

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-863-873

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИНЕЙНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МОРСКИХ СУДОВ ПО ТАБЛИЦАМ МАНЕВРЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

D. A. Oskin¹, E. B. Osokina¹, V. V. Bocharova^{1,2}

¹ Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

² Vladivostok State University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The paper considers the practical implementation of the algorithm for identifying the parameters of linear mathematical models of Nomoto 1st and 2nd order of the marine vessels based on experimental data. Information from the maneuvering element tables containing information on the vessel's circulation is used as experimental data. The initial data are presented in the form of discrete sampling, which allows obtaining the model parameters in a discrete form and then making the transition to a continuous form. The initial data are formed for each type of motion: a loaded vessel, a vessel in ballast, half-board and aboard, starboard and port aboard. The paper uses a method for determining the parameters of the transfer functions of the obtained models using the least squares method for transient characteristics. To improve the quality of the assessment of the parameters of the identified model, it is proposed to interpolate the initial data. The following methods are used in the paper: linear interpolation, interpolation by adjacent points, cubic and spline interpolation. To implement the proposed method, a program has been developed and implemented in the MatLab environment, which allows interpolation of the transient response by a method selected from the proposed ones, and then, based on the interpolated values, to determine the parameters of the transfer function. A block diagram and description of the algorithm for the operation of this program are provided. The result of its operation is a model with its own parameters for each case of vessel motion. The program displays graphs of transient processes for the initial data and calculated ones for each selected type of interpolation, and also displays the parameters of the transfer functions of the models. A description of the source data file used is provided. To assess the quality of software-implemented identification models, a model circulation trajectory is calculated and its graphic construction occurs. As a result of the program, the obtained linear mathematical models are proposed to be grouped and presented in interval form.

Keywords: marine vessel, model Nomoto, parametric identification, interval model, interpolation.

For citation:

Oskin, Dmitry. A., E. B. Osokina and V. V. Bocharova "Practical implementation of parametric identification of linear mathematical models of marine vessels by tables of maneuvering elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 863–873. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-863-873.

УДК 681.51

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИНЕЙНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МОРСКИХ СУДОВ ПО ТАБЛИЦАМ МАНЕВРЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д. А. Оськин¹, Е. Б. Осокина¹, В. В. Бочарова^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского»,
Владивосток, Россия

² ФГБОУ ВО «Владивостокский Государственный Университет»,
г. Владивосток, Россия

В работе рассмотрена практическая реализация алгоритма идентификации параметров линейных математических моделей морских судов Номото 1-го и 2-го порядка по экспериментальным данным. В качестве данных эксперимента используется информация из таблиц маневренных элементов, содержащих сведения о циркуляции судна. Исходные данные представлены в виде дискретных отчетов, что позволяет

получить параметры модели в дискретной форме, и затем осуществить переход к непрерывной форме. Исходные данные формируются для каждого вида движения: судно в грузу, судно в балласте, полборта, на борт, право и лево на борт. В работе использован способ определения параметров передаточных функций получаемых моделей с помощью метода наименьших квадратов по переходным характеристикам. Для улучшения качества оценки параметров идентифицируемой модели предлагается интерполировать исходные данные. В работе использованы следующие методы: линейная интерполяция, интерполяция по соседним точкам, кубическая и сплайн-интерполяции. Для реализации предложенного метода разработана и реализована программа в среде MatLab, позволяющая проводить интерполяцию переходной характеристики выбранным из предложенных методов, затем по интерполированным значениям определять параметры передаточной функции. Приведена блок-схема и описание алгоритма работы данной программы. Результатом ее работы является модель со своими параметрами для каждого случая движения судна. Программа отображает графики переходных процессов для исходных и расчетных данных для каждого выбранного вида интерполяции, а также отображает параметры передаточных функций моделей. Приведено описание используемого файла исходных данных. Для того чтобы оценить качество программно-реализованных идентификационных моделей, выполняются расчет модельной траектории циркуляции и ее графическое построение. В результате работы программы полученные линейные математические модели предлагается сгруппировать и представить в интервальном виде.

Ключевые слова: морское судно, модель Номото, параметрическая идентификация, интервальная модель, интерполяция.

Для цитирования:

Оськин Д. А. Практическая реализация параметрической идентификации линейных математических моделей морских судов по таблицам маневренных элементов / Д. А. Оськин, Е. Б. Осокина, В. В. Бочарова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 863–873. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-863-873.

Введение (Introduction)

Управление морскими подвижными объектами (МПО) осуществляется в условиях существенной структурно-параметрической неопределенности, которая связана с нелинейностью, нестационарностью, а также сложной динамикой взаимодействия с внешней средой и приводит к тому, что использование классических линейных методов для синтеза автоматических систем затруднено. При этом в современной теории управления наряду с классическими методами активно развиваются нелинейные и адаптивные методы синтеза, позволяющие преодолевать данного рода трудности.

Для проектирования и эксплуатации систем автоматического управления так называемых *авторулевых* необходимо решить задачу по определению параметров математических моделей морских судов. Для повышения точности расчетов и настройки регуляторов, а также учета характерных особенностей объекта управления необходимо определить структуру математической модели и ее параметры. В [1] и [2] представлены известные математические модели морских судов: линейные модели Номото 1-го и 2-го порядка и нелинейные модели Беха и Норрбина. Данные модели представлены в виде линейных и нелинейных дифференциальных уравнений.

При идентификации необходимо учесть, что исходная задача разделяется на две подзадачи: определение структуры и определение параметров. Первая подзадача, как правило, выполняется на основе эмпирически полученного знания о структуре модели. В данном случае ограничимся известными линейными моделями Номото 1-го и 2-го порядка, структура которых хорошо изучена. Вторая подзадача состоит в определении параметров используемых моделей, для обеспечения близости их динамических свойств к реальным объектам.

В работах [3–5] рассмотрены общие сведения теории идентификации, приведена постановка задачи и обобщенные методы решения. В [6] исследуется подход, связанный с использованием метода наименьших квадратов для решения задачи параметрической идентификации математической модели морского судна, заданной классическим уравнением Номото. В качестве экспериментальных данных, на основании которых проводилась идентификация, использовались данные, полученные с имитатора сигналов ИС-2000¹. В данной версии имитатора обеспечивается снятие

¹ Инженерный центр информационных и управляющих систем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ec-ics.ru>. (Дата обращения: 30.09.2024).

данных с виртуальных датчиков (GPS, компас, лаг, рулевая машина) моделей нескольких типов судов, движущихся прямолинейно под воздействием внешних сил (ветро-волновые воздействия, течение). На основе результатов исследований разработано программное обеспечение², позволяющее проводить идентификацию параметров линейных моделей динамических объектов, имеющих один вход и один выход, функционирующих в условиях внешних воздействий. Исходные данные: временные ряды, представляющие собой зависимость вход / выход, хранящиеся во внешнем файле. Результатом являются интервальные оценки параметров передаточной функции объекта управления. В [7] задача параметрической идентификации решается для модели, описывающей плоскопараллельное движение судна (с учетом дрейфа). Также для идентификации активно используется подход, связанный с применением рекуррентных нейронных сетей, позволяющий восстанавливать нелинейные зависимости типа «вход-выход», что является актуальным для описания динамики нелинейных объектов [8]. По результатам исследований опубликовано программное обеспечение³ предназначенное для нейросетевой идентификации параметров линейных моделей одномерных динамических объектов. Отличительная особенность разработанного программного обеспечения состоит в том, что входной сигнал представляет собой комбинацию воздействий разной формы, позволяющих формировать расширенную обучающую выборку.

В [10], [11] авторами разработан метод адаптивной идентификации параметров модели морского судна, в основе которого находится алгоритм скоростного градиента. Метод заключается в составлении функционала, минимизирующего разность выхода математической модели объекта и выхода исследуемого объекта (морского судна), а также определение производной по времени искомого функционала, вычисленного в силу уравнений системы.

Используемые адаптивные системы строятся по схеме с эталонной моделью (ЭМ) или используют настраиваемую модель (НМ) в контуре управления. Недостатками данных систем является то, что для обеспечения их эффективного функционирования необходимо наличие достаточно точной (или приближительной) математической модели управляемого объекта, что требует дополнительного времени на подстройку параметров модели. Также необходимо отметить, что существует класс авторулевых устройств, предназначенных для управления МС, построенных по принципу адаптивной системы с НМ.

Одним из новых классов систем автоматического управления являются системы с интервальными моделями. Использование таких моделей в системах управления обусловлено предопределенной нестационарностью параметров приведенных математических моделей на практике. Практический смысл параметров моделей связан с физическими параметрами судов: массой, моментами инерции, коэффициентами вязкого сопротивления и др. Значения этих параметров варьируются в широких пределах и зависят от загрузки судна, скорости его движения и других факторов. Использование интервальных объектов в системах управления наделяет систему управления качествами робастности, что является актуальным при проектировании авторулевых устройств [11].

В настоящей работе рассматривается практическая реализация подхода к параметрической идентификации, основанного на использовании известных алгоритмов оценки параметров и позволяющего повысить вычислительную эффективность ранее предложенных алгоритмов.

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015663311 Российская Федерация. Программа для интервальной оценки параметров линейных моделей динамических объектов / Д. А. Оськин, А. А. Дыда; заяв. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ). № 2015619976; заявл. 21.10.2015; опубл. 15.12.2015. EDN VVMQVF.

³ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663246 Российская Федерация. Программа для нейросетевой идентификации моделей динамических объектов на базе расширенной обучающей выборки / Д. А. Оськин, А. А. Дыда; заяв. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ). № 2015660067; заявл. 21.10.2015; опубл. 14.12.2015. EDN LMQNYM.

Методы и материалы (Methods and Materials)

С помощью модели Номото 2-го порядка описывается зависимость изменения значения скорости рыскания ω судна при продольном движении в зависимости от углового положения пера руля δ [1], [6], [9], [10].

Модель Номото 2-го порядка может быть представлена в виде передаточной функции:

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{\delta(s)} = \frac{k(T_0s + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = \frac{k(T_0s + 1)}{T_{11}s^2 + T_{12}s + 1} \quad (1)$$

или

$$T_1T_2\ddot{\omega} + (T_1 + T_2)\dot{\omega} + \omega = k(\delta + T_0\dot{\delta}). \quad (2)$$

Понижение порядка модели (1) или (2) и приведение ее к модели Номото 1-го порядка возможно с введением допущения $T \approx T_1 + T_2 - T_0$:

$$W(s) = \frac{\omega_y(s)}{\delta(s)} = \frac{k}{Ts + 1} \quad (3)$$

или

$$T_c \dot{\omega}_y + \omega_y = k\delta. \quad (4)$$

В моделях (1)–(4) приняты следующие обозначения: параметр k — коэффициент поворотливости; T , T_0 , T_1 , T_2 — постоянные времена; $T_{11} = T_1T_2$; $T_{12} = T_1 + T_2$.

Аналитическая оценка параметров может быть выполнена на основе результатов экспериментальных данных, полученных при исследовании физической модели в опытовом бассейне или путем проведения натурных испытаний с помощью маневров «зигзаг» и «циркуляция».

Одним из основных документов, содержащих информацию о маневренных характеристиках судна, в соответствии с Резолюцией ИМО А.601(15) «Требования к отображению маневренной информации на судах», является таблица маневренных характеристик или элементов, которая должна содержать основные особенности и подробную информацию о маневренных характеристиках судна. Таблица маневренных характеристик судна содержит данные, которые могут быть использованы для оценки (идентификации) параметров управляемости судна: коэффициенты поворотливости и постоянные времена. На рис. 1 приведен фрагмент таблицы маневренных характеристик, согласно рекомендации Резолюции ИМО А.601(15), содержащий сведения о циркуляции судна в балласте / грузу при совершении разворота лево / право с положением руля «на борт» (35°) и «на полборта» (15°).

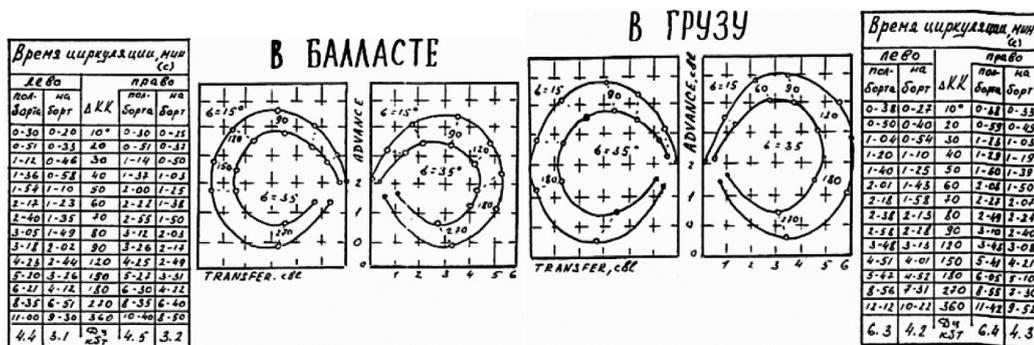


Рис. 1. Элементы таблицы маневренных характеристик, составленной на основе экспериментальных данных

На рис. 2 приведены характеристики циркуляции, применяемые для ее количественной оценки:

- диаметр установившейся циркуляции по ЦТ судна $D_{ц}$;
- тактический диаметр циркуляции D_T (расстояние между ДП судна на прямом курсе и после поворота его на 180°);
- выдвиг судна по линии первоначального курса L_1 и смещение по нормали к нему L_2 ;
- угол дрейфа β судна на циркуляции (угол между ДП судна и вектором скорости V на циркуляции).

Информация, приведенная в таблице маневренных характеристик, содержит промежутки времени:

- на каждый шаг изменения курса $\Delta KK = 10^\circ$ — в диапазоне изменения 0° – 90° (между позициями I–II);
- на каждые $\Delta KK = 30^\circ$ — в диапазоне 90° – 180° (между позициями II–III);
- на каждые $\Delta KK = 90^\circ$ — в диапазоне 180° – 360° .

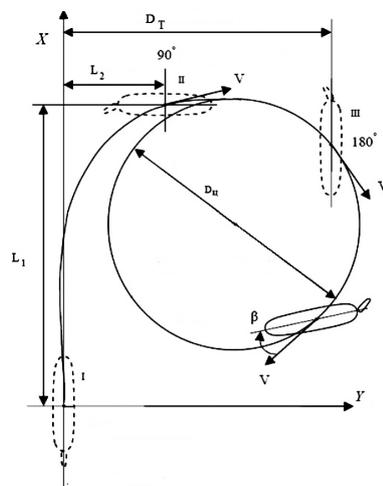


Рис. 2. Элементы поворотливости

Таким образом, для каждого режима и нагрузки можно определить параметры передаточной функции и по серии значений перейти к интервальной модели судна.

Результаты (Results)

Для реализации алгоритма параметрической идентификации разработано программное обеспечение в среде Matlab⁴. Программа позволяет выполнять расчет параметров (идентификацию) линейных моделей морских судов (моделей Номото 1-го и 2-го порядка) по интерполированным данным маневренных буклетов, представленным в виде временных характеристик сведений о циркуляции судна на каждый борт при полной и половинной перекладке руля. При работе с программой необходимо выбрать метод интерполяции исходных данных и запустить расчет.

При расчете используются следующие методы:

1. *Линейная интерполяция* ('linear'). Этот метод предполагает приближение значений функции между двумя ближайшими известными значениями с использованием линейной функции. Таким образом, для заданной точки интерполяции вычисляется значение, основанное на линейном соединении двух ближайших дискретных данных.

2. *Интерполяция по соседним точкам*. Данный подход предполагает присвоение значения функции в интерполируемой точке на основе значений, полученных в ближайших точках данных. В зависимости от выбранного алгоритма это может быть:

- 'nearest' — наименьшая по расстоянию точка;

⁴ Документация MATLAB на русском языке [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.exponenta.ru/documentation-center.html> (дата обращения: 08.10.2024).

- 'next' — следующая по порядку точка;
- 'previous' — предыдущая точка.

3. *Кубическая интерполяция.* В данном случае выделяются два метода:

- 'pchip' (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) — метод, обеспечивающий сохранение формы и монотонности исходных данных с использованием кусочных кубических функций;
- 'v5cubic' ('cubic') — метод, основанный на использовании кубических полиномов, предлагающий гладкое и непрерывное приближение значений, позволяя более точно интерполировать данные с учетом их особенностей.

4. *Сплайн-интерполяция ('spline').* Этот метод использует кубические сплайны для создания плавных кривых между дискретными точками. Сплайны позволяют соединить соседние точки с помощью непрерывных функций, обеспечивая высокую степень гладкости интерполяционной функции и ее производных.

В зависимости от выбранного метода формируется текстовый отчет в виде набора передаточных функций для каждой характеристики о циркуляции судна⁵. Форма главного окна представлена на рис. 3. Пользователь выбирает метод интерполяции и файл с исходными данными.

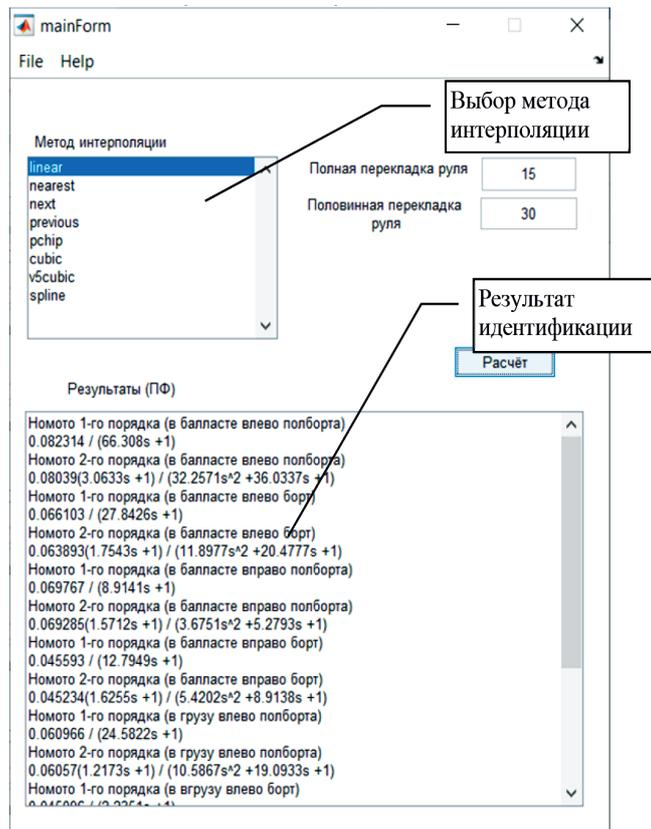


Рис. 3. Форма главного окна программы расчета параметров

Файл с исходными данными задается пользователем и представляет собой обычный текстовый файл с расширением *.txt, *.dat с расположенными построчно данными. Заголовок строки и данные разделены табуляторами. В первой строке размещены значения угла разворота в градусах (заголовок строки обозначен β), в остальных — время в секундах. Названия строк соответствуют элементу циркуляции (табл. 1).

⁵ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022665815 Российская Федерация. Программа для идентификации параметров модели судна по маневренным характеристикам / Д. А. Оськин, Е. Б. Осокина, В. В. Бочарова; заяв. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского». — № 2022665815; заявл. 29.08.2022; опубл. 06.09.2022. EDN SFJUPT.

Таблица 1

Названия строк файла с исходными данными, заданными в фрагменте файла данных

Заголовок строки	Вид движения	Заголовок строки	Вид движения
blhb	В балласте, лево, полборта	llhb	В грузу, лево, полборта
blfb	В балласте, лево, на борт	llfb	В грузу, лево, на борт
brhb	В балласте, право, полборта	lrhb	В грузу, право, полборта
brfb	В балласте, право, на борт	lrfb	В грузу, право, на борт

Пример фрагмента файла с исходными данными дан на рис. 4.

```

fi → 0 → 10 → 20 → 30 → 40 → 50 → 60 → 70 → 80 → 90 → 120 → 150¶
blhb→0 → 15 → 26 → 35 → 43 → 52 → 62 → 70 → 78 → 86 → 112 → 137¶
blfb→0 → 13 → 20 → 27 → 34 → 39 → 45 → 51 → 58 → 65 → 82 → 99¶
brhb→0 → 17 → 27 → 36 → 46 → 56 → 65 → 75 → 82 → 93 → 123 → 153¶
brfb→0 → 15 → 23 → 29 → 35 → 42 → 49 → 56 → 61 → 68 → 90 → 111¶
llhb→0 → 20 → 34 → 45 → 56 → 67 → 80 → 91 → 102 → 112 → 146 → 178¶
llfb→0 → 16 → 24 → 32 → 41 → 47 → 54 → 67 → 69 → 77 → 98 → 118¶
lrhb→0 → 22 → 35 → 47 → 60 → 73 → 85 → 98 → 108 → 122 → 161 → 200¶
lrfb→0 → 18 → 27 → 34 → 42 → 50 → 58 → 66 → 73 → 81 → 107 → 132¶
    
```

Рис. 4. Пример файла с исходными данными (формат *.txt, *.dat)

На рис. 5 приведена блок-схема программы. В процессе выполнения программы расчета пользователь задается типом интерполяции и считывает данные из файла. В зависимости от типа интерполяции вычисления выполняются по разным ветвям: в случае выбора линейной, кубической, сплайн-интерполяции сначала выполняется интерполяция зависимости курса судна от времени циркуляции, затем по интерполированной характеристике вычисляются скорости рыскания судна. В случае выбора типа интерполяции по соседним точкам выполняется вычисление и интерполяция скорости рыскания.

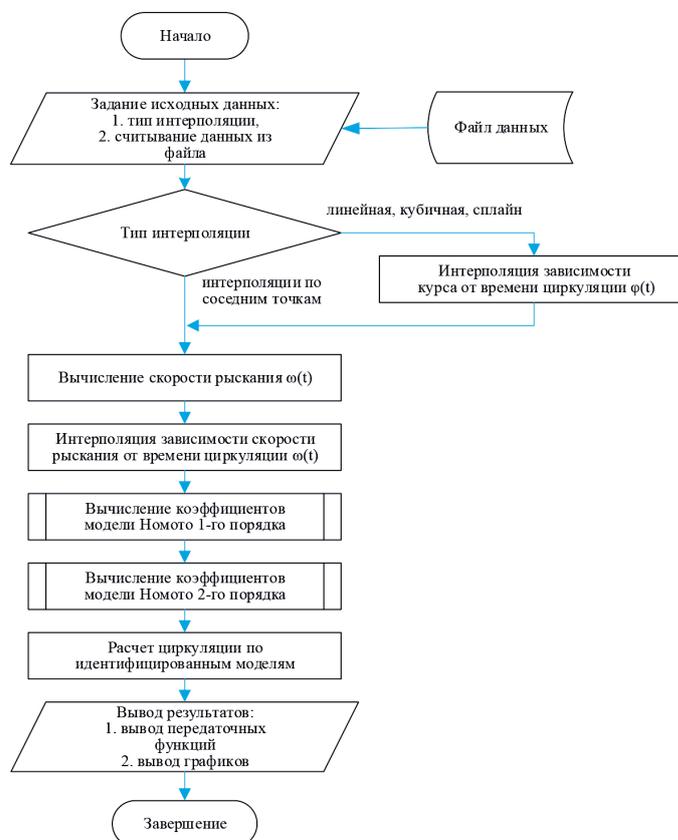


Рис. 5. Алгоритм программы

По интерполированной зависимости $\omega(t)$ вычисляются коэффициенты моделей Номото 1-го и 2-го порядка [3]–[6]. Для оценки качества идентификационных моделей выполняется

расчет модельной траектории циркуляции и ее графическое отображение. При проверке выполняется сравнение исходных, приведенных в буклете, и расчетных характеристик: $L_1, L_2, D_T, D_{\text{ц}}$.

Обсуждение (Discussion)

Программа отображает графики переходных процессов для исходных и расчетных данных для выбранного вида интерполяции, а также отображает параметры передаточных функций моделей. В табл. 2 приведены результаты идентификации параметров передаточных функций моделей Номото 1-го и 2-го порядка. На рис. 6 приведены графики переходных процессов и процессов циркуляции в моделях Номото 1-го и 2-го порядка идентифицированных для следующих случаев: судно в балласте, лево, полборта (см. рис. 6, а), судно в грузу, право, на борт (см. рис. 6, б).

Таблица 2

Передаточные функции моделей Номото 1-го и 2-го порядка

Вид движения	Метод 'nearest' — интерполяция по ближайшему соседу	Метод 'next' — следующая соседняя интерполяция
В балласте, лево полборта	$0,086486 / (21,0907s + 1),$ $(-0,0620s + 0,0865) / (5,6866s^2 + 20,378s + 1)$	$0,084534 / (13,9239s + 1)$ $(-0,0624s + 0,084966) / (8,0937s^2 + 30,69s + 1)$
В балласте, лево на борт	$0,052105 / (8,3203s + 1)$ $(-0,040181s + 0,0521) / (1,92s^2 + 7,541s + 1)$	$0,051181 / (5,4139s + 1)$ $(-0,039495s + 0,050739) / (2,5s^2 + 10,34s + 1)$
В балласте, право полборта	$0,085413 / (16,1061s + 1)$ $(-0,064614s + 0,0854) / (3,7588s^2 + 15,35s + 1)$	$0,084425 / (10,5231s + 1)$ $(-0,066165s + 0,0846) / (5,63s^2 + 25,67s + 1)$
В балласте, право на борт	$0,053334 / (7,7695s + 1)$ $(-0,039309s + 0,0534) / (2,1674s^2 + 7,018s + 1)$	$0,051603 / (5,6539s + 1)$ $(-0,037819s + 0,050856) / (2,5667s^2 + 8,70s + 1)$
В грузу, лево полборта	$0,070674 / (31,8077s + 1)$ $(-0,054345s + 0,0702) / (7,4066s^2 + 30,321s + 1)$	$0,077462 / (43,2606s + 1)$ $(-0,061346s + 0,07646) / (12,4s^2 + 60,068s + 1)$
В грузу, лево на борт	$0,062815 / (32,384s + 1)$ $(-0,049278s + 0,0626) / (7,11s^2 + 31,398s + 1)$	$0,065258 / (35,8258s + 1)$ $(-0,049968s + 0,0622) / (10,344s^2 + 50,4146s + 1)$
В грузу, право полборта	$0,062055 / (18,4881s + 1)$ $(-0,047851s + 0,06203) / (4,412s^2 + 17,702s + 1)$	$0,061922 / (15,1711s + 1)$ $(-0,047497s + 0,0608) / (5,4172s^2 + 22,988s + 1)$
В грузу право на борт	$0,051568 / (11,6061s + 1)$ $(-0,03817s + 0,0515) / (3,2146s^2 + 10,81s + 1)$	$0,051618 / (9,6996s + 1)$ $(-0,037732s + 0,0501) / (3,9253s^2 + 14,121s + 1)$

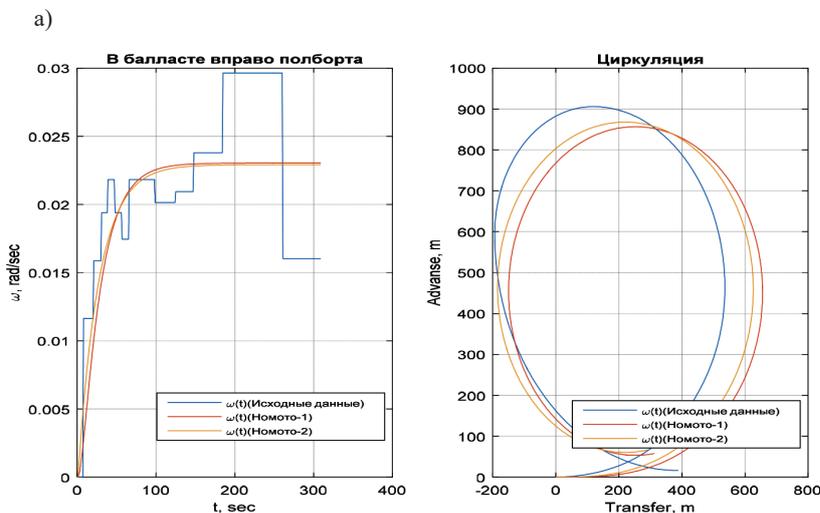


Рис. 6 (начало). Результаты идентификации:
а — судно в балласте, лево, полборта

б)

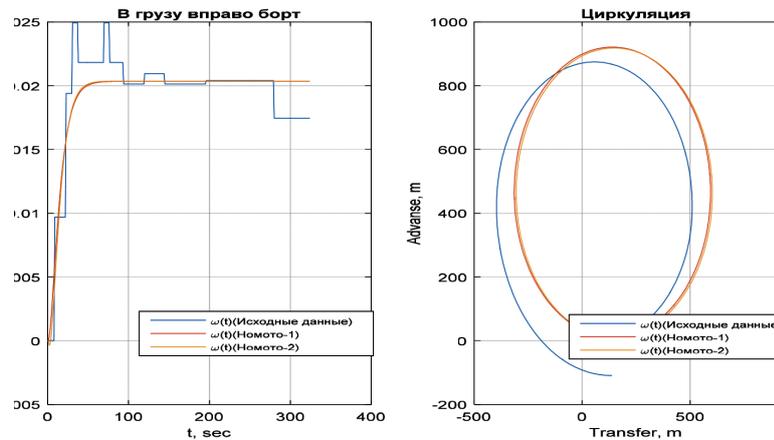


Рис. 6 (окончание). Результаты идентификации:
б — судно в грузу, право, на борт

Как видно из полученных результатов, для нескольких рядов исходных данных были получены коэффициенты моделей со следующими интервалами изменения значений (табл. 3).

Таблица 3

Параметры интервальных передаточных функций

Вид модели	Для моделей Номото 1-го порядка	Для моделей Номото 2-го порядка
Общая модель	$W_1(s) = \frac{[0,051568...0,086486]}{[7,769...32,3848]s + 1}$	$W_2(s) = \frac{[0,0515...0,0865]}{[1,92...7,4066]s^2 + [7,018...31,398]s + 1}$
Модель в балласте на борт	$W_1(s) = \frac{[0,052105...0,053334]}{[7,7695...8,3203]s + 1}$	$W_2(s) = \frac{[0,0521...0,0534]}{[1,92...2,1674]s^2 + [7,018...7,541]s + 1}$
Модель в балласте полборта	$W_1(s) = \frac{[0,085413...0,086486]}{[16,1061...21,0907]s + 1}$	$W_2(s) = \frac{[0,0854...0,0865]}{[3,7588...5,68664]s^2 + [15,35...20,378]s + 1}$
Модель в грузу на борт	$W_1(s) = \frac{[0,051568...0,062815]}{[11,6061...32,384]s + 1}$	$W_2(s) = \frac{[0,0515...0,0626]}{[3,2146...7,11]s^2 + [10,81...31,398]s + 1}$
Модель в грузу полборта	$W_1(s) = \frac{[0,062055...0,070674]}{[18,4881...31,8077]s + 1}$	$W_2(s) = \frac{[0,06203...0,0702]}{[4,412...7,4066]s^2 + [17,702...30,321]s + 1}$

Полученные модели сгруппированы по типу загрузки и поворотливости. Параметры моделей принимают значения, распределенные в ограниченных интервалах, откуда следует, что модель морского судна может быть представлена как модель с интервальными параметрами. Можно сделать вывод о том, что при идентификации необходимо рассматривать модель с интервальными матрицами, вариации значений которых обусловлены нелинейностями идентифицируемой системы и влиянием внешних случайных возмущений.

Заключение (Conclusion)

Задача параметрической идентификации, связанная с получением математических моделей, является актуальной, она позволяет развивать новые направления теории управления, в частности разработку систем управления с интервальными моделями. В процессе исследования рассмотрен практический подход, связанный с разработкой программного обеспечения, предназначенного для получения линейных моделей морских судов. Разработан алгоритм получения математической

модели на основе сведений о циркуляции судна, приведенных в таблице маневренных характеристик. Оценка параметров модели выполняется по интерполированным данным методом наименьших квадратов.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании авторулевых устройств, обладающих новыми качествами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна: учебник. — 3-е изд, перераб. и доп. / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. — М.: ТрансЛит, 2007. — 376 с.
2. Pomorski J. Trajectory tracking control system for ship / J. Pomorski, L. Morawski, A. Rak // IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems — CAMS'2004. Ancona, Italy, July 7–9, 2004. — IFAC Proceedings Volumes, 2004. — Pp. 251–255 DOI: 10.1016/S1474-6670(17)31740-8.
3. Семенов А. Д. Идентификация объектов управления: учеб. пособие. / А. Д. Семенов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. — 211 с.
4. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов / А. М. Дейч. — М.: Энергия, 1979. — 240 с.
5. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. — М.: Наука, 1991. — 432 с.
6. Оськин Д. А. Идентификация параметров математической модели морского судна / Д. А. Оськин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2011. — № 2. — С. 141–145. — EDN OWNFEV.
7. Оськин Д. А. Идентификация параметров модели морского судна с учетом дрейфа / Д. А. Оськин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2012. — № 1. — С. 250–253. — EDN PBMVNH.
8. Oskin D. A. Neural network identification of marine ship dynamics / D. A. Oskin, A. A. Dyda, V. E. Markin // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), Osaka, 17–20 september 2013. — Osaka, 2013. — Pp. 191–196. DOI 10.3182/20130918-4-JP-3022.00018. — EDN SLNQBF.
9. Осокина Е. Б. Адаптивная идентификация параметров судна на основе простых моделей / Е. Б. Осокина, Д. А. Оськин, А. А. Дыда // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2(30). — С. 24–31. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-24-31. — EDN TPSWYL.
10. Дыда А. А. Адаптивная идентификация параметров моделей судов на основе алгоритма скоростного градиента / А. А. Дыда, П. А. Дыда, Е. Б. Осокина, Д. А. Оськин // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3–1(33). — С. 263–268. — EDN YLOGMH.
11. Дыда А. А. Робастный подход к построению систем управления курсом судна / А. А. Дыда, П. А. Дыда, Е. Б. Осокина, Д. А. Оськин // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — № 3–2(37). — С. 141–145. — EDN YPPLWZ.

REFERENCES

1. Vagushchenko, L. L. and N. N. Tsymbal *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna: Uchebnik*. — 3-e izd, pererab. i dop. M: TransLit, 2007.
2. Pomirski, Janusz, Leszek Morawski, and Andrzej Rak. “Trajectory tracking control system for ship.” *IFAC Proceedings Volumes* 37.10 (2004): 251–255.
3. Semenov A. D., Artamonov D. V., Bryukhachev A. V. *Identifikatsiya ob’ektov upravleniya: ucheb. posobie*. — Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2003. — 211 s.
4. Dejch, A. M. *Metody identifikatsii dinamicheskikh obektov*. M: Energiya, 1979.
5. Lyung, L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya polzovatelya*. M: Nauka, 1991.
6. Oskin, D. A. “Identifikatsiya parametrov matematicheskoy modeli morskogo sudna” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 2 (2011): 141–145.
7. Oskin, D. A. “Identifikatsiya parametrov modeli morskogo sudna s uchetoм drejfa” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 1 (2012): 250–253.
8. Oskin, D. A., A. A. Dyda and V. E. Markin “Neural network identification of marine ship dynamics” *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), Osaka, 17–20 sentyabrya 2013 goda*. — Osaka, 2013: Pp. 191–196. DOI 10.3182/20130918-4-JP-3022.00018.

9. Osokina, E. B., D. A. Oskin and A. A. Dyda “Adaptivnaya identifikatsiya parametrov sudna na osnove prostykh modelej” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 24–31. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-24-31.

10. Dyda, A. A., P. A. Dyda, E. B. Osokina and D. A. Oskin “Adaptivnaya identifikatsiya parametrov modelej sudov na osnove algoritma skorostnogo gradienta” *Morskie intellektualnye tekhnologii* 3–1(33) (2016): 263–268.

11. Dyda, A. A., P. A. Dyda, E. B. Osokina and D. A. Oskin “Robastnyj podkhod k postroeniyu sistem upravleniya kursom sudna” *Morskie intellektualnye tekhnologii* 3–2(37) (2017): 141–145.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Оськин Дмитрий Александрович —
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электронной
и микропроцессорной техники,
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского,
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: osykinda@msun.ru

Осокина Елена Борисовна —
кандидат технических наук,
доцент кафедры электронной
и микропроцессорной техники,
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского,
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а,
e-mail: olena1961@yandex.ru

Бочарова Виктория Валерьевна —
кандидат технических наук,
доцент кафедры радиоэлектроники и радиосвязи,
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского,
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а,
e-mail: my_viktor@mail.ru
доцент кафедры информационных технологий
и систем,
Владивостокский государственный университет,
690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Oskin —
Ph.D. (Eng),
assistant professor, head of department
of electronic and microprocessor engineering
Maritime State University named after admiral
G. I. Nevelskoy
Verkhneportovaya str. 50a, Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: osykinda@msun.ru

Elena B. Osokina —
Ph.D. (Eng),
assistant professor of department
of electronic and microprocessor engineering,
Maritime State University named after admiral
G. I. Nevelskoy,
Verkhneportovaya str. 50a,
Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: olena1961@yandex.ru

Viktoriya V. Bocharova —
Ph.D. (Eng),
assistant professor of department of radioelectronics
and radiocommunication, Maritime State
University named after admiral G. I. Nevelskoy,
Verkhneportovaya str. 50a,
Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: my_viktor@mail.ru
assistant professor of the department of information
technology and systems,
Vladivostok State University,
41 Gogolya st., Vladivostok 690014 Russia

Статья поступила в редакцию 06 ноября 2024 г.

Received: Nov. 06, 2024.