

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-266-277

## MODELING AN ERGATIC SYSTEM FOR JOINT CONTROL OF SHIP MOTION

**V. O. Tyrva**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The procedure for constructing a model of an ergatic ship motion control system is described. A ship is an object of joint control by the skipper and the control machine in the “skipper-ship” system. Anthropomorphic control is considered in the form of a sequence of descriptions of discrete control signals. The sequence is based on a set of incomplete representations of elementary motions in the state space of the “skipper-ship” system. The relationship between the parameters of the ship movement and the state of the human-machine interface controls in the wheel-house in order to move on different parts of the trajectory in the state space is taken into account. The possibility of applying the model at all three levels of motion control: targeting, planning, and implementation, is shown. Descriptions of incomplete representations of elementary movements of a ship with two propellers and rudder are given. The description is given in the nine-dimensional state space using normal systems of ordinary differential equations. The set includes 27 incomplete representations of elementary movements. It defines the maximum number of 702 pairwise different signals for discrete state control of the “skipper-ship” system. Techniques and examples of reducing the number of signals for discrete state control of the “skipper-ship” system are shown. They are combined into use cases-templates with reference to the goals of traffic management based on the experience of navigation. Due to templates, in the implementation of anthropomorphic control, it is easier to solve the problems of its design at the levels of target designation, planning and performance. The advantages of the model are noted. They are expressed in the fact that at predicting the vessel movement relative to any point of the trajectory in the state space of the system, it is necessary and sufficient to have the values of the phase coordinates only for this point as the initial conditions for integrating the differential equations of the model and not refer to the movement “in the past”. The model provides an opportunity to analyze the behavior of the vessel under the influence of internal and external uncertainties when performing joint control. The model allows you to perform optimization by solving a finite-dimensional mathematical programming problem.*

*Keywords: modeling, ship, ergatic system, elementary motion, motion control.*

**For citation:**

Tyrva, Vladimir O. “Modeling an ergatic system for joint control of ship motion.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 266–277. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-266-277.

**УДК 62-50**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СОВМЕСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА

**В. О. Тырва**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Описана процедура построения модели эргатической системы управления движением судна, рассматриваемого как объект совместных действий судоводителя и управляющего автомата в системе «судоводитель – судно». В отличие от традиционного представления процесса управления функцией времени рассматривается антропоморфное управление в виде последовательности описаний сигналов дискрет-*

ного управления, выполненного на основе множества неполных представлений элементарных движений в пространстве состояний системы. Тем самым учитывается взаимосвязь параметров движения судна и состояния органов управления человеко-машинного интерфейса в ходовой рубке с целью движения на разных участках траектории в пространстве состояний системы. Показана возможность применения модели на всех трех уровнях управления движением: целеуказания, планирования и исполнения. Приведены описания двадцати семи элементов множества неполных представлений элементарных движений судна с двумя двигателями и рулем в девятимерном пространстве состояний с помощью нормальных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. На данном множестве определено максимальное количество из семисот двух попарно различных сигналов дискретного управления состоянием системы «судоводитель – судно». Показаны приемы и примеры сокращения количества сигналов дискретного управления состоянием системы «судоводитель – судно» и объединения их в прецеденты — шаблоны с привязкой к целям управления движением на основе опыта судовождения. Благодаря шаблонам в реализациях антропоморфного управления упрощено решение задач его конструирования на уровнях целеуказания, планирования и исполнения. Указаны достоинства модели, выраженные в том, что при прогнозировании движения судна относительно любой точки траектории в пространстве состояний системы необходимо и достаточно располагать значениями фазовых координат только для этой точки в качестве начальных условий интегрирования дифференциальных уравнений модели, не рассматривая описание движения «в прошлом». Модель предоставляет возможность анализировать поведение судна в условиях влияния внутренних и внешних неопределенностей при совместном управлении и выполнять его оптимизацию путем решения конечномерной задачи математического программирования.

*Ключевые слова:* моделирование, судно, эргатическая система, элементарное движение, управление движением.

**Для цитирования:**

Тырва В. О. Моделирование эргатической системы совместного управления движением судна / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 266–277. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-266-277.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время управление как сложный целенаправленный процесс в эргатических системах «человек – машина» (СЧМ) рассматривается на трех уровнях (сверху вниз): целеуказание, планирование, исполнение [1]. Эти уровни в различных приложениях теории управления имеют также иные названия. Применительно к автоматизированному управлению движением судов принятие управленческих решений рассматривается как периодический процесс, каждый цикл которого включает следующие этапы [2]:

- 1) получение информации о состоянии СЧМ и внешней среды;
- 2) формирование цели о некотором другом состоянии, в которое желательно перевести систему;
- 3) определение допустимых путей достижения системой поставленной цели;
- 4) выбор из множества допустимых решений наилучшего;
- 5) реализация принятого решения.

Первые два этапа называют *подготовкой решения по управлению*, что соответствует целеуказанию, третий и четвертый — относятся к *планированию управления*, пятый этап — к *исполнению управления*.

Анализ информации об управлении движением судов показывает, что процесс принятия решения в задачах управления судном имеет следующие особенности [3]:

- большая размерность решаемых задач и большие объемы обрабатываемых данных;
- значительная повторяемость принимаемых решений в сходных условиях (тесная взаимосвязь рассматриваемых ситуаций управления с районом плавания и типом судна);
- возможность принятия решения по прецедентам, т. е. типовым ситуациям организации движения судов;
- необходимость подготовки нескольких вариантов (версий) принимаемых решений в определенных ситуациях;
- необходимость принятия решения в условиях неопределенности (отсутствие достоверной информации или полное отсутствие требуемой информации).

При выработке решений в различных ситуациях и условиях плавания руководствуются не только действующими нормативными документами и инструкциями (например, МППСС-72), но и личным опытом судовождения, а также обобщенным опытом, изложенным в виде практических рекомендаций. Известно, что 75 % навигационных аварийных случаев происходит по причине *человеческого фактора* и связано с уровнем подготовки судоводителя, ответственного за обеспечение безопасности судовождения, наличия у него необходимого практического опыта, а также навыков судовождения и управления судном [3]. Поскольку повышение уровня компетенции судоводителя на практике «методом проб и ошибок» недопустимо, актуальными являются разработка и создание систем поддержки принятия решений (СППР) на основе использования математических моделей управляемого движения.

В процессе моделирования, являющегося необходимым этапом автоматизации управления, пространственное движение судна в общем случае описывается системой, состоящей из двенадцати обыкновенных дифференциальных уравнений для производных линейных координат центра масс судна, углов Эйлера и составляющих линейной и угловой скорости [4]. В целях упрощения модели используют описание управляемых движений для отдельных режимов и условий. Характерным является то, что при построении математических моделей не учитывается влияние действия органов управления человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) на процесс управления движением судна с центрального поста — автоматизированного рабочего места судоводителя в ходовой рубке судна.

Установлено, что введение в математические модели движения судна информации о действии органов управления ЧМИ позволяет упростить понимание судоводителем предлагаемых СППР вариантов представления целей на уровне целеуказания, а также результатов планирования управления и соответствующего ему представления управляемого движения судна [5]. При этом расчет оптимального управления выражается в решении не вариационной задачи, как в классической теории оптимального управления, а более простой задачи параметрической оптимизации при дифференциальных связях параметров модели. Полученное таким образом управление называется *антропоморфным* [6]. Автоматизацию такого управления движением судна, как переход от ручного управления к автоматическому и, согласно современным представлениям, — к управлению с искусственным интеллектом, можно представить с позиций придания управляющему автомату (УА) эргатической системы *судоводитель – судно* (ССС) способностей к рассуждениям, планированию и принятию решений [7]. Основная задача создания такой автоматизированной системы состоит в организации взаимодействия и согласовании возможностей технической и биологической частей системы с тем, чтобы обеспечить наибольшую эффективность системы в целом [1]. Подобное взаимодействие положено в основу математической модели СССР, рассмотренной далее.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Для описания плоского движения судна при антропоморфном управлении в предлагаемом исследовании используется *метод пространства состояний*, с помощью которого управляемое движение представляется в виде непрерывной траектории, состоящей из участков, каждый из которых отображает в пространстве состояний решение нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений определенного вида.

Перейдем от модели управляемого объекта общего вида, приведенной в работе [5], к описанию плоского движения судна при антропоморфном управлении. Для этого применительно к СССР необходимо конкретизировать множество

$$\mathbf{Z} = \{ \dot{X}(t) = F^r (X(t)), r = 1, 2, \dots, R \}, \quad (1)$$

состоящее из  $R$  неполных представлений элементарных движений:

$$\dot{X}(t) = F^r (X(t)), \quad (2)$$

которые составляют базу знаний для построения последовательности

$$U(t_1, t_f) = \{ U_r^s(t_1), U_s^j(t_2), U_j^i(t_3), \dots, U_k^m(t_f) \} \quad (3)$$

сигналов дискретного управления (СДУ):

$$U_r^k(t_s) = \{t_s, F^r(X(t_s)), F^k(X(t_s))\}. \quad (4)$$

В выражениях (1) и (2) использованы следующие обозначения:

$X(t)$  — вектор (матрица-столбец) фазовых координат  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , значения которых зависят от времени  $t$ ;

$F^r(X(t))$  — вектор-функция правых частей нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, записанной в векторной форме (2), где точкой над буквой  $X$  обозначена операция дифференцирования по времени  $t$ , применяемая к фазовым координатам  $x_1, x_2, \dots, x_N$ .

Запись представления (4) СДУ  $U_r^k(t_s)$  означает, что в момент времени  $t_s$  неполное представление  $\dot{X}(t) = F^r(X(t))$  элементарного движения из множества (1) заменяется на другое неполное представление  $\dot{X}(t) = F^k(X(t))$  из того же множества при  $k \neq r$  и  $(r, k) \in \{1, 2, \dots, R\}$ .

Исходя из представления управляемого движения судна в неподвижной  $Ox_1x_2x_3$  и связанной  $Gx_4x_5x_6$  системах координат [8] при внешних воздействиях течения (скорости  $v_T$ , направления  $y_T$ ) и ветра (скорости  $v_B$ , направления  $y_B$ ) — рис. 1, рассматриваем судно как элемент ССС с фазовыми координатами  $x_1, x_2, \dots, x_6$  и управляющими воздействиями:  $u_1$  (упор винта),  $u_2$  (угол перекаладки руля) — рис. 2.

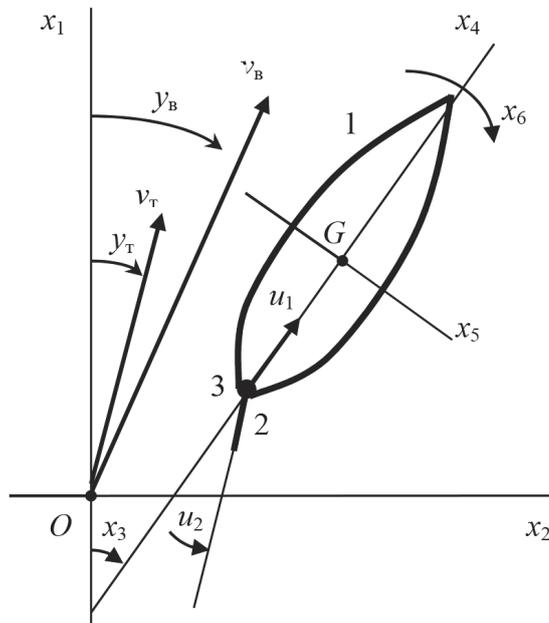


Рис. 1. Параметры управляемого движения судна, ветра и течения в неподвижной и связанной системах координат:  
 1 — корпус судна; 2 — руль судна; 3 — движитель

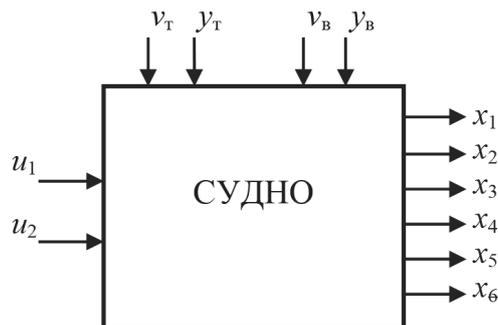


Рис. 2. Представление судна в виде элемента эргатической системы «судоводитель – судно»

Выполним композицию модели движения судна [8] и модели МП [5] действий судоводителя, проявляющихся в перемещениях органов управления аппаратов ЧМИ ходовой рубки. Полагаем, что реализуется совместное управление [5] упором движителей и перекладкой руля судоводителем и управляющим автоматом. При этом УА реализует антропоморфное управление, подобное управлению, исполняемому судоводителем, изменяющим положения органов управления ЧМИ.

Аппараты совместного управления (АпСУ) движением судна представим с помощью изобразительной модели (рис. 3), которая раскрывает принцип построения и работы АпСУ с многопозиционным органом управления (ОрУ) — рукояткой 1 и аналоговым датчиком углового перемещения 3. Сигнал  $v$  на выходе датчика 3 однозначно определяется положением  $u = u_a + u_c$  рукоятки 1 ручного управления (положение  $Q$ ). Рукоятка управления 1 с помощью пружин связана с поворотной вилкой 2, отклоняемой от нейтрального положения  $N$  до изменяемого положения  $P$  электромеханическим преобразователем 5 с червячной передачей 4. Угловые скорости перемещений элементов конструкции аппарата:  $\omega_n$  — червяка механической передачи 4,  $\omega_a$  — вилки 2,  $\omega_c$  — рукоятки 1 относительно вилки 2. Угол поворота  $u_a$  задается управляющим автоматом ССС сигналом  $v_a$ . Благодаря червячной передаче 4 связь между электромеханическим преобразователем 5 и вилкой 2 однонаправленная — от преобразователя к вилке. Поэтому управляющие действия судоводителя при перемещении им органа управления не оказывают влияние на работу УА системы *судоводитель – судно* и не изменяют его сигнал  $u_a$ , реализованный в аппарате в виде определенного положения ОрУ.

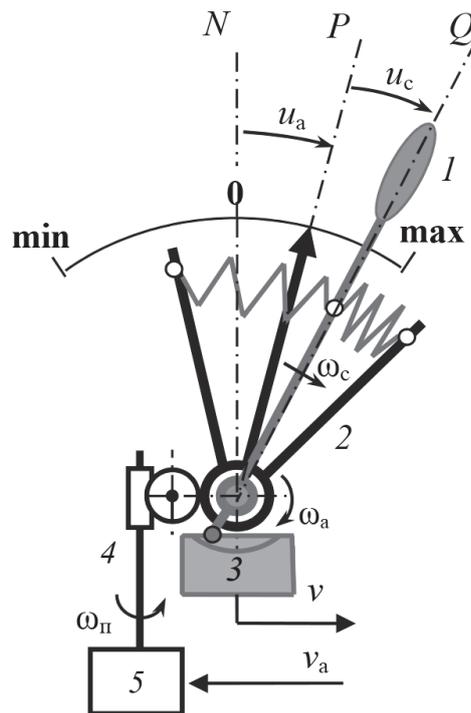


Рис. 3. Изобразительная модель аппарата совместного управления (АпСУ)

1 — рукоятка управления; 2 — вилка;

3 — датчик углового перемещения;

4 — червячная передача;

5 — электромеханический преобразователь

Когда судоводитель держит рукой рукоятку АпСУ, он через нее получает информацию о намерениях УА изменить характер движения судна. При этом судоводитель за счет перемещения рукоят-

ки  $I$  в положение  $Q$  на рис. 3 корректирует управляющие действия автомата (положение  $P$  на рис. 3), если «не соглашается» с намерениями УА. Если судоводитель не создает корректирующие воздействия на ОпУ ( $u_c = 0$ ), соглашаясь с намерениями УА, то управление движением судна осуществляется только автоматом ( $u = u_a$ ). При отключении или отказе УА судоводитель, воздействуя на ОпУ (рукоятку) АпСУ, продолжает управлять судном.

Для технической реализации управления движением судна с помощью движителя и руля, в соответствии с рис. 1, необходимо применить два АпСУ (АпСУ1 и АпСУ2, как показано на рис. 4) с приводными устройствами (ПУ), включающими, например, электромеханический преобразователь и червячную передачу (см. рис. 3).

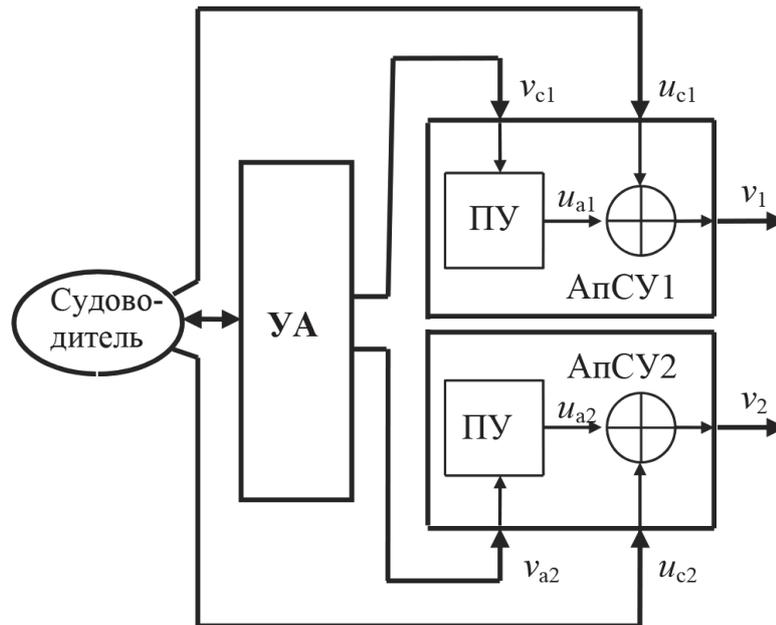


Рис. 4. Схема формирования воздействий  $v_1$  на упор винта и  $v_2$  на руль судна с помощью аппаратов совместного управления АпСУ1 и АпСУ2

Допустим, что система управления движением судна построена таким образом, что обеспечивает пропорциональное преобразование  $v_1$  в упор  $u_1$  и  $v_2$  в угол  $u_2$  перекладки руля, показанных на рис. 1, а действие АпСУ характеризуется моделью МП многопозиционного ОпУ [5]. Усложним задачу построения математической модели, чтобы выделить особенности конструирования антропоморфного управления и расширить области применения модели. Будем рассматривать суда, у которых для создания упора  $u_1$  используются два движителя (два винта), создающие упоры  $u_{11}$  и  $u_{12}$  так, что  $u_1 = u_{11} + u_{12}$ . Тогда множество (1) вместо  $R = 3^2 = 9$  элементов будет иметь  $R = 3^3 = 27$  неполных представлений элементарных движений судна и для формирования совместного управления в ССС необходимо применить не два, как показано на рис. 4, а три АпСУ. Дальнейшее усложнение задачи моделирования проводить не будем, рассматривая, например, ее для варианта «два движителя и два руля» с отдельным управлением, так как процедура построения модели не изменится, но станет неудобной для восприятия человеком (не ЭВМ), поскольку множество (1) будет включать  $R = 3^4 = 81$  элемент.

### Результаты (Results)

Используя трансформированные уравнения динамики судна [8], представим множество (1) неполных представлений элементарных движений судна в виде нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1(t) = x_4(t) \cos x_3(t) - x_5(t) \sin x_3(t) + s_1(t); \\ \dot{x}_2(t) = x_4(t) \sin x_3(t) + x_5(t) \cos x_3(t) + s_2(t); \\ \dot{x}_3(t) = x_6(t); \\ \dot{x}_4(t) = a_{11}x_5(t)x_6(t) + a_{12}x_4^2(t) + (a_{13} + a_{14}x_4(t))(x_7(t) + x_8(t)) + a_{15}|s_4(t)|s_4(t); \\ \dot{x}_5(t) = a_{21}x_4(t)x_6(t) + a_{22}x_4(t)x_5(t) + a_{23}|x_5(t)|x_5(t) + a_{24}x_4^2(t)x_9(t) + a_{25}|s_5(t)|s_5(t); \\ \dot{x}_6(t) = a_{31}x_4(t)x_6(t) + a_{32}x_4(t)x_5(t) + a_{33}x_4^2(t)x_9(t) + a_{34}|s_5(t)|s_5(t); \\ \dot{x}_7(t) = b_1\omega_{11}; \\ \dot{x}_8(t) = b_1\omega_{12}; \\ \dot{x}_9(t) = b_2\omega_2, \end{array} \right. \quad (5)$$

и табл. 1, в которой показана нумерация элементов множества (1) для ССС в количестве двадцати семи.

Таблица 1

**Нумерация множества неполных представлений  
элементарных плоских движений двухвинтового судна**

$\omega_{ij}$		$\omega_{12} = 1$	$\omega_{12} = 0$	$\omega_{12} = -1$
$\omega_{11} = 1$	$\omega_2 = 1$	10	11	14
	$\omega_2 = 0$	1	2	5
	$\omega_2 = -1$	19	20	23
$\omega_{11} = 0$	$\omega_2 = 1$	12	13	17
	$\omega_2 = 0$	3	4	8
	$\omega_2 = -1$	21	22	26
$\omega_{11} = -1$	$\omega_2 = 1$	15	16	18
	$\omega_2 = 0$	6	7	9
	$\omega_2 = -1$	24	25	27

Первые шесть уравнений системы (5) описывают непосредственно движение корпуса судна на плоскости  $Ox_1x_2$  (см. рис. 1), последние три — положения органов управления двумя движителями и рулем. Возмущающие воздействия течения и ветра на судно представлены в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_1(t) = v_T(t) \cos y_T(t); \\ s_2(t) = v_T(t) \sin y_T(t); \\ s_4(t) = v_B(t) \cos(x_3(t) - y_B(t)) - v_T(t) \cos(x_3(t) - y_T(t)) - x_4(t); \\ s_5(t) = -v_B(t) \sin(x_3(t) - y_B(t)) + v_T(t) \sin(x_3(t) - y_T(t)). \end{array} \right. \quad (6)$$

Для вычисления коэффициентов  $a_{ij}$  получены формулы, позволяющие выполнить расчеты с учетом геометрических характеристик судна, осадки, глубины судового хода и других параметров. В качестве примера в табл. 2 приведены расчетные значения коэффициентов модели плоского движения двухвинтового судна типа «Волго-Дон». Значения коэффициентов  $b_1$  и  $b_2$  конкретизируют по экспериментальным данным и рекомендациям инженерной психологии для аппаратов ЧМИ в ходовой рубке. В начальном приближении  $b_1 = b_2 = 0,12 \text{ с}^{-1}$ .

Таблица 2

**Расчетные значения коэффициентов дифференциальных уравнений управляемого движения судна типа «Волго-Дон»**

Коэффициент	Размерность	Множитель	Осадка судна					
			$T = 3,5$ м		$T = 2,5$ м		$T = 1,5$ м	
			Глубина хода					
			$H = 10$ м	$H = 20$ м	$H = 10$ м	$H = 20$ м	$H = 10$ м	$H = 20$ м
$a_{11}$	–	–	1,09	1,09	1,17	1,17	1,34	1,34
$a_{12}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-3}$	–2,39	–2,22	–1,75	–1,55	–1,03	–0,88
$a_{13}$	$\text{мс}^{-2}$	$10^{-1}$	2,18	2,18	0,93	0,93	0,40	0,40
$a_{14}$	$\text{с}^{-1}$	$10^{-2}$	–1,79	–1,79	–0,46	–0,46	–0,18	–0,18
$a_{15}$	$\text{с}^{-1}$	$10^{-7}$	6,60	6,62	2,84	2,84	1,23	1,23
$a_{21}$	–	$10^{-2}$	–4,14	–3,95	–47,04	–46,74	–58,18	–57,80
$a_{22}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-3}$	18,90		8,13		3,24	
$a_{23}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-2}$	4,86		3,24		1,37	
$a_{24}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-3}$	–10,20		–4,11		–1,55	
$a_{25}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-7}$	40,80		13,20		3,08	
$a_{31}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-2}$	–12,70		–7,29		–3,38	
$a_{32}$	$\text{м}^{-2}$	$10^{-5}$	–66,20		–11,40		–6,25	
$a_{33}$	$\text{м}^{-2}$	$10^{-4}$	9,75		4,26		1,82	
$a_{34}$	$\text{м}^{-2}$	$10^{-8}$	–2,72		–1,17		–0,44	

Таким образом, для задания множества (1) применительно к рассматриваемому двухвинтовому судну необходимо конкретизировать вид системы дифференциальных уравнений (5), задавая различные значения  $\omega_{11}$ ,  $\omega_{12}$ ,  $\omega_2$  в неповторяющихся комбинациях. Нумерация элементов множества (1) в табл. 1 может быть выполнена произвольным образом. Для того чтобы получить по табл. 1 элемент множества (1), например, с номером  $r = 12$ , нужно выделить ячейку таблицы с числом 12 и по горизонтали от нее найти  $\omega_{11} = 0$ ,  $\omega_2 = 1$ , а по вертикали —  $\omega_{12} = 1$ . Эти значения  $\omega_{11}$ ,  $\omega_{12}$ ,  $\omega_2$  нужно подставить в систему (5). Получим неполное представление элементарного движения плоского движения судна в множестве (1) с заданным номером  $r = 12$ . Аналогичный алгоритм действует при определении неполных представлений элементарных движений в виде (5) с другими номерами по заданному номеру из множества (1).

**Обсуждение (Discussion)**

Необходимо обратить внимание, что фазовые координаты  $x_7$ ,  $x_8$ ,  $x_9$  характеризуют следующие данные:  $x_7$  — упор  $u_{11}$  одного из движителей, например, с номером 1;  $x_8$  — упор  $u_{12}$  движителя с номером 2;  $x_9$  — угол перекладки руля. Тогда элемент 12 множества (1), построенного в соответствии уравнениями (5) и табл. 1, можно вербально определить так: «не изменяется упор движителя 1, увеличивается упор движителя 2, перекачивается руль к левому борту ( $\omega_2 = 1$ ). Из опыта судовождения и в соответствии с решением уравнений (5) элементу с номером 12 соответствует представление о том, что определенное элементарное движение судна выражается в увеличении скорости движения  $x_4$  и стремлении судна уклониться влево.

Каждому номеру табл. 1, таким образом, можно поставить в соответствие словесное описание изменений или неизменных положений органов управления ЧМИ в рубке ( $x_7$ ,  $x_8$ ,  $x_9$ ), изменений

или неизменных упоров движителей  $u_{11}$ ,  $u_{12}$ , угла переключки руля  $u_2$  и реакцию на них судна, выраженную в параметрах его движения  $(x_1, x_2, \dots, x_6)$ . И, наоборот, если, например, появляется намерение увеличить скорость движения за счет увеличения упора движителя 2, сохранив при этом неизменным упор движителя 1 и уклониться вправо, переложив руль к правому борту, то нужно для этого выбрать из множества (1) по табл. 1 элемент с номером 21. Таким образом, каждому номеру табл. 1 можно дать вербальную интерпретацию действий и реакций, выраженных в состояниях и изменениях положений органов управления ЧМИ и реакции на это судна элементарным движением, характеризуемым координатами  $x_1, x_2, \dots, x_6$  и, наоборот, для того чтобы изменить элементарное движение судна, т. е. его координаты  $x_1, x_2, \dots, x_6$ , необходимо представить как этого можно достичь с помощью изменения положения органов управления. Соответственно на основе построенной модели появляется возможность управлять движением судна, сообщая управляющему автомату ССС о своих намерениях. К тому же при совместном управлении построенную модель удобно использовать на уровне целеуказания для УА, выразив цель управляемого движения в виде последовательности неполных представлений элементарных движений из множества (1), руководствуясь данными табл. 1. Для такой последовательности переход от одного элементарного движения к другому вызывает определенный СДУ (4). Максимальное количество попарно различных СДУ для ССС в рассматриваемом случае при  $R = 27$  составляет  $(27-1)27 = 702$ . Таким образом, для того, чтобы в последовательности элементарных движений были реализованы все 702 попарно различных СДУ, такая последовательность должна состоять из не менее, чем 703 элементов.

Фактически не все конкретные попарно различные СДУ с номерами из множества  $D_0 = \{1, 2, \dots, 702\}$  натуральных чисел применяются судоводителем в практике судовождения, о чем, например, свидетельствуют результаты натурных экспериментов [9]. Поэтому размерность задачи конструирования антропоморфного управления можно понизить, выделив в  $D_0$  подмножество  $D_1 \subset D_0$  меньшей мощности реализуемых судоводителем СДУ. Тогда на уровне целеуказания можно рассматривать последовательность (3) СДУ как отображение значений индексов моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_j$  на множество  $D_1$ , т. е. выразить антропоморфное управление через целочисленную функцию от целочисленного аргумента. Задача построения такой функции должна решаться для конкретной ситуации (например, для определенного маневра судна при известной аппаратной реализации ЧМИ в ходовой рубке). Так, при совместном управлении продольным и боковым движениями судна на разных интервалах времени количество элементов множества  $D_1$  составит  $3^2(3^2-1) + 3^1(3^1-1) = 78$ , что существенно меньше мощности множества  $D_0$ , равной 702. Эти количественные данные оправдывают традиционное разделение моделируемых задач на задачу синтеза управляющей скоростью судна системы и задачу синтеза управляющей курсом системы [2].

В работе [10] обоснована перспективность решения проблемы построения интегрированной системы управления судном с единым управлением, осуществляемым с комплексного центрального поста управления — автоматизированного рабочего места судоводителя в ходовой рубке судна. Предлагается для решения данной проблемы использовать модель системы с распределенной архитектурой на основе мультиагентных технологий, принцип действия которых основан на декомпозиции общей задачи на ряд локальных задач, возлагаемых на агентов системы, разделении их между агентами, планировании коллективного поведения агентов и координации их взаимодействия на основе кооперации, реконфигурации, коммуникации и разрешении конфликтных ситуаций.

Анализ движения судов, выполненный на основе результатов натурных экспериментов [9], показал, что в последовательности СДУ (3) существуют повторяющиеся фрагменты, которые можно рассматривать как прецеденты [3] и как удобные для реализации в ЧМИ шаблоны в соответствии с предложениями, выполненными в работах [11], [12]. Не перегружая изложение нумерацией СДУ, воспользуемся данными табл. 1, представив шаблоны в виде последовательностей номеров неполных представлений элементарных движений судна: 4–1–4; 4–9–4; 4–1–4–9–4; 4–7–4–3–4 и др. Каждому из таких шаблонов может быть поставлена в соответствие некоторая цель движения, подчиненная общей цели для всей последовательности (3), например: «увеличить скорость до нового значения двумя движителями», «уменьшить скорость до нового значения двумя движителями», «увеличить

скорость, затем снизить скорость двумя движителями», «уменьшить скорость судна, затем увеличить скорость движителем 2» и т. п.

Таким образом, проведенное исследование позволяет представить движение судна при антропоморфном управлении непрерывной траекторией в пространстве состояний  $\{t \times x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n\}$ , которая состоит из участков элементарных движений, представляемых решением уравнений (5) при значениях  $\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_2$ , выбираемых из табл. 1. Решения совпадают в моменты  $t_1, t_2, \dots, t_f$  действия СДУ (4) в выбранной последовательности (3). Моментам действия СДУ соответствуют угловые точки траектории. Каждый участок траектории между соседними угловыми точками определяется целью элементарного движения, а некоторые последовательные участки траектории могут составлять шаблон, имеющий цель более высокого уровня по сравнению с целями элементарных движений. Поэтому на уровне целеуказания могут использоваться неполные представления элементарных движений в вербальной и математической (2) формах и шаблоны представлений целенаправленных движений, упрощающие процесс целеуказания с учетом указанных во введении данной статьи особенностей процесса принятия решения, обусловленного задачами управления судном.

Информация о неопределенности прогнозируемого изменения состояния ССС в каждой угловой точке траектории может быть использована для коррекции программы управления движением судна как до, так и в процессе выполнения движения на основе интегрирования уравнений чувствительности [7]. Существенное влияние на параметрическую неопределенность оказывает (см. табл. 2), осадка судна, в меньшей степени — глубина судового хода. Однако не существует аналитических зависимостей значений коэффициентов дифференциальных уравнений (5) малых для судна глубин, незначительно превышающих осадку судна, которые можно было бы использовать для уточнения модели. Выражения (6) позволяют снизить сигнальную неопределенность, но не устраняют ее из-за влияния на движение судна течения и ветра, которые, по существу, являются случайными процессами. В приемлемом для практики случае влияние указанных факторов целесообразно учитывать с использованием интервальных неопределенностей.

В случае недопустимого возрастания неопределенности программной траектории на стадии исполнения может проводиться апостериорное формирование программы управления в соответствии с рекомендацией, изложенной в [13]. Для этого имеются две возможности:

- 1) сдвигаются моменты времени подачи СДУ относительно рассчитанных ранее значений с сохранением априорной последовательности действий судоводителя или / и УА;
- 2) производится изменение спланированной последовательности действий, а значит, и последовательности неполных представлений элементарных движений, а также выполняются расчеты новых значений моментов времени подачи СДУ в исполнительную часть СЧМ для реализации апостериорной программы управления.

### **Заключение (Conclusion)**

В основе предложенного моделирования динамики состояния ССС находятся представления о совместном управлении движением судна судоводителем и управляющим автоматом, с помощью которого реализуется антропоморфное управление, подобное тому, которое выполняет человек, воздействуя на органы управления. Каждому участку моделируемой траектории в пространстве состояний ССС между угловыми точками, обусловленными действием СДУ, соответствует некоторая цель, определяемая судоводителем с пониманием о ее достижении при помощи воздействия на органы управления судном. Взаимосвязь представлений движения органов управления и движения судна с соответствующими целями используется на всех трех уровнях управления: целеуказания, планирования и исполнения. Учет такой взаимосвязи перемещений ОрУ с целями способствует эффективному решению задач управления движением судна на основе накопленного опыта и выполнения точных математических расчетов управляющим автоматом ССС, что позволяет оптимизировать распределение функции управления между судоводителем и УА.

В качестве достоинства модели следует отметить также, что при прогнозировании движения судна относительно любой точки траектории в пространстве состояний ССС необходимо и достаточно

располагать значениями фазовых координат только для этой точки в качестве начальных условий интегрирования дифференциальных уравнений модели и не обращаться к движению «в прошлом». Для каждого из указанных участков траектории можно построить систему дифференциальных уравнений в вариациях (уравнений чувствительности), на основе решения которой исследовать и учесть поведение судна в условиях внутренних и внешних неопределенностей. Эти уравнения могут быть использованы также для решения задачи оптимизации управляемого движения судна с использованием методов математического программирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ющенко А. С. Человек и робот — совместимость и взаимодействие / А. С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика. — 2014. — № 1 (2). — С. 4–9.
2. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. — О.: Феникс; — М.: ТрансЛит, 2007. — 376 с.
3. Шерстюк В. Г. Гибридная интеллектуальная СППР для управления судном / В. Г. Шерстюк, А. П. Бень // Искусственный интеллект. — 2008. — № 3. — С. 490–499.
4. Соляков О. В. Оптимизация режимов управления движением речных судов / О. В. Соляков, А. А. Потемкин, Н. В. Першин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1186–1196. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1186-1196.
5. Тырва В. О. О реализации совмещаемых управляющих воздействий на объект в системах «человек-машина» / В. О. Тырва, А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2020. — Т. 21. — № 5. — С. 274–281. DOI: 10.17587/mau.21.274-281.
6. Tyrva V. O. Anthropomorphic Control over Electromechanical System Motion: Simulation and Implementation / V. O. Tyrva, A. V. Saushev, O. V. Shergina // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). — IEEE, 2020. — Pp. 374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.
7. Тырва В. О. Моделирование действий и ответных реакций эргатической системы с электромеханическим объектом управления / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 189–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-189-201.
8. Тырва В. О. Трансформированные уравнения динамики судна / В. О. Тырва, Э. Б. Якимов // Материалы международной НПК «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление». — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2009. — С. 301–305.
9. Тырва В. О. Совместное управление объектом в эргатической системе: модели и реализации / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 430–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443.
10. Искандеров Ю. М. Мультиагентная модель интегрированной системы управления судном / Ю. М. Искандеров, В. Д. Гаскаров, В. И. Дорошенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 831–841. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-831-841.
11. Cooper A. About Face 3. The Essentials of Interaction Design / A. Cooper, R. Reimann, D. Cronin. — 3rd edition. — Wiley, 2007. — 648 p.
12. Raskin J. The humane interface: new directions in the design of computer systems / J. Raskin. — Addison-Wesley Professional, 2000. — 233 p.
13. Петров Б. Н. Проблемы гибкости и надежности управления в теории бортовых терминальных систем / Б. Н. Петров [и др.] // Автоматика и телемеханика. — 1981. — № 2. — С. 15–24.

#### REFERENCES

1. Yuschenko, A. S. “Human-robot: compatibility and cooperation.” *Robotics and technical cybernetics* 1(2) (2014): 4–9.
2. Vagushchenko, L. L., and N. N. Tsymbal. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna*. O.: Feniks; M.: TransLit, 2007.

3. Sherstyuk, V. G., and A. P. Ben'. "Gibridnaya intellektual'naya SPPR dlya upravleniya sudnom." *Artificial intelligence* 3 (2008): 490–499.
4. Soliakov, Oleg V., Andrey A. Potemkin, and Nikita V. Pershin. "Optimization of the motion river vessels regimes control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1186–1196. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1186-1196.
5. Tyrva, V. O., and A. V. Saushev. "About realizations of compatible control impacts on the object in the man-machine systems." *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* 21.5(2020): 274–281. DOI: 10.17587/mau.21.274-281.
6. Tyrva, Vladimir O., Aleksandr V. Saushev, and Olga V. Shergina. "Anthropomorphic Control over Electro-mechanical System Motion: Simulation and Implementation." *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2020.374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.
7. Tyrva, Vladimir O. "Modeling actions and reactions of ergatic system with electromechanical control object." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 189–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-189-201.
8. Tyrva, V. O., and E. B. Yakimov. "Transformirovannye uravneniya dinamiki sudna." *Materialy mezhdunarodnoi NPK «Vodnye puti Rossii: stroitel'stvo, ekspluatatsiya, upravlenie»*. SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2009. 301–305.
9. Tyrva, Vladimir O. "Joint control by object in ergatic system: models and realizations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 430–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443.
10. Iskanderov, Yurii M., Vagiz D. Gaskarov, and Viktor I. Doroshenko. "Multi-agent model of the integrated ship control system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 831–841. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-831-841.
11. Cooper, Alan, Robert Reimann, and David Cronin. *About Face 3. The Essentials of Interaction Design*. 3rd edition. Wiley, 2007.
12. Raskin, Jef. *The humane interface: new directions in the design of computer systems*. Addison-Wesley Publishing Professional, 2000.
13. Petrov, B. N., A. Ya. Andrienko, V. P. Ivanov, and Yu. P. Portnov-Sokolov. "Problemy gibkosti i nadezhnosti upravleniya v teorii bortovykh terminal'nykh system." *Avtomatika i telemekhanika* 2 (1981): 15–24.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Тырва Владимир Оскарович** —  
 кандидат технических наук, доцент,  
 старший научный сотрудник  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: v.tyrva@mail.ru, kaf\_electroprivod@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Tyrva, Vladimir O.** —  
 PhD, associate professor,  
 Senior Researcher  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: kaf\_electroprivod@gumrf.ru, v.tyrva@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2021 г.  
 Received: February 25, 2021.