

TEMPLATES OF SHIP MOVEMENT ANTHROPOMORPHIC CONTROL: DESIGN AND APPLICATION

V. O. Tyrva, E. V. Bova, A. Y. Rumyantsev

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

The process of designing templates of anthropomorphic ship movement control is described in the paper. The solutions of the sequence of modeling problems are used in the state space of the ergatic “skipper-ship” system for the example of a ship of “Volga-Don” type. Parametric interval uncertainties are taken into account in the initial mathematical model of the controlled object. They influence the unambiguity of solving the optimal control problem in the classical formulation. Factors of a priori uncertainty are the draft of the ship and the depth of the ship’s passage. Numerical solutions to the problem of optimal ship movement control in terms of speed are obtained for intervals ends of the mathematical model parameters values. The solutions are used in the design of templates to describe and account for the uncertainty of the allocation of management resources according to the methodology of interaction planning in an ergatic system. The templates of anthropomorphic control in the skipper-ship system are represented by sequences of element numbers of a set of normal systems of ordinary differential equations. They are constructed in a five-dimensional space of states according to a transformed mathematical model of the ship. Each normal system of ordinary differential equations displays in mathematical form an incomplete representation of the action of virtual controls and the corresponding elementary motion of the ship due to the existence of uncertainties. The procedures for constructing various options for the allocation of anthropomorphic control resources and corresponding templates of anthropomorphic control according to expert estimates based on a variety of solutions to the optimal control problem are proposed. The constructive property of the templates of anthropomorphic control is illustrated by the specific examples. New templates can be built by joining standard templates in a certain sequence, and the standard templates themselves can be determined using information about the performed movements of the ship controls, taking into account the experience of navigation. It is shown that it is possible to use such a posteriori information to train the automatic control machine of the “skipper-ship” system by rational management methods, including those that cannot be obtained as solutions to mathematical problems of optimal control. The library of anthropomorphic control templates is presented as an integral part of the knowledge base when using the technology of expert systems in the construction of automatic control machine with artificial intelligence.

Keywords: template, control, uncertainty, ergatic system, automatic control machine, ship, modeling, elementary movement, state space.

For citation:

Tyrva, Vladimir O., Elena V. Bova, and Alexey Yu. Rumyantsev. “Templates of ship movement anthropomorphic control: design and application.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 224–235. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-224-235.

УДК 62–50

ШАБЛОНЫ АНТРОПОМОРФНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА: КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

В. О. Тырва, Е. В. Бова, А. Ю. Румянцев

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

В данной работе процесс конструирования шаблонов антропоморфного управления движением судна представлен решениями последовательности задач моделирования в пространстве состояний эргатической системы «судоводитель – судно» на примере судна типа Волго-Дон. В исходной математической модели управляемого объекта учтены параметрические интервальные неопределенности, влияющие на однозначность решения задачи оптимального управления в классической постановке. Факторами

априорной неопределенности являются осадка судна и глубина судового хода. Численные решения задачи оптимального по быстродействию управления перемещением судна получены для концов интервалов значений параметров математической модели. Полученные решения использованы при конструировании шаблонов для описания и учета неопределенности распределения ресурсов управления по методологии планирования взаимодействия в эргатической системе. Шаблоны антропоморфного управления в системе «судоводитель – судно» представлены последовательностями номеров элементов множества нормальных систем обыкновенных дифференциальных уравнений, построенных в пятимерном пространстве состояний по преобразованной математической модели судна. Каждая нормальная система обыкновенных дифференциальных уравнений отображает в математической форме неполное, из-за существования неопределенностей, представление о действии виртуальных органов управления и соответствующем элементарном движении судна. Предложены процедуры построения различных вариантов распределения ресурсов антропоморфного управления и его соответствующих шаблонов, составленных по экспертным оценкам, на основе множества решений задачи оптимального управления. На конкретных примерах проиллюстрировано конструктивное свойство шаблонов антропоморфного управления: новые шаблоны могут быть построены с помощью стыковки в определенной последовательности типовых аналогов, а типовые шаблоны определены с применением сведений о выполненных движениях органов управления судном с учетом опыта судовождения. Тем самым показана возможность использования таких апостериорных сведений для управления эргатической системой «судоводитель – судно» рациональными способами, в том числе такими, которые не могут быть получены с помощью решения математических задач оптимального управления. Библиотека шаблонов антропоморфного управления представлена как составная часть базы знаний при использовании технологии экспертных систем в построении управляющего автомата с искусственным интеллектом.

Ключевые слова: шаблон, управление, неопределенность, эргатическая система, управляющий автомат, судно, моделирование, элементарное движение, пространство состояний.

Для цитирования:

Тырва В. О. Шаблоны антропоморфного управления движением судна: конструирование и применение / В. О. Тырва, Е. В. Бова, А. Ю. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 224–235. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-224-235.

Введение (Introduction)

В рассматриваемой эргатической системе управления движением судна — «человек – машина» (СЧМ) — функции управления реализуют совместно и параллельно во времени человек-оператор (ЧО) и управляющий автомат (УА). Основная особенность совместного управления движением судна объектом СЧМ заключается в том, что УА системы вырабатывает управляющие воздействия, подобные тем, которые совершает ЧО (судоводитель), воздействуя мускульным усилием на орган управления человеко-машинного интерфейса [1]. Такое управление, представляемое как *антропоморфное управление* (АУ) [2], моделируется последовательностью сигналов дискретного управления (СДУ), приводящих к смене элементарных движений объекта СЧМ [3]. Показано, что для целеуказания и планирования АУ могут быть использованы шаблоны, имеющие удобные для восприятия ЧО (судоводителем) формы представления в виде графиков и последовательностей неполных представлений элементарных движений, а также простой вербальной интерпретации с помощью структурированной системы целей [4]–[6].

Ставится и решается задача иллюстрации предлагаемой методики конструирования шаблонов АУ для уровня целеуказания на базе расчетов программ оптимального управления движением судна типа Волго-Дон. Использование теории оптимального управления [7] совместно с технологией обработки знаний в расчете на применение экспертной системы искусственного интеллекта [8] представляется целесообразным при решении этой задачи, так как судно принадлежит к числу технических объектов, для которых разработаны приемлемые для описания управляемых движений математические модели и накоплен обширный опыт судовождения. В частности, модель в форме нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, приведенная в [9], может быть использована непосредственно для постановки и решения задач оптимального управления по методу принципа максимума Л. С. Понтрягина [7].

Решение задачи оптимального управления называют *программой* [10], а ее получение — *планированием* [11]. При планировании используется «гипотеза полной определенности» [10], согласно которой не принимаются во внимание неточности, вызванные отсутствием полной адекватности математических описаний реальным процессам. При построении АУ оптимальное управление «помещается» в класс ситуационных управлений [12] в его развитии для подвижных объектов [13]. Классическая математическая модель динамики судна преобразуется в множество неполных представлений элементарных движений, которые в расширенном пространстве состояний учитывают как текущее положение судна в системе фазовых координат, так и перемещения органов управления при реализации АУ в соответствии с полной системой целей [6]. Построение шаблонов АУ основано на использовании неопределенностей, связанных с неполнотой сведений об элементарных движениях управляемого объекта в пространстве состояний СЧМ и распределении ресурсов управления для реализации программного движения, удовлетворяющего выработанным целям АУ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для описания управляемого движения судна используем *метод пространства состояний*. Из уравнений плоского движения судна [9] выделим уравнения продольного движения судна в трехмерном пространстве состояний. Для рассматриваемого случая запишем уравнения продольного движения судна в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= a_1 x_2^2(t) + (a_2 x_2(t) + a_3)u(t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $x_1(t)$, $x_2(t)$ — координаты местоположения и скорости судна (фазовые координаты) в пространстве состояний $\{t \times x_1 \times x_2\}$, зависящие от времени t (точки над обозначением координат x_1 и x_2 означает применение к ней операции дифференцирования по времени);

a_1 , a_2 , a_3 — коэффициенты, числовые значения которых для судна зависят от глубины судового хода H , осадки судна B и других факторов;

$u(t)$ — упор движителей — управление, представляемое в классической задаче оптимального управления функцией времени из класса кусочно-непрерывных функций.

Управление $u(t)$ (в относительных единицах) судном типа Волго-Дон ограничено следующими пределами:

$$-0,76 \leq u(t) \leq 1. \quad (2)$$

Расчетные значения коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 приведены в табл. 1. Уравнения (1) со значениями коэффициентов из табл. 1 справедливы для прямого хода судна при $x_2(t) \geq 0$ и всех значениях t на интервале времени движения.

Таблица 1

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

Параметр	Единица измерения	Множитель	Осадка судна			
			$B = 1,5 \text{ м}$		$B = 3,5 \text{ м}$	
			Глубина хода		Глубина хода	
			$H = 4 \text{ м}$	$H = 10 \text{ м}$	$H = 4 \text{ м}$	$H = 10 \text{ м}$
a_1	м^{-1}	10^{-3}	–2,49	–2,39	–1,18	–1,03
a_2	с^{-1}	10^{-2}	–1,924	–1,885	–0,386	–0,361
a_3	мс^{-2}	10^{-1}	2,18	2,18	0,40	0,40

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 зависят от осадки B судна. В приведенном случае увеличение осадки B с 1,5 м до 3,5 м приводит к изменению значений коэффициентов (например, a_3) более чем в 5 раз. Уменьшение глубины судового хода от 10 м до 4 м при определенной осадке $B = \text{const}$ вызывает увеличение коэффициентов (например, a_1) по абсолютной величине до 15 % (возрастают квадратичная и линейная зависимости сопротивления движению от скорости).

Для условий шлюзования судна представляют интерес неопределенности значений a_1 и a_2 при $H \leq 10$ м. Например, при $B = 1,5$ м и $4,0 \text{ м} \leq H \leq 10$ м параметрические интервальные неопределенности (ПИН) характеризуются интервалами: $-0,00249 \text{ м}^{-1} \leq a_1 \leq -0,00239 \text{ м}^{-1}$ и $-0,01924 \text{ с}^{-1} \leq a_2 \leq -0,01885 \text{ с}^{-1}$. На практике априорная неопределенность осадки судна устраняется в ручном или автоматическом режиме на основе измерений осадки судна. Поэтому величину осадки судна можно и целесообразно учитывать в качестве априорных сведений о математической модели (1). Априорные сведения о глубине судового хода H в зависимости от местоположения судна вдоль траектории его движения иногда известны приблизительно. Поэтому можно сделать вывод о существовании параметрических интервальных неопределенностей значений a_1 и a_2 .

Судоводителем (капитаном судна) ограничивается скорость движения судна при вводе в камеру шлюза в целях обеспечения безопасности на конечном этапе движения при торможении реверсированным вращением винтов и остановке в требуемом месте камеры шлюза. Вместе с тем актуальными являются требования обеспечения высокой пропускной способности шлюза при интенсивных судопотоках, что достигается уменьшением времени шлюзования судна за счет увеличения средней скорости движения на пути ввода в шлюз. Таким образом, целесообразно рассматривать задачу оптимального по быстродействию управления судном при ограничении скорости движения с той особенностью, что так называемый упор $u(t)$ для рассматриваемого судна создается двумя винтами (двигателями), которые могут работать независимо друг от друга при соответствующем управлении главными двигателями судна:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t), \quad (3)$$

где $u_1(t)$ и $u_2(t)$ — упоры движителей.

По условиям технической реализации процессов управления главными двигателями судна переходы с положительного упора на отрицательный и в обратном направлении имеют промежуточные состояния $u_1(t) = 0$ у одного и $u_2(t) = 0$ у другого двигателя. Длины интервалов времени этих состояний ограничиваются снизу несколькими секундами.

Результаты (Results)

Расчеты установившихся максимальных скоростей движения судна $v_{\max}(x_2(t) \rightarrow v_{\max})$ при $u(t) \rightarrow 1$, выполненные по модели (1) на основе данных табл. 1, отображены в виде графиков на рис. 1. Линии 1 и 2 показывают зависимость скорости движения при $u(t) = 1$ (работают два движителя) от осадки судна B , если глубина судового хода составляет, соответственно, 10 м и 4 м. Линии 3 и 4 показывают зависимость скорости движения при $u(t) = 0,5$ (работает один движитель) от осадки судна B , если глубина судового хода H составляет, соответственно, 10 м и 4 м. Близлежащие друг к другу две линии показывают (отсчет по вертикали) координатные интервальные неопределенности (КИН) скорости движения судна при осадках B , составляющих 1,5 м и 3,5 м, вызванных изменениями глубины по ходу движения судна в пределах $4 \text{ м} \leq H \leq 10$ м. Например, при $B = 1,5$ м и $u(t) = 1$ КИН равна 0,1 м/с, а при $B = 3,5$ м — 0,3 м/с. Координатные неопределенности рассматриваются в связи с параметрическими интервальными неопределенностями (ПИН) коэффициентов a_1 и a_2 в (1). Все возможные промежуточные зависимости $v_{\max}$ от H расположены внутри показанного на рис. 1 прямоугольника между линиями 1 и 4. Априорная КИН устраняется или, по крайней мере, уменьшается, если имеется и используется априорная информация об осадке судна и распределении глубин по траектории движения судна.

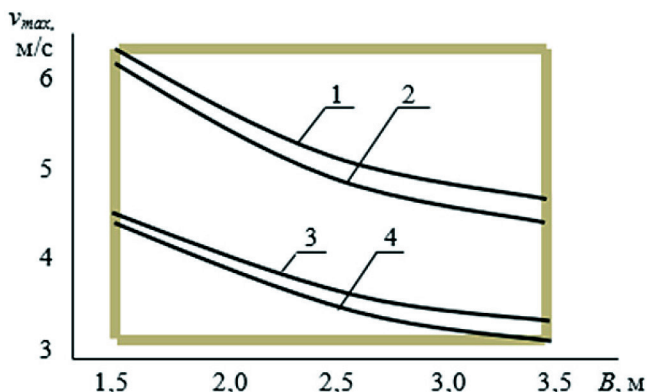


Рис. 1. Графики зависимостей установившейся максимальной скорости судна $v_{\max}$ от осадки судна B и глубины судового хода H для реальных условий эксплуатации

Fig. 1. Graphs of the dependence of the steady maximum speed of the vessel $v_{\max}$ on the vessel draft B and fairway depth H for real operating conditions

Анализ графиков показывает, что ограничение скорости $x_2(t)$, составляющее $v \leq 3,1$ м/с, может оказаться эффективным: $x_2(t) = v = 3,1$ м/с для некоторых моментов времени t при решении задачи оптимального управления даже при работе одного движителя судна $u_1(t)$ или $u_2(t)$ при любой осадке судна $1,5 \text{ м} \leq B \leq 3,5 \text{ м}$ и глубине судового хода H из диапазонов $4 \text{ м} \leq H \leq 10 \text{ м}$. Ограничение $x_2(t) \leq v = 4,6$ м/с, как показывают графики при $u(t) = 0,5$, заведомо не может быть эффективным, если работает только один движитель. Оно, как видно, может быть эффективным $x_2(t) = 4,6$ м/с во всем диапазоне значений осадки судна $1,5 \text{ м} \leq B \leq 3,5 \text{ м}$ только при работе двух движителей.

Примеры решения задач оптимального по быстродействию управления движением судна показаны на рис. 2. Скорость движения судна при вводе в камеру шлюза ограничивается, по рекомендуемым экспертным оценкам, значением $v = 2,5$ м/с. В соответствии с гипотезой полной определенности принято $H = 4$ м (поддерживаемая для шлюзов глубина судового хода). Для удобства пространственной интерпретации решений в привязке к проходимому судном пути S_i зависимость упора $u_i = u(t)$ показана не от времени t , а от расстояния $S_i = -x_1(t)$ при $x_1(t) < 0$ до места остановки судна в камере шлюза в момент времени t_k при $x_1(t_k) = 0$. Внутри интервала времени движения судна $[0, t_k]$ скорость $x_2(t) > 0$. Верхним горизонтальным участком графиков соответствует $u(t) = 1$, нижним — $u(t) = -0,76$ в соответствии с условием (2). Все графики, показанные сплошными линиями (кусочно-постоянные функции от x_1), построены для судна с осадкой $B = 1,5$ м. Пунктирными линиями показаны решения задач при $B = 3,5$ м. Все решения получены при условии соблюдения ограничения $x_2(t) \leq v = 2,5$ м/с. Значению скорости $x_2(t) = v = 2,5$ м/с соответствует упор движителей $u(t)$ из диапазона $0 < u(t) < 0,5$. По расчетам имеем два значения: $u(t) = 0,09$ при $B = 1,5$ м и $H = 4$ м; $u(t) = 0,24$ при $B = 3,5$ м, $H = 4$ м.

Очертания графика оптимального управления зависят от расстояния, на которое перемещается судно. Если $B = 1,5$ м, то при любых $S_i < 52$ м (рис. 2, а, б) последовательно реализуются вначале $u(t) = 1$, затем $u(t) = -0,76$. Продолжительности интервалов времени, на которых $u(t) = 1$ и $u(t) = -0,76$, изменяются, уменьшаясь от значений 11 с и 15 с, соответственно, при уменьшении проходимого судном пути, начиная с $S_i = 52$ м (см. рис. 2, а). При той же осадке судна $B = 1,5$ м и любых $S_i > 52$ м (см. рис. 2, в, г) последовательно реализуются вначале $u(t) = 1$, затем $u(t) = 0,09$, потом $u(t) = -0,76$. Продолжительности интервалов времени, на которых $u(t) = 1$ и $u(t) = -0,76$, не изменяются и составляют, соответственно, 11 с и 15 с. Изменяется длина интервала времени, на котором судно движется со скоростью $x_2(t) = 2,5$ м/с. При этом $u(t) = 0,09$. Например, на преодоление судном расстояния $S_i = 150$ м уходит $\tau_s = \tau_{150} = 65$ с (см. рис. 2, в), если $S_i = 250$ м, то $\tau_s = \tau_{250} = 105$ с (см. рис. 2, г). Граница между вариантами управления по последовательностям $Tem1(u) = \{u: 1 \rightarrow -0,76\}$ и $Tem2(u) = \{u: 1 \rightarrow 0,09 \rightarrow -0,76\}$ показана на рис. 2 линией cd при $S = 52$ м.

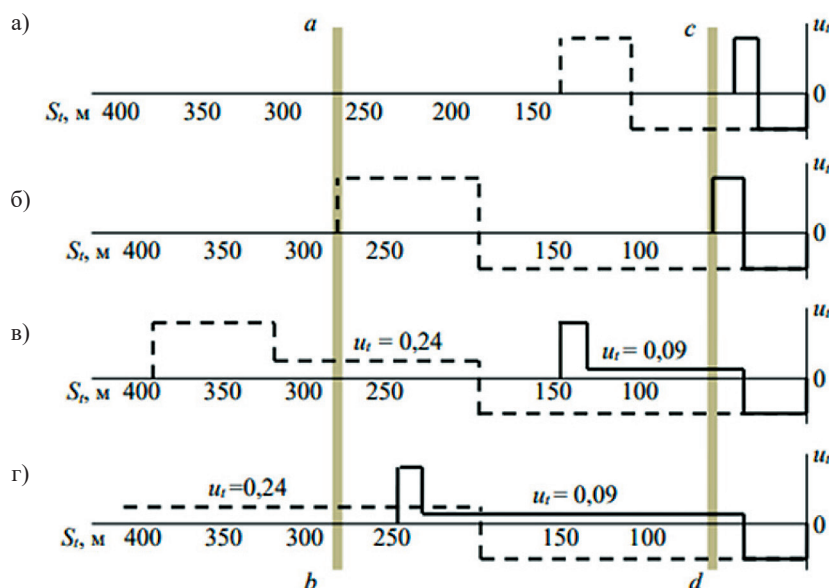


Рис. 2. Графическое представление решений задач оптимального по быстродействию управления движением судна на основе гипотезы полной определенности
Fig. 2. Graphical representation of solutions to the problems of optimal for performance control of a vessel motion based on the hypothesis of complete certainty

Числовые значения параметров движения при осадке судна $B = 3,5$ м отличаются от полученных при $B = 1,5$ м. Если $S_i < 280$ м, то управление реализуется на последовательности $Tem1(u) = \{u: 1 \rightarrow -0,76\}$ (см. рис. 2, б пунктирная линия) на времени $\tau_s < 145$ с. Как и в предыдущем случае, τ_s уменьшается от значения 145 с при уменьшении S_i (см. рис. 2, а). При $S_i > 280$ м управление реализуется на последовательности $Tem3(u) = \{u: 1 \rightarrow 0,24 \rightarrow -0,76\}$ (см. рис. 2, в, пунктирная линия) при $u(t) = 0,24$ на времени $\tau_s > 145$ с. Граница между вариантами управления из последовательностей $Tem1(u) = \{u: 1 \rightarrow -0,76\}$ и $Tem3(u) = \{u: 1 \rightarrow 0,24 \rightarrow -0,76\}$ при $B = 3,5$ м показана на рис. 2 линией ab при $S_i = 280$ м. Таким образом, скорость $x_2(t) = 2,5$ м/с поддерживается неизменной при $u(t) = 0,09$, если $B = 1,5$ м (судно без груза), и $u(t) = 0,24$, если $B = 3,5$ м (судно загружено до 5000 т).

Наличие двух движителей у судна создает неопределенность в решениях задач оптимального управления, которые показаны на рис. 2, в–г. В соответствии с терминологией, используемой Н. Н. Моисеевым в [10], указанную неопределенность можно назвать *неопределенностью распределения ресурса управления* (НРРУ). Формально она является следствием бесконечного множества решений уравнения (3) относительно $u_1(t)$ и $u_2(t)$ при заданном $u(t)$ (одно уравнение и два неизвестных), так как имеем $u(t) = 0,09$ при $B = 1,5$ м, $u(t) = 0,24$ при $B = 3,5$ м и любых фиксированных значениях t на соответствующих интервалах времени (см. рис. 2, в–г). Неопределенность устраняется, например, выполнением требования, чтобы один из двух движителей не работал во времени, когда судно движется с выбранной допустимой скоростью (в рассматриваемом случае $x_2(t) = v = 2,5$ м/с). На практике такая скорость выбирается судоводителем на основе субъективной оценки и опыта судовождения, реализуемой судоводителем путем установки в определенное положение органа управления главным двигателем, создающим упор винта.

Анализ особенностей реализаций управления со стороны УА, действующего подобно судоводителю, выполним на основе рис. 3, на котором показаны расчетные зависимости упора движителей $u_i = u(t)$ от допустимой скорости $x_2(t) = v$ при $2,5$ м/с $\leq v \leq 4,0$ м/с. Линия lm при $u_i = 0,5$ разделяет две области для графиков: выше lm $u(t) > 0,5$ необходимо, чтобы работали два движителя; ниже lm $0 < u(t) < 0,5$ любую скорость из обозначенного диапазона скоростей $2,5$ м/с $\leq v \leq 4,0$ м/с можно поддерживать работой только одного из двух движителей. Графики 1 и 2 показывают зависимости u_i от v при осадке судна $B = 3,5$ м: 1 — для глубины судового

хода $H = 4$ м; 2 — для глубины $H = 10$ м. Слева от границы ab скорость ($v < 3,4$ м/с) может поддерживаться одним движителем, справа от cd — обязательно двумя движителями ($v > 3,6$ м/с). Между границами ab и cd возможность поддержания скорости v одним движителем зависит от глубины судового хода из диапазона $4 \text{ м} \leq H \leq 10 \text{ м}$.

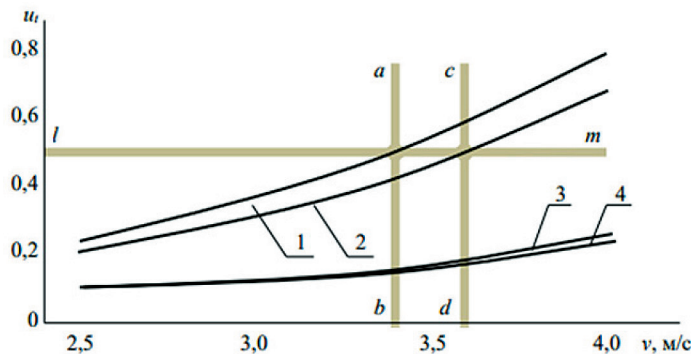


Рис. 3. Графики зависимостей упора движителей u от скорости v верхней границы допустимых скоростей движения судна
Fig. 3. Graphs of the dependences of the propulsion thrust u on the speed v of the upper limit of permissible vessel speeds

Графики 3, 4 на рис. 3 характеризуют зависимость требуемого значения упора $u_i = u(t)$ от выбранной скорости движения v из диапазона $2,5 \text{ м/с} \leq v \leq 4,0 \text{ м/с}$ при осадке судна $B = 1,5$ м. Они располагаются под линией lm в области, где скорость v может выдерживаться работой одного движителя. Линия 3 построена в расчете на глубину судового хода $H = 4$ м, линия 4 — в расчете на $H = 10$ м.

По условиям технической реализации управляющих воздействий в СЧМ «судоводитель — судно» разрывам функций $u_1(t)$ и $u_2(t)$, составляющим $u(t)$, согласно условию (3) и рис. 2, поставим в соответствие конечные значения скоростей изменения упоров движителей $\dot{x}_3(t)$ и $\dot{x}_4(t)$:

$$\begin{cases} \dot{x}_3(t) = b\omega_1; \\ \dot{x}_4(t) = b\omega_2, \end{cases} \quad (4)$$

где $b = 0,12$ (1/с) — скорость перемещения органа управления аппарата совместного управления главным двигателем;

ω_1 и ω_2 — дискретные переменные, принимающие значения, которым соответствуют вербальные представления (лингвистические переменные): -1 — уменьшить упор движителя; 0 — оставить упор движителя как есть; 1 — увеличить упор движителя.

Каждая из новых фазовых переменных $x_3(t)$ и $x_4(t)$ может изменяться согласно условиям (2) и (3) в диапазоне от $-0,38$ до $0,5$ (относительные величины). Возможные на практике комбинации перемещений органов управления упорами движителей по (4) пронумерованы ($n = 1, 2, \dots, 9$) в соответствии с данными табл. 2.

Таблица 2

Номера n комбинаций вариантов выбора перемещений органов управления упорами двух движителей

ω	$\omega_2 = 1$	$\omega_2 = 0$	$\omega_2 = -1$
$\omega_1 = 1$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 5$
$\omega_1 = 0$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 8$
$\omega_1 = -1$	$n = 6$	$n = 7$	$n = 9$

Каждой из девяти комбинаций антропоморфных перемещений органов управления движением судна $\omega_1(n)$ и $\omega_2(n)$ при фиксированном n по табл. 2 поставим в соответствие нормальную систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= a_1 x_2^2(t) + (a_2 x_2(t) + a_3) [x_3(t) + x_4(t)]; \\ \dot{x}_3(t) &= b \omega_1(n); \\ \dot{x}_4(t) &= b \omega_2(n), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

расширяющую модель (1) по размерности пространства состояний с трех до пяти: $\{t \times x_1 \times x_2\} \rightarrow \{t \times x_1 \times x_2 \times x_3 \times x_4\}$. Например, при $n = 3$ имеем $\omega_1(3) = 0$ и $\omega_2(3) = 1$.

Каждая система (5), когда $n = 1, 2, \dots, 9$, при подстановке в нее значений $\omega_1(n)$ и $\omega_2(n)$ из табл. 2 образует неполное представление элементарного управляемого движения судна, которое имеет номер n . Неполнота представления в значении, определенном Г. В. Корневым [14], создает временную и координатную неопределенности, необходимые для построения шаблона АУ. Поэтому целеуказание может быть выражено формально последовательностью номеров неполных представлений элементарных движений (5). Выполненные расчеты показывают, что при ограничении скорости движения $2,5 \text{ м/с} \leq v \leq 4,0 \text{ м/с}$ и длине пути перемещения судна $S_i < 52 \text{ м}$ из состояния неподвижности в новое состояние неподвижности целеуказанию соответствует последовательность

$$Tem1(n) = \{n: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 1\}, \quad (6)$$

если осадка судна $B = 1,5 \text{ м}$.

Данная последовательность сохраняется для больших расстояний при увеличении осадки B судна сверх $1,5 \text{ м}$. Так, при $B = 3,5 \text{ м}$ также имеем $Tem1(n)$ в виде последовательности (6), если $S_i < 280 \text{ м}$ (см. рис. 2, а, б). Включение неполного представления движения под номером $n = 4$ в $Tem1(n)$ между номерами $n = 9$ обусловлено учетом необходимости соблюдения выдержки времени при переходе с положительного упора движителей на отрицательный упор.

Рис. 2, в, г может служить исходными сведениями для построения последовательностей неполных представлений элементарных движений в качестве шаблонов антропоморфного управления при $S_i > 52 \text{ м}$, если $B = 1,5 \text{ м}$, и при $S_i > 280 \text{ м}$, если $B = 3,5 \text{ м}$. Помехой этому является НРРУ. Устранение данной неопределенности во взаимодействии с экспертами, в качестве которых выступали капитаны судов с большим опытом судовождения, позволяет выделить приемлемую для практического применения наиболее надежную по обеспечению безопасности ввода судна в камеру шлюза последовательность

$$Tem2(n) = \{n: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 4 \rightarrow 1\} \quad (7)$$

или

$$Tem3(n) = \{n: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 7 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 1\}, \quad (8)$$

в зависимости от того, какой из главных двигателей, согласно табл. 2, выбран для поддержания движения судна с выбранной граничной скоростью $v = 2,5 \text{ м/с}$.

Обсуждение (Discussion)

Шаблоны АУ (6)–(8) соответствуют цели в вербальном представлении: «переместить судно от причальной стенки в камеру шлюза» [6]. Каждый элемент этих шаблонов представляет собой неполное представление элементарного движения судна вида (5). В отличие от представления элементарных движений в основе описания действий робота с интеллектуальной системой управления («интеллектуального робота») [15]–[18] используемые неполные представления движения построены в едином для них пространстве состояний СЧМ, учитываются параметрические и координатные неопределенности математического моделирования движений судна и виртуальные перемещения органов человеко-машинного интерфейса как при ручном управлении.

Анализ конструкций (6)–(8) показывает, что их составной частью является шаблон АУ:

$$Tem4(n) = \{n: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 9\}, \quad (9)$$

который соответствует цели — *увеличить скорость судна до требуемого значения.*

Шаблон

$$Tem5(n) = \{n: 9 \rightarrow 4 \rightarrow 1\} \quad (10)$$

в условии (6) соответствует цели — *уменьшить скорость судна до требуемого значения.*

Шаблон (6) теперь можно представить иной конструкцией:

$$Tem7(n) = \{n: Tem4(n) \rightarrow 4 \rightarrow Tem5(n)\}. \quad (11)$$

Наличие неопределенностей в шаблонах АУ увеличивает возможности их применения. Например, каждый из шаблонов (6)–(11) может использоваться при любой фиксированной осадке судна из диапазона $1,5 \text{ м} \leq B \leq 3,5 \text{ м}$, глубине судового хода $4 \text{ м} \leq H \leq 10 \text{ м}$, а с учетом [9] — при любой глубине судового хода более 4 м. Кроме того, все шаблоны АУ (6)–(11), построенные на основе решения задачи оптимального по быстродействию управления перемещением судна из одной позиции в другую, могут использоваться в целеуказании и для случаев, когда экстремальная цель (максимальное быстродействие) не ставится, а, например, решается задача распределения ресурса управления на этапах увеличения скорости судна (шаблон (9)) и (или) уменьшения скорости (шаблон (10)). На основе [10] можно утверждать, что эта задача не имеет аналитического решения, а решение должно приниматься на основе экспертных оценок опытных судоводителей желательно с привлечением методов планирования взаимодействия с УА [19], [20]. В частном случае задачу распределения ресурса АУ можно представить посредством процедуры выбора «запаса» упора δu в преобразованном ограничении (2): $-0,76 + \delta u \leq u(t) \leq 1 - \delta u$, $0 < \delta u < 0,76$. Например, $\delta u = 0,1$.

Конструкциями (9)–(11) не исчерпывается множество шаблонов АУ, удобных для применения в целеуказании и планировании АУ. Например, практикуются так называемые «шлюзования с хода», когда судно не останавливается у причальной стенки перед шлюзом в ожидании начала шлюзования. Управление судном планируется таким образом, чтобы оно подошло к шлюзу к назначенному заранее моменту начала шлюзования. Для таких случаев действуют шаблоны АУ типа (6)–(8), в которых последовательность $\{n: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 9\}$, т. е. (9) заменена на (10). Воспользоваться такими шаблонами для планирования АУ при рассмотренном ограничении скорости $x_2(t) \leq v = 2,5 \text{ м/с}$ можно, если скорость подхода судна к шлюзу превышает это значение.

Предложенные конструкции шаблонов дают возможность представить предысторию эксплуатации судна на жизненном цикле с помощью последовательностей элементарных движений [21]. При этом появляется возможность использовать апостериорные сведения для обучения УА рациональным способам управления в том числе таким, которые не могут быть получены в виде решения математических задач оптимального управления, рассмотренных в данном исследовании.

Заключение (Conclusion)

Выполненное конструирование шаблонов АУ иллюстрирует на примере эргатической системы «судоводитель – судно» последовательность и содержание решения следующих задач:

- построение математической модели управляемого объекта в пространстве состояний;
- математическое описание неопределенностей, присущих модели;
- численное решение задач оптимального управления в математической постановке для концов интервалов параметрических неопределенностей;
- выделение в системе фазовых координат зон с характерными формами реализации оптимального управления;
- расширение пространства состояний и построение шаблонов АУ в виде последовательностей неполных представлений элементарных движений на основе учета неопределенностей и коррекции оптимального управления по требованиям его технической реализации как ручного управления;
- выделение типовых вложенных шаблонов в построенных последовательностях неполных представлений движения;

– построение шаблонов АУ для уровня целеуказания с применением типовых шаблонов, используемых в качестве вложенных конструкций.

Библиотека шаблонов АУ рассматривается как составная часть базы знаний при использовании технологии экспертных систем в построении УА с искусственным интеллектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *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 (RusAuto-Con). — IEEE, 2020. — Pp. 374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.
3. *Тырва В. О.* Автоматизация эргатической системы «человек-машина» на основе применения в ней антропоморфного управления / В. О. Тырва // Автоматизация в промышленности. — 2021. — № 2. — С. 3–7. DOI: 10.25728/avtprom.2021.02.01.
4. *Тырва В. О.* Аналитический подход к конструированию совместного управления движением эргатической системы «судоводитель-судно» / В. О. Тырва, А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2021. — Т. 22. — № 9. — С. 459–467.
5. *Saushev A.* On the use of templates in joint control of the object movement of the human-machine ergatic system / A. Saushev, V. Tyrva // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2476. — Is. 1. DOI: 10.1063/5.0103854.
6. *Тырва В. О.* Целеуказание совместного управления в системе «человек-машина»: моделирование и структуризация / В. О. Тырва, А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2023. — Т. 24. — № 2. — С. 67–74. DOI: 10.17587/mau.24.67–74.
7. *Понтрягин Л. С.* Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. — М.: Наука, 1976. — 392 с.
8. *Макаров И. М.* Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов; [отв. ред. И. М. Макарова]; Отделение информ. Технологий и вычислит. Систем РАН. — М.: Наука, 2006. — 333 с.
9. *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.
10. *Моисеев Н. Н.* Элементы теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.), 1974. — 528 с.
11. *Ющенко А. С.* Человек и робот — совместимость и взаимодействие / А. С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика. — 2014. — № 1 (2). — С. 4–9.
12. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. — М.: Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.), 1986. — 288 с.
13. *Филимонов А. Б.* Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2018. — Т. 19. — № 9. — С. 563–578. DOI: 10.17587/mau.19.563–578.
14. *Корнев Г. В.* Цель и приспособляемость движения / Г. В. Корнев. — М.: Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.), 1974. — 528 с.
15. *Попов Е. П.* Манипуляционные роботы динамика и алгоритмы / Е. П. Попов, А. Ф. Верещагин, С. Л. Зенкевич. — М.: Наука (Главная редакция физико-математической литературы), 1978. — 400 с.
16. *Cataldi E.* Set-based inverse kinematics control of an anthropomorphic dual arm aerial manipulator / E. Cataldi, F. Real, A. Suárez, P. A. Di Lillo, F. Pierri, G. Antonelli, F. Caccavale, G. Heredia, A. Ollero // 2019 International Conference on robotics and automation (ICRA). — IEEE, 2019. — Pp. 2960–2966. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793470.
17. *Lee H.* Constraint-based cooperative control of multiple aerial manipulators for handling an unknown payload / H. Lee, H. J. Kim // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2017. — Vol. 13. — Is. 6. — Pp. 2780–2790. DOI: 10.1109/TII.2017.2692270.

18. *Jimenez-Cano A. E.* Modelling and control of an aerial manipulator consisting of an autonomous helicopter equipped with a multi-link robotic arm / A. E. Jimenez-Cano, G. Heredia, M. Bejar, K. Kondak, A. Ollero // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. — 2016. — Vol. 230. — Is. 10. — Pp. 1860–1870. DOI: 10.1177/0954410015619442.
19. *Cooper A.* About Face 3. The Essentials of Interaction Design / A. Cooper, R. Reimann, D. Cronin. — 3rd edition. — Wiley, 2007. — 648 p.
20. *Raskin J.* The humane interface: new directions in the design of computer systems / J. Raskin. — Addison-Wesley Professional, 2000. — 233 p.
21. *Тырва В. О.* О теоретических основаниях автоматизации процессов управления в системе «человек-машина» / В. О. Тырва // *Автоматизация в промышленности*. — 2023. — № 1. — С. 47–53. DOI: 10.25728/avtprom.2023.01.08.

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Tyrva, V. O. “Avtomatizatsiya ergaticheskoi sistemy «chelovek-mashina» na osnove primeneniya v nei antropomorfnoho upravleniya.” *Automation in industry* 2 (2021): 3–7. DOI: 10.25728/avtprom.2021.02.01.
4. Tyrva, V. O., and A. V. Saushev. “Analytical approach to the design of joint motion control of the ergatic system “skipper-ship”.” *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* 22.9 (2021): 459–467. DOI: 10.17587/mau.22.459–467.
5. Saushev, Alecsandr, and Vladimir Tyrva. “On the use of templates in joint control of the object movement of the human-machine ergatic system.” *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2476. No. 1. AIP Publishing, 2023. DOI: 10.1063/5.0103854.
6. Tyrva, V. O., and A. V. Saushev. “Targeting of Joint Control in the “Man-Machine” System: Modeling and Structuring.” *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* 24.2 (2023): 67–74. DOI: 10.17587/mau.24.67–74.
7. Pontryagin, L.S., V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze, and E. F. Mishchenko. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov*. M.: Nauka, 1976.
8. Makarov, I.M., V. M. Lokhin, S. V. Man'ko, and M. P. Romanov. *Iskusstvennyi intellekt i intellektual'nye sistemy upravleniya*. M.: Nauka, 2006.
9. 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.
10. Moiseev, N. N. *Elementy teorii optimal'nykh sistem*. M.: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, izd-vo «Nauka», 1974.
11. Yuschenko, A. S. “Human-robot: compatibility and cooperation.” *Robotics and technical cybernetics* 1(2) (2014): 4–9.
12. Pospelov, D. A. *Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika*. M.: Nauka, 1986.
13. Filimonov, A. B., and N. B. Filimonov. “Situational Approach in the Problems of Automation Control by Technical Objects.” *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* 19.9 (2018): 563–578. DOI: 10.17587/mau.19.563–578.
14. Korenev, G. V. *Tsel' i prispособlyaemost' dvizheniya*. M., Nauka, 1974.
15. Popov, E. P., A. F. Vereshchagin, and S. L. Zenkevich. *Manipulyatsionnye roboty dinamika i algoritmy*. M.: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, izd-vo «Nauka», 1978.
16. Cataldi, Elisabetta, F. Real, A. Suárez, P. A. Di Lillo, F. Pierri, G. Antonelli, F. Caccavale, G. Heredia, and A. Ollero. “Set-based inverse kinematics control of an anthropomorphic dual arm aerial manipulator.” *2019 International Conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE, 2019. 2960–2966. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793470.
17. Lee, Hyeonbeom, and H. Jin Kim. “Constraint-based cooperative control of multiple aerial manipulators for handling an unknown payload.” *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 13.6 (2017): 2780–2790. DOI: 10.1109/TII.2017.2692270.

18. Jimenez-Cano, A. E., G. Heredia, M. Bejar, K. Kondak, and A. Ollero. “Modelling and control of an aerial manipulator consisting of an autonomous helicopter equipped with a multi-link robotic arm.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 230.10 (2016): 1860–1870. DOI: 10.1177/0954410015619442.

19. Cooper, Alan, Robert Reimann, and David Cronin. *About Face 3. The Essentials of Interaction Design*. 3rd edition. Wiley, 2007.

20. Raskin, Jef. *The humane interface: new directions in the design of computer systems*. Addison-Wesley Publishing Professional, 2000.

21. Tyrva, V. O. “O teoreticheskikh osnovaniyakh avtomatizatsii protsessov upravleniya v sisteme “chelovek-mashina”.” *Automation in industry* 1 (2023): 47–53. DOI: 10.25728/avtprom.2023.01.08.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тырва Владимир Оскарович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: v.tyrva@mail.ru

Бова Елена Владимировна — доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: elena.bova2015@bk.ru

Румянцев Алексей Юрьевич —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: stehnika@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tyrva, Vladimir O. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: v.tyrva@mail.ru

Bova, Elena V. — Associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: elena.bova2015@bk.ru

Rumyantsev, Alexey Yu. —

PhD

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: stehnika@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 января 2024 г.

Received: January 19, 2024.