

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СУДНА

*А. А. Дыда, К. Н. Чумакова*

*Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,  
Владивосток, Российская Федерация*

Важной задачей современной теории управления является построение адекватной математической модели для конкретного динамического объекта или движения судна, т. е. его идентификация (структурная или параметрическая). Предлагается построить нелинейную модель продольного движения судна. Практические данные получены экспериментально, приводится краткое описание экспериментальной платформы для безэкипажного катера и оборудования, использованного при исследовании динамических характеристик объекта. Отмечается, что для катера характерны три режима движения: водоизмещающий, переходный и глиссирующий. Определена связь между тягой движителя и скоростью движения катера. Для решения задачи идентификации предлагается воспользоваться аппаратом степенных рядов. Коэффициенты степенного ряда определены экспериментальным путем. Задача подбора коэффициентов степенного ряда может быть решена с помощью метода наименьших квадратов, использованы возможности вычислительной среды MS Excel. Решение задачи получено путем использования различного количества членов степенных рядов ( $N = 1, 3, 5$ ). Подтверждена работоспособность предложенного подхода.

**Ключевые слова:** движение судна, идентификация, степенные ряды, нелинейные модели, динамические объекты, система управления.

**Для цитирования:** Дыда А. А., Чумакова К. Н. Идентификация параметров математической нелинейной модели продольного движения судна // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 2. С. 99–107. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-99-107.

### Введение

В практике исследования и построения систем управления движением судна широкое распространение получили как линейные, так и нелинейные модели. К ним относятся достаточно простые модели, такие как модели Беха [1], Норбина [2] и др.

В современной теории управления разработано множество методов исследования и построения систем различной природы и назначения. Основные задачи при этом связаны с разработкой алгоритмов и систем управления конкретными динамическими объектами. Основу для решения указанных задач составляют математические модели конкретных управляемых объектов. Построение соответствующих математических моделей, как правило, представляет собой сложную задачу. Настоящая работа направлена на построение нелинейной модели продольного движения судна. Построение модели конкретного управляемого динамического объекта или решение задачи его идентификации может быть связано с необходимостью определения аналитической структуры его уравнений (структурная идентификация) и/или нахождения параметров объекта при уже выбранной структуре (параметрическая идентификация).

Решению задач идентификации посвящено множество публикаций, например [3–6]. В настоящей работе при решении задачи построения модели исследуемого объекта – морского судна – предлагается использовать степенные ряды для представления априорно неизвестной нелинейной составляющей (компоненты), входящей в математическую модель продольного движения судна. Такой подход позволяет в некоторой степени решить проблему функциональной неопределенности, связанной со спецификой влияния водной среды на движение судна.

Ввиду сложности полных многомерных нелинейных моделей движения судна упрощенные, в том числе указанные нелинейные модели, получили наибольшее практическое применение при синтезе систем управления. Построение модели динамики объекта, в частности морского судна, основаны, как правило, на использовании экспериментальных данных и полученных на их основе зависимостей. В статье на примере достаточно простого объекта демонстрируется возможность построения нелинейной модели продольного движения судна.

### Методы и материалы исследования

Для проведения эксперимента использовался безэкипажный катер (БЭК) [4]. Экспериментальная платформа БЭК (рис. 1) представляет собой алюминиевый глиссирующий катер с катмаранными обводами корпуса асимметричного типа, с плоскими внутренними поверхностями («Split Hull») [7].

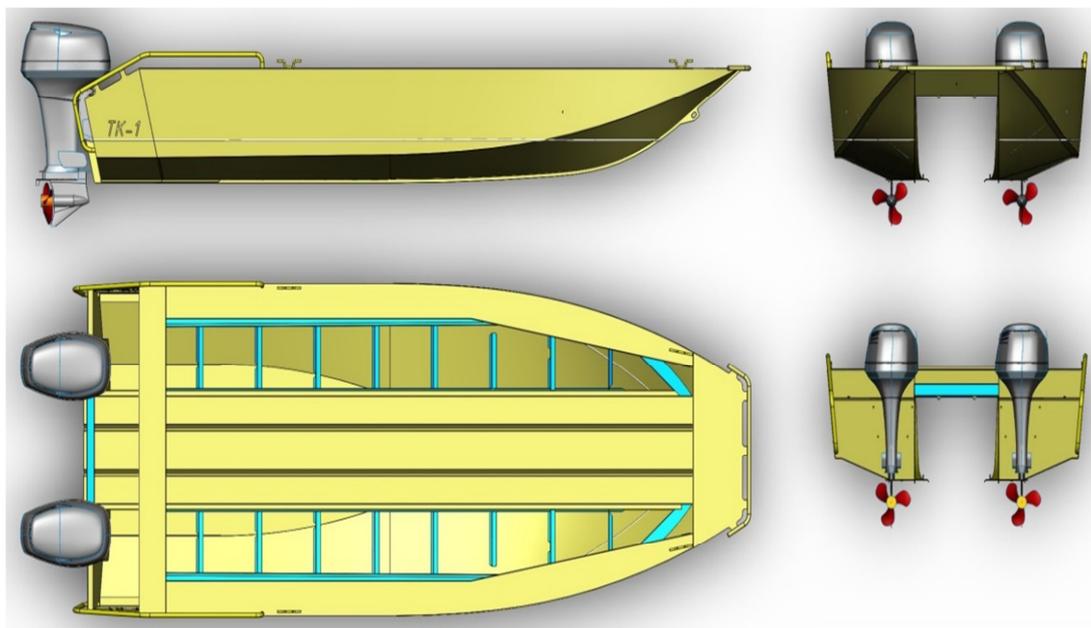


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной платформы для безэкипажного катера

Длина катера составляет 6 м, ширина 2,6 м, водоизмещение 1,3 т. Силовая установка состоит из двух подвесных лодочных моторов мощностью по 40 л. с.

При разработке математической модели нужно учитывать, что динамические характеристики катера могут существенно отличаться на разных режимах движения. Используемый катер имеет несколько основных режимов движения: водоизмещающий, переходный и глиссирующий. Для сбора экспериментальных данных использовались установившиеся режимы движения на ряде фиксированных диапазонов скоростей: 1,5–2, 2,5–3, 3,5–4, 4–5, 5–8 м/с.

Для сбора экспериментальных данных можно использовать различные стандартные техники маневрирования, которые были предложены на Международной конференции опытовых бассейнов (International Towing Tank Conference) и описаны в работе Тора Фоссена [8]. Это маневры: циркуляция, зигзаг, спираль, разгон-торможение и т. д.

В нашем случае сбор данных происходил на спокойной воде при выполнении маневров «зигзаг» и «циркуляция», как наиболее подходящих для оценки динамики судна по курсу [9]. В процессе выполнения указанных маневров с частотой 10 Гц производилась запись необходимых параметров: скорости движения, углов скорости и текущего положения рулевого колеса. Данные скорости поступали с GPS/Глонасс приемника, а для получения данных угловой скорости использовался датчик ориентации CH Robotics UM7-LT [10].

### Сущность предложенного подхода

Для решения задачи идентификации использовали данные, которые были получены следующим образом. На катере задавалось значение тяги движителя  $F_j$ , после этого измерялось установившееся значение скорости катера  $v_j$ , далее процесс повторялся для следующих значений  $F_j$  с измерением  $v_j$ . Результаты этих экспериментов приведены на графике (рис. 2) и в табл. 1.

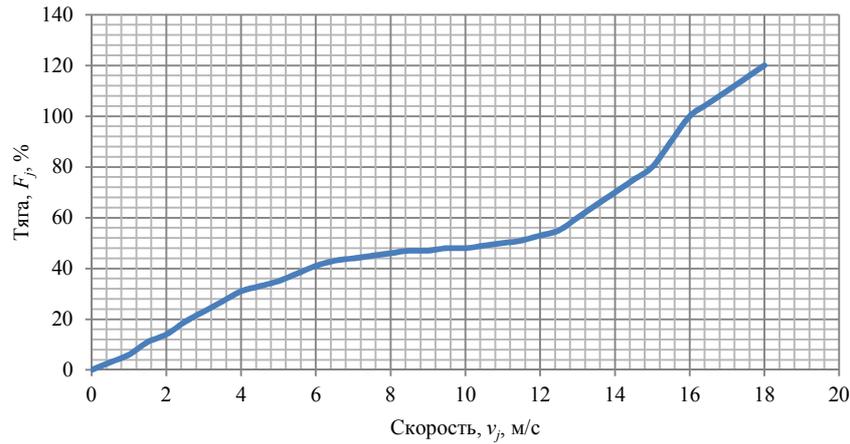


Рис. 2. Установившиеся скорости при заданной тяге

Таблица 1

**Экспериментальная зависимость установившейся скорости  $v_j$  и тяги движителя  $F_j$**

$v_j$	$F_j$	$v_j$	$F_j$	$v_j$	$F_j$
0	0	6,5	43	12,5	55
0,5	3	7	44	13	60
1	6	7,5	45	13,5	65
1,5	11	8	46	14	70
2	14	8,5	47	14,5	75
2,5	19	9	47	15	80
3	23	9,5	48	15,5	90
3,5	27	10	48	16	100
4	31	10,5	49	16,5	105
4,5	33	11	50	17	110
5	35	11,5	51	17,5	115
5,5	38	12	53	18	120
6	41				

Известно, что прямолинейное движение объекта может быть описано дифференциальным уравнением

$$m \frac{dv}{dt} = F - F_c(v),$$

где  $m$  – масса БЭК (включая присоединенные массы воды);  $v$  – линейная скорость катера;  $F$  – сила тяги;  $F_c(v)$  – сила сопротивления водной и воздушной среды, зависящая от скорости катера;  $t$  – время.

В установившемся режиме  $\frac{dv}{dt} = 0$ , следовательно  $F = F_c(v)$ . Как следует из экспериментальных данных, сила сопротивления  $F_c$  в зависимости от линейной скорости катера  $v$  имеет существенно нелинейный характер. Это связано, в первую очередь, с изменением режима движения катера при увеличении его скорости. При относительно малой скорости  $v$  катер движется в режиме водоизмещения, при достаточно большой скорости  $v$  переходит в режим глиссирования. Очевидно, что изменение режимов движения катера отражает нелинейный характер его динамики.

Поставим задачу определения связи между тягой движителя и скоростью движения катера. Для решения этой задачи воспользуемся аппаратом степенных рядов [11–13].

Предположим, что зависимость скорости движения катера от тяги движителя нелинейна. Представим силу сопротивления в виде степенного ряда

$$F_c = c_0 + c_1 v + c_2 v^2 + \dots + c_i v^i = \sum_{i=0}^N c_i v^i, \quad (1)$$

где  $N$  – максимальная степень ряда;  $c_i$  – коэффициенты степенного ряда.

Коэффициенты  $c_i$  будем искать из условия наилучшего соответствия получаемой теоретической зависимости экспериментальным данным. Для оценки совпадения теоретической и экспериментальной зависимости зададимся квадратичным критерием вида

$$Q = \sum_{j=1}^n (F_j - \sum_{i=0}^N c_i v_j^i)^2, \quad (2)$$

где  $F_j$  – заданное значение силы  $F$  в  $j$ -м эксперименте;  $v_j$  – соответствующее значение установившейся скорости катера в  $j$ -м эксперименте;  $c_i$  – коэффициенты степенного ряда.

Задача теперь заключается в нахождении таких параметров  $c_i$  (их идентификации), при которых критерий  $Q$  достигает минимума ( $Q \rightarrow \min_{c_i}$ ). Задача оптимизации критерия  $Q$  (2) решалась в среде MS Excel с помощью опции «Поиск решения» [14–16] для  $N = 1, 3, 5$ .

### Численные примеры

Исследуем решение этой задачи при удержании в степенных рядах различного количества членов. В простейшем случае при  $N = 1$  зависимость (1) представляет собой линейную функцию. В результате оптимизации критерия  $Q$  найденные значения коэффициентов равны  $c_0 = 0$ ,  $c_1 = 6,25$ . Очевидно, что в этом случае не учитывается нелинейный характер экспериментально полученной зависимости. Полученная зависимость заметно отличается от экспериментальной, следовательно, представляется целесообразным выполнить аппроксимацию с полиномом более высокого порядка.

В табл. 2 приведены теоретические значения тяги  $F_{mj}$  для различных значений скорости  $v_j$  в соответствии с (1) при  $N = 1$ .

Таблица 2

Оценка силы тяги  $F_{mj}$  при  $N = 1$

$v_j$	$F_{mj}$	$v_j$	$F_{mj}$	$v_j$	$F_{mj}$
0	0	6,5	40,625	12,5	78,125
0,5	3,125	7	43,75	13	81,25
1	6,25	7,5	46,875	13,5	84,375
1,5	9,375	8	50	14	87,5
2	12,5	8,5	53,125	14,5	90,625
2,5	15,625	9	56,25	15	93,75
3	18,75	9,5	59,375	15,5	96,875
3,5	21,875	10	62,5	16	100
4	25	10,5	65,625	16,5	103,125
4,5	28,125	11	68,75	17	106,25
5	31,25	11,5	71,875	17,5	109,375
5,5	34,375	12	75	18	112,5
6	37,5				

Математическая модель продольного движения судна в установившемся режиме при  $N = 1$  имеет вид  $F_m = c_0 + c_1 v$ .

График полученной зависимости приведен на рис. 3.

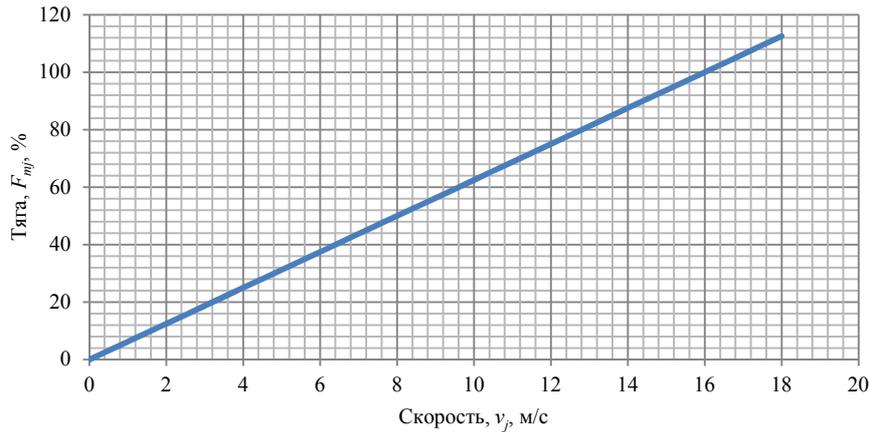


Рис. 3. Связь вектора тяги и скорости движения катера при  $N = 1$

Аналогичным образом были проведены вычисления коэффициентов ряда  $c_i$  и теоретических значений силы тяги  $F_{mj}$  для  $N = 3$  (табл. 3, 4) и  $N = 5$  (табл. 5, 6).

Таблица 3

**Результаты идентификации при  $N = 3$**

$c_i$	Полученные значения
$c_0$	0
$c_1$	4,92073680172097
$c_2$	0,0126527403370123
$c_3$	0

Таблица 4

**Оценка силы тяги  $F_{mj}$  при  $N = 3$**

$v_j$	$F_{mj}$	$v_j$	$F_{mj}$	$v_j$	$F_{mj}$
0	0	6,5	32,51936749	12,5	63,4862007
0,5	2,463531586	7	35,06514189	13	66,10789154
1	4,933389542	7,5	37,61724266	13,5	68,73590875
1,5	7,409573868	8	40,1756698	14	71,37025233
2	9,892084565	8,5	42,7404233	14,5	74,1092228
2,5	12,38092163	9	45,31150318	15	76,6579186
3	14,87608507	9,5	47,88890943	15,5	79,31124129
3,5	17,37757488	10	50,47264205	16	81,97089035
4	19,88539105	10,5	53,06270104	16,5	84,63686579
4,5	22,3995336	11	55,6590864	17	87,30916759
5	24,92000252	11,5	58,26179813	17,5	89,98779576
5,5	27,4467978	12	60,87083623	18	92,6727503
6	29,97991946				

Таблица 5

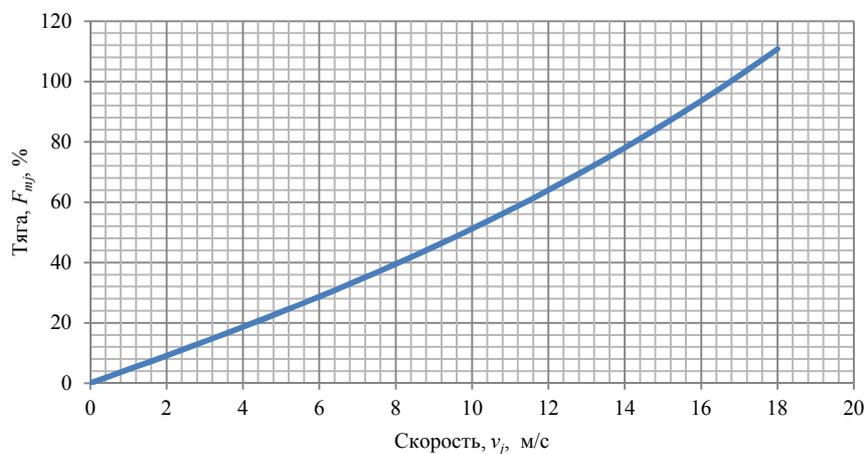
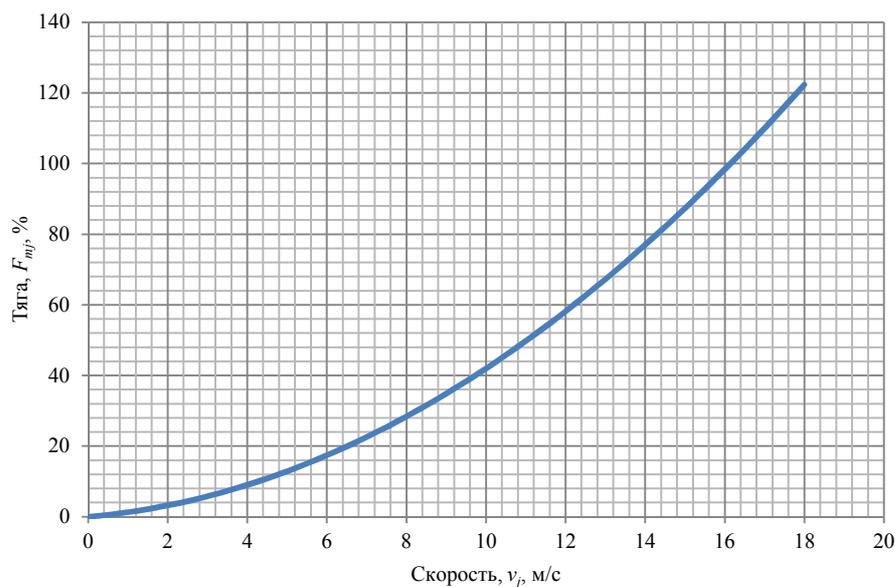
**Результаты идентификации при  $N = 5$**

$c_i$	Полученные значения
$c_0$	1,07281728370862E-11
$c_1$	0,955249431789216
$c_2$	0,324434260668814
$c_3$	0
$c_4$	0
$c_5$	0

Оценка силы тяги  $F_{mj}$  при  $N = 5$ 

$v_j$	$F_{mj}$	$v_j$	$F_{mj}$	$v_j$	$F_{mj}$
0	0	6,5	19,91646951	12,5	62,63347367
0,5	0,558733286	7	22,5840256	13	67,24763541
1	1,27968371	7,5	25,41379882	13,5	72,0240143
1,5	2,162851272	8	28,40578918	14	76,96261032
2	3,208235973	8,5	31,55999668	14,5	82,06342348
2,5	4,415837812	9	34,87642132	15	87,32645378
3	5,78565679	9,5	38,3550631	15,5	92,75170122
3,5	7,317692906	10	41,99592201	16	98,3391658
4	9,011946161	10,5	45,79899807	16,5	104,0888475
4,5	10,86841655	11	49,76429126	17	110,0007464
5	12,88710409	11,5	53,89180159	17,5	116,0748624
5,5	15,06800876	12	58,18152906	18	122,3111955
6	17,41113056				

График полученной зависимости при  $N = 3$  приведен на рис. 4, при  $N = 5$  – на рис. 5.

Рис. 4. Связь вектора тяги и скорости движения катера при  $N = 3$ Рис. 5. Связь вектора тяги и скорости движения катера при  $N = 5$

Математическая модель продольного движения судна в установившемся режиме при  $N = 3$  имеет вид  $F_m = c_0 + c_1v + c_2v^2 + c_3v^3$ , при  $N = 5 - F_m = c_0 + c_1v + c_2v^2 + c_3v^3 + c_4v^4 + c_5v^5$ .

По результатам расчетов наибольшее совпадение с экспериментальными данными в рассмотренных случаях достигается при  $N = 5$ .

Для оценки адекватности получаемых математических моделей при  $N$ , принимающей значения 1, 3, 5, воспользуемся критерием Фишера [17]. При этом требуется вычислить показатель  $F_{\text{расчетн}}$  в соответствии с формулой

$$F_{\text{расчетн}} = \frac{\sum_{j=1}^n (F_{mj} - F_{\text{ср.}m})^2}{m} \frac{n - m - 1}{\sum_{j=1}^n (F_j - F_{mj})^2},$$

где  $n = 36$  – количество экспериментов;  $m = 1$  – количество факторов;  $F_{\text{ср.}m}$  – среднее значение  $F_{mj}$  ( $j = 1, \dots, n$ ).

Для рассмотренных значений  $N$  были вычислены значения критерия Фишера, которые приведены в табл. 7.

Таблица 7

Значения критерия Фишера при  $N = 1, 3, 5$

$N$	$F_{\text{расчетн}}$
1	314,76
3	228,98
5	315,3

В рассматриваемом случае при уровне значимости 0,01 табличное значение критерия Фишера, расчет которого встроен в MS Excel, составляет 7,4. Таким образом, все рассмотренные модели имеют высокую степень адекватности. Наиболее точной является модель для  $N = 5$ .

### Заключение

Предложена нелинейная модель динамики продольного движения судна. Особенностью рассмотренной модели является возможность учета смены режима движения судна (БЭК) с водоизмещающего на глиссирование. Экспериментальные данные демонстрируют существенно нелинейный характер динамики судна. Для учета нелинейного характера движения судна было предложено использование степенных рядов. Оценка, или идентификация, коэффициентов степенного ряда, который используется для аппроксимации силы вязкого сопротивления как функции скорости судна, выполнялись на основе экспериментальных данных и оптимизации критерия квадратичного типа, выражающего невязку теоретических и экспериментальных значений измеряемых переменных. С помощью критерия Фишера показана высокая степень адекватности построенных математических моделей, соответствующих экспериментальным данным.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bech M. I.* Some aspects of the stability of automatic course control of ships // Proc. Int. Symp. on Directional Stability and Control of Bodies Moving in Water. Journal Mech. Engineerinr Science. 1972. V. 14. N. 77. P. 123–131.
2. *Norrbin N. H.* On the Design and Analysis of the Zig-Zag Test on Base of Quasilinear Frequency Response // Technical Report No. B140-3. The SwedenState Shipbuilding Experimental Tank (SSPA). 1963. V. 14. Iss. 7. P. 91–107.
3. *Гриняк В. М., Девятисильный А. С.* Идентификация воздушных объектов в системах управления движением судов // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 8. С. 38–40.

4. Дыда А. А., Пляшешник К. Н., Пушкарёв И. И. Построение модели динамики безэкипажного судна по курсу на основе экспериментальных данных // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2020. Т. 12. № 4. С. 716–725. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-716-725.
5. Каретников В. В., Сикарев А. А. Совершенствование системы управления судами с использованием автоматизированных идентификационных систем на внутренних водных путях // Журн. ун-та вод. коммуникаций. 2010. № 3. С. 93–96.
6. Юдин Ю. И., Степахно А. Г., Гололобов А. Н. Использование идентифицированных математических моделей судна для обеспечения безопасности судовождения // Вестн. МГТУ. 2009. Т. 12. № 1. С. 10–12.
7. Назаров А. Особенности проектирования глиссирующих катамаранов // Катера и яхты. 2009. № 2 (218). С. 61–65.
8. Fossen T. I. Marine control systems. Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles // Marine Cybernetics, Trondheim. 2009. P. 330–335.
9. Artyszuk J. Peculiarities of zigzag behaviour in linear models of ship yaw motion // Annual of Navigation. 2016. N. 26. P. 23–38. DOI: 10.1515/aon-2016-0002.
10. UM7-LT datasheet. URL: [http://www.chrobotics.com/docs/UM7%20Datasheet\\_v1-6\\_10.1.2016.pdf](http://www.chrobotics.com/docs/UM7%20Datasheet_v1-6_10.1.2016.pdf) (дата обращения: 10.07.2019).
11. Вержбицкий В. М. Численные методы. Математический анализ и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с.
13. Карасев В. А., Левшина Г. Д., Михин В. Ф. Математический анализ: учеб. М.: КНОРУС, 2020. 354 с.
14. Пащенко И. Г. Excel 2007. М.: Эксмо, 2009. 496 с.
15. Леоненков А. В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 704 с.
16. Блаттнер П. Использование Microsoft Office Excel 2003: спец. изд. / пер. с англ. М.: Вильямс, 2005. 864 с.
17. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1999. 575 с.

Статья поступила в редакцию 08.02.2021

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Александр Александрович Дыда* – д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры автоматических и информационных систем; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; Россия, 690059, Владивосток; [adyda@mail.ru](mailto:adyda@mail.ru).

*Ксения Николаевна Чумакова* – аспирант кафедры автоматических и информационных систем; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; Россия, 690059, Владивосток; [ksushechka\\_1991@mail.ru](mailto:ksushechka_1991@mail.ru).



### **IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF MATHEMATICAL NON-LINEAR MODEL OF VESSEL LONGITUDINAL MOTION**

*A. A. Dyda, K. N. Chumakova*

*Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy,  
Vladivostok, Russian Federation*

**Abstract.** The article considers the important task of modern control theory to construct an adequate mathematical model of a specific dynamic object or vessel movement, that is, its identifica-

tion (structural or parametric). It is proposed to construct a nonlinear model of the longitudinal motion of the ship. Practical data were obtained experimentally, a brief description of the experimental platform for an unmanned boat and equipment used in the study of the object dynamic characteristics is given. It is noted that the boat is characterized by three modes of movement: displacement, transitional and planning. The relationship between the thrust of the propeller and the speed of the boat is determined. To solve the identification problem in the work, it is proposed to use the apparatus of power series. The power series coefficients are determined experimentally. The problem of selecting the coefficients of a power series can be solved using the least squares method. In order to avoid the cumbersome calculations there were used numerical optimization methods applying the capabilities of the MS Excel computing environment. The solution to the problem was obtained by using a different number of members of the power series ( $N = 1, 3, 5$ ). The efficiency of the proposed approach is justified.

**Key words:** ship motion, identification, power series, nonlinear models, dynamic objects, control system.

**For citation:** Dyda A. A., Chumakova K. N. Identification of parameters of mathematical non-linear model of vessel longitudinal motion. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2021;2:99-107. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-99-107.

#### REFERENCES

1. Bech M. I. Some aspects of the stability of automatic course control of ships. *Proc. Int. Symp. on Directional Stability and Control of Bodies Moving in Water. Journal Mech. Engineerinr Science*, 1972, vol. 14, no. 77, pp. 123-131.
2. Norrbinn N. H. On the Design and Analysis of the Zig-Zag Test on Base of Quasilinear Frequency Response. Technical Report No. B140-3. *The SwedenState Shipbuilding Experimental Tank (SSPA)*, 1963, vol. 14, iss. 7, pp. 91-107.
3. Griniak V. M., Deviatisil'nyi A. S. Identifikatsiia vozduzhnykh ob"ektov v sistemakh upravleniia dvizheniem sudov [Aircraft identification in traffic control systems]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, 2012, no. 8, pp. 38-40.
4. Dyda A. A., Pliasheshnik K. N., Pushkarev I. I. Postroenie modeli dinamiki bezekipazhnogo sudna po kursu na osnove eksperimental'nykh dannykh [Building model of unmanned vessel dynamics along course based on experimental data]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 716-725. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-716-725.
5. Karetnikov V. V., Sikarev A. A. Sovershenstvovanie sistemy upravleniia sudami s ispol'zovaniem avtomatizirovannykh identifikatsionnykh sistem na vnutrennikh vodnykh putiakh [Improvement of ship control system using automated identification systems on inland waterways]. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii*, 2010, no. 3, pp. 93-96.
6. Iudin Iu. I., Stepakhno A. G., Gololobov A. N. Ispol'zovanie identifiitsirovannykh matematicheskikh modelei sudna dlia obespecheniia bezopasnosti sudovozhdeniia [Using identified mathematical models of vessel to ensure navigation safety]. *Vestnik MGTU*, 2009, vol. 12, no. 1, pp. 10-12.
7. Nazarov A. Osobennosti proektirovaniia glissiruiushchikh katamaranov [Design features of planing catamarans]. *Katera i iakhty*, 2009, no. 2 (218), pp. 61-65.
8. Fosen T. I. *Marine control systems. Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles*. Marine Cybernetics, Trondheim, 2009, pp. 330-335.
9. Artyszuk J. Peculiarities of zigzag behaviour in linear models of ship yaw motion. *Annual of Navigation*, 2016, no. 26, pp. 23-38. DOI: 10.1515/aon-2016-0002.
10. *UM7-LT datasheet*. Available at: [http://www.chrobotics.com/docs/UM7%20Datasheet\\_v1-6\\_10.1.2016.pdf](http://www.chrobotics.com/docs/UM7%20Datasheet_v1-6_10.1.2016.pdf) (accessed: 10.07.2019).
11. Verzhbitskii V. M. *Chislennyye metody. Matematicheskii analiz i inzhenerov* [Numerical methods. Analysis and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 832 p.
12. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook on mathematics for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 832 p.
13. Karasev V. A., Levshina G. D., Mikhin V. F. *Matematicheskii analiz: uchebnik* [Mathematical analysis: textbook]. Moscow, KNORUS Publ., 2020. 354 p.
14. Pashchenko I. G. *Excel 2007* [Excel 2007]. Moscow, Eksmo Publ., 2009. 496 p.
15. Leonenkov A. V. *Reshenie zadach optimizatsii v srede MS Excel* [Solving optimization problems in MS Excel environment]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005. 704 p.

16. Blattner P. *Using Microsoft Office Excel 2003*. Special ed. Indianapolis, Ind., Que, 2004. 953 p. (Russ. ed.: Blattner P. *Ispol'zovanie Microsoft Office Excel 2003: spets. izd. / per. s angl.* M.: Vil'iams, 2005. 864 s.).

17. Venttsel' E. S. *Teoriia veroiatnostoni: uchebnik dlia vuzov* [Probability theory: textbook for universities]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1999. 575 p.

The article submitted to the editors 08.02.2021

### ***INFORMATION ABOUT THE AUTHORS***

***Alexander A. Dyda*** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Automatic and Information Systems; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; Russia, 690059, Vladivostok; adyda@mail.ru.

***Ksenia N. Chumakova*** – Postgraduate Student of the Department of Automatic and Information Systems; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; Russia, 690059, Vladivostok; ksushechka\_1991@mail.ru.

