. 2-е изд., перераб. и доп. / Л.Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал– Одесса: Латстар, 2002. – 310 с.
14. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник / А. Д. Гофман– Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.
15. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1983, 272 с.
16. Пипченко А. Д. Уточнение математической модели движения судна // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 10. – Одесса: «ИздатИнформ», 2005 - С. 97-105.
17. Справочник по теории корабля. В трех томах / [под ред. Я.И. Войткунского] – Л.: Судостроение, 1985.