

В. О. Тырва, канд. техн. наук, проф., v.tyrva@mail.ru,  
А. В. Саушев, д-р техн. наук, зав. каф., saushev@bk.ru,  
ФГБОУ ВО "ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова", г. Санкт-Петербург

## Аналитический подход к конструированию совместного управления движением эргатической системы "судоводитель—судно"

*Рассматривается задача конструирования совместного управления движением объекта водного транспорта — эргатической системы "судоводитель—судно". Совместное управление движением представляется в математической форме на основе модели действий и ответных реакций человека-оператора и машины, принятой в инженерной психологии для систем "человек—машина". Проведена формализация модели путем композиции математических моделей плоского движения судна и перемещений органов управления движителями (винтами) и рулями судна. Для судового человеко-машинного интерфейса предложено применять аппараты нового типа, с помощью которых совмещаются управляющие воздействия на орган управления со стороны судоводителя и управляющего автомата эргатической системы.*

*Для математического описания виртуальных сигналов дискретного управления при решении задач целеуказания и планирования предложен способ построения множества неполных представлений элементарных движений в пространстве состояний системы "судоводитель—судно". Получены количественные оценки попарно различных представлений элементарных движений и сигналов дискретного управления, реализующих переходы от одного элементарного движения к другому путем воздействий на движители и рули судна с помощью органов управления судового человеко-машинного интерфейса.*

*В целях унификации антропоморфного управления движением судна на уровнях целеуказания и планирования предложено применять шаблоны из нескольких сигналов дискретного управления исходя из опыта судовождения и решения задач математического программирования. Получено решение практической задачи оптимального по быстродействию антропоморфного управления перемещением судна от причальной стенки в камеру шлюза, которое предусматривает реализацию последовательности из десяти сигналов дискретного управления и двух шаблонов управления. Предложен способ оценки влияния сигнальных, параметрических и координатных неопределенностей на положение изображающей точки в пространстве состояний системы "судоводитель—судно" относительно номинальной траектории программного движения. Получены области интервальных представлений неопределенностей в подпространстве состояний "время—положение—скорость" судна. Рассмотрена процедура коррекции априорного описания номинального антропоморфного управления на основе шаблонов управления и анализа прямоугольников неопределенностей в подпространстве состояний системы "судоводитель—судно".*

**Ключевые слова:** эргатическая система, управление, пространство состояний, модель, планирование, неопределенность, судно

### Введение

Существующие системы управления движением судов относятся к классу эргатических систем, т. е. таких систем, в которых объектом (судном) управляет человек-оператор (ЧО), в рассматриваемом случае — судоводитель, и в процессе управления задействованы те или иные автоматические устройства. Такие системы называют также системами "человек—машина" (СЧМ) или, в рассматриваемом приложении, системой "судоводитель—судно" (ССС). По определению и по существующим техническим реализациям на морском и речном флоте СССР является автоматизированной системой. Например, в создании управляющих воздействий на исполнительный орган управления — руль — может принимать участие помимо судоводителя и автоматическое устройство — авторулевой, способный вести судно без участия ЧО по заданному им курсу.

Для судоводителя участие в управлении движением судна выражается в осуществлении целенаправленного процесса [1], повторяющиеся циклы которого включают следующие этапы: 1) получение информации о состоянии ССС 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.

Перечисленные этапы целенаправленного процесса для стадий исследования и моделирования взаимодействия технической и биологической частей СЧМ образуют три уровня управления, представляемые как целеуказание, планирование и исполнение [2]. Первые два этапа называют подготовкой решения по управлению, что соответствует целеуказанию, третий и четвертый этапы относятся к плани-

рованию управления, пятый этап — к исполнению управления.

Взаимодействию ЧО и управляющего автомата (УА) СЧМ в работах [3—5] поставлены в соответствие математические модели действий и ответных реакций человека и машины. Они предусматривают возможность реализации совместного управления объектом с помощью органов управления (ОрУ) аппаратов специального назначения в составе человеко-машинного интерфейса (ЧМИ).

Настоящее исследование совместного управления техническим объектом в СЧМ проведено авторами в приложении к ССС. Общая математическая модель действий и ответных реакций СЧМ, рассмотренная в работе [3], конкретизирована для ССС и использована на уровнях целеуказания и планирования антропоморфного управления [5] движением судна с учетом неопределенностей [6], сопровождающих процесс конструирования управления, что определяет новизну полученных в статье результатов. Известно, что порядка 75 % навигационных аварийных случаев происходит по причине человеческого фактора и связаны с уровнем подготовки судоводителя, ответственного за обеспечение безопасности судовождения, наличия у него требуемого практического опыта, навыков судовождения и управления судном [7]. Целью работы является рассмотрение вопросов аналитического конструирования совместного управления движением эгратической системы "судоводитель—судно", направленных на повышение безопасности судовождения.

### Построение множества неполных представлений элементарных движений системы "судоводитель—судно"

Основой описания СЧМ в пространстве состояний является множество  $Z$  неполных представлений элементарных движений, каждое из которых описывается нормальной системой обыкновенных дифференциальных уравнений. В векторно-матричной форме записи это множество имеет следующий вид [4]:

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

где  $F^r(X)$  — вектор-функция от вектора  $X$ , представляемого матрицей-столбцом фазовых координат  $x_1, x_2, \dots, x_N$  в  $(1 + N)$ -мерном

пространстве состояний  $\{t \times x_1 \times x_2 \times \dots \times x_N\}$ ;  $r$  — порядковый номер вектор-функции  $F^r(X)$  в множестве  $Z$ . Точка над буквой  $X$  обозначает применение операции дифференцирования фазовых координат по времени  $t$ .

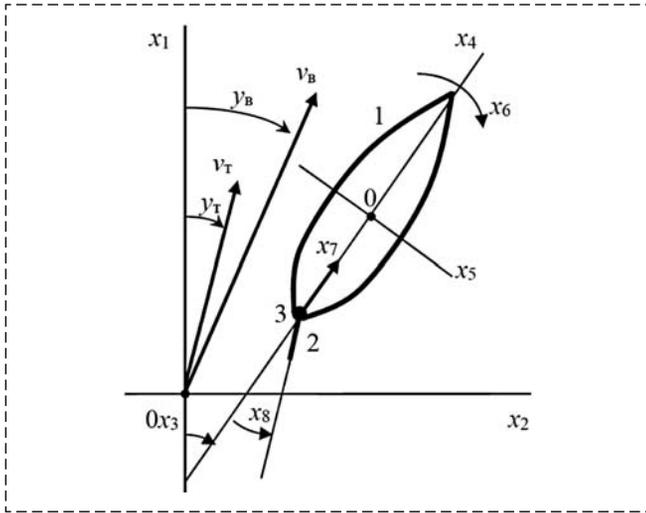
Построение множества  $Z$  неполных представлений  $\dot{X} = F^r(X)$ ,  $r = 1, 2, \dots$ , элементарных движений для базы знаний управляющего автомата ССС выполнено в соответствии с рис. 1 с использованием неподвижной  $0x_1x_2x_3$  и связанной с судном  $0x_4x_5x_6$  систем координат.

Фазовые координаты  $x_1, x_2, \dots, x_8$  ССС используются для ее описания в пространстве состояний  $\{t \times x_1 \times x_2 \times \dots \times x_8\}$  при  $N = 8$  с учетом значений упора  $x_7$  движителя, угла  $x_8$  перекладки руля и воздействий внешней среды, характеризующихся углом направления  $y_B$  и скоростью  $v_B$  ветра, а также углом направления  $y_T$  и скоростью  $v_T$  течения в месте расположения судна. Независимой переменной для траектории движения точки, изображающей состояние ССС в пространстве состояний, является время  $t$ .

В результате композиции уравнений динамики судна и действий судоводителя на основе модели МП (модели, реализуемой аппаратом непрерывного действия с многопозиционным органом управления) [3] получена нормальная система обыкновенных дифференциальных уравнений динамики ССС:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_4(t) \cos x_3(t) - x_5(t) \sin x_3(t) + s_1(t); \\ \dot{x}_2(t) &= x_4(t) \sin x_3(t) + x_5(t) \cos x_3(t) + s_2(t); \\ \dot{x}_3(t) &= x_6(t); \\ \dot{x}_4(t) &= a_{41}x_5(t)x_6(t) + a_{42}x_4^2(t) + \\ &+ (a_{43} + a_{44}x_4(t))(x_7(t) + x_8(t)) + a_{15}|s_4(t)|s_4(t); \\ \dot{x}_5(t) &= a_{51}x_4(t)x_6(t) + a_{52}x_4(t)x_5(t) + \\ &+ a_{53}|x_5(t)|x_5(t) + a_{54}x_4^2(t)x_9(t) + a_{55}|s_5(t)|s_5(t); \\ \dot{x}_6(t) &= a_{61}x_4(t)x_6(t) + a_{62}x_4(t)x_5(t) + \\ &+ a_{63}x_4^2(t)x_9(t) + a_{64}|s_5(t)|s_5(t); \\ \dot{x}_7(t) &= a_7\omega_1; \\ \dot{x}_8(t) &= a_8\omega_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Первые шесть уравнений системы (2) описывают движение корпуса судна на плоскости  $\{x_1 \times x_2\}$  в неподвижной системе координат  $0x_1x_2$  (рис. 1), последние два уравнения — положение органов управления движителем и рулем. Коэффициенты  $a_{ij}$  рассчитываются с учетом геометрических характеристик судна, его осадки, глубины судового хода и других параметров. Значения коэффициентов  $a_7$  и  $a_8$  конкретизируются



**Рис. 1.** Фазовые координаты  $x_1, x_2, \dots, x_8$  в задаче управления движением судна (1) с помощью руля (2) и движителя (3)  
**Fig. 1.** Phase coordinates  $x_1, x_2, \dots, x_8$  in the control problem of the movement of the vessel (1) by means of the rudder (2) and the propulsion system (3)

Таблица 1  
Table 1

Нумерация неполных представлений элементарных плоских движений судна в множестве  $Z$   
 Numbering of incomplete representations of elementary plane ship movements in the set  $Z$

$\omega_{ij}$	$\omega_2 = -1$	$\omega_2 = 0$	$\omega_2 = 1$
$\omega_1 = -1$	4	1	7
$\omega_1 = 0$	5	2	8
$\omega_1 = 1$	6	3	9

на основе экспериментальных данных и по рекомендациям инженерной психологии для конкретных аппаратов ЧМИ в ходовой рубке,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  принимают значения, приведенные в табл. 1.

Влияние течения воды и ветра на движение судна характеризуется возмущающими воздействиями:

$$\left. \begin{aligned} s_1(t) &= v_T(t) \cos y_T(t); \\ s_2(t) &= v_T(t) \sin y_T(t); \\ s_4(t) &= v_B(t) \cos(x_3(t) - y_B(t)) - \\ &- v_T(t) \cos(x_3(t) - y_T(t)) - x_4(t); \\ s_5(t) &= -v_B(t) \sin(x_3(t) - y_B(t)) + \\ &+ v_T(t) \sin(x_3(t) - y_T(t)). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Полное число попарно различных представлений элементарных движений в  $Z$ , заданном (1) для ССС, составляет  $R = 3^2 = 9$  [4]. Конкретизируем их с помощью системы (2) и табл. 1.

Выделение неполного представления элементарного движения из множества (1) осуществляется следующим образом. Допустим, что требу-

ется выделить элемент множества  $Z$  с номером 3. Тогда для ячейки табл. 1, содержащей номер 3, определяем: по горизонтали  $\omega_1 = 1$ , по вертикали  $\omega_2 = 0$ . Найденные таким образом значения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  подставляем в систему уравнений (2) и получаем математическую модель неполного представления элементарного движения изображающей точки по траектории в пространстве состояний ССС с номером 3.

Номера элементов множества  $Z$  в табл. 1 могут быть проставлены произвольным образом. Полное число попарно различных сигналов дискретного (антропоморфного) управления  $D_{r-p}$ , переключающего  $F^r(X)$  на  $F^p(X)$  из множества (1) при  $p \neq r$  [3, 5] для  $R = 9$  равно  $9 \cdot (9-1) = 72$ .

Модель (2), (3) и, соответственно, множество  $Z$  могут быть трансформированы применительно к судну с двумя независимо работающими движителями и одним рулем путем добавления фазовой координаты, например  $x_9$ , характеризующей положение органа управления упором второго движителя [8]. В таком случае множество  $Z$  увеличится до  $R = 3^3 = 27$  попарно различных неполных представлений элементарных движений, а число возможных попарно различных сигналов дискретного управления возрастет до  $27 \cdot (27-1) = 702$ . Задать (пронумеровать) элементы множества  $Z$  можно с помощью таблицы, расширив табл. 1 до 27 элементов. Аналогичным образом, увеличив число фазовых координат до 10, можно построить множество  $Z$  для судов с двумя движителями и двумя независимо действующими рулями. В этом случае получим  $R = 81$  и, соответственно, 6480 возможных попарно различных сигналов дискретного управления движением судна. Аналогичным образом можно осуществить построение множества  $Z$  неполных представлений элементарных движений судна для более сложных ССС. Отсюда следует, что рассмотренный подход к построению множества  $Z$  является универсальным.

### Конструирование совместного управления судном на множестве неполных представлений элементарных движений

Задача конструирования управления движением судна на уровне целеуказания решается путем построения последовательности неполных представлений элементарных движений из множества  $Z$ . В конкретных случаях может

быть использована только часть представлений из  $Z$ , выделенных, например, по экспертным оценкам судоводителей. С помощью экспертных оценок задача упрощается еще в большей степени введением в базу знаний прецедентов [6], используемых в качестве шаблонов управления [9–11]. Каждый шаблон совместного (антропоморфного) управления построен на основе нескольких неполных представлений элементарных движений, расположенных в определенной последовательности. Ему соответствует интегрированная цель движения, например, перемещение судна из одной позиции в другую позицию с обходом препятствия.

Выделение шаблонов управления актуализируется с увеличением числа органов управления ЧМИ, через которые можно оперативно воздействовать на движение судна. Уже при трех  $OpU$  ( $R = 27$ ) у судоводителя возникают затруднения в ручном управлении движением судна. Поэтому в помощь судоводителям на основе научных методов и опыта эксплуатации судов разрабатывались рекомендации судоводителям, а по существу, аналоги шаблонов антропоморфного управления для различных ССС и ситуаций [12].

Совместное управление движением судна предполагает использование в составе ЧМИ ходовой рубки аппаратов нового типа [3–5], с помощью которых реализуются сигналы дискретного управления, в том числе в шаблонах антропоморфного управления. Для ССС с моделью (2), (3) и табл. 1 формирование управляющих воздействий проводится с помощью аппаратов совместного управления  $ApCU1$  и  $ApCU2$ , показанных на рис. 2.

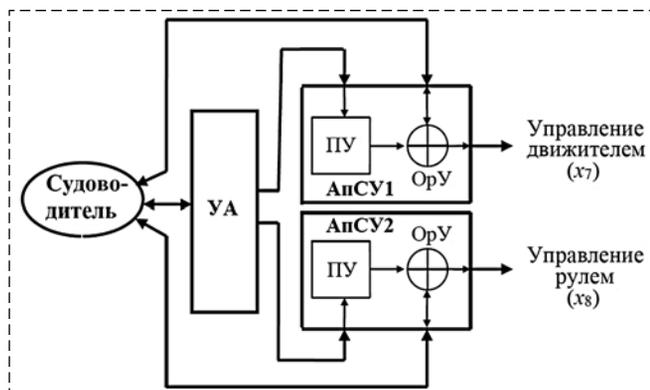


Рис. 2. Структурная схема системы формирования управления движением судна по двум каналам с использованием аппаратов совместного управления  $ApCU1$  и  $ApCU2$

Fig. 2. Block diagram of the system for forming the control of the ship's movement through two channels using the joint control devices  $ApSU1$  and  $ApSU2$

В каждом из  $ApCU1$  и  $ApCU2$  предусмотрен  $OpU$ , перемещаемый судоводителем непосредственно мускульным усилием и управляющим автоматом  $УА$  с помощью приводного устройства  $ПУ$ . Благодаря  $OpU$  происходит совмещение (в рассматриваемом случае покоординатное сложение) управляющих воздействий на  $OpU$ , вырабатываемых судоводителем и  $УА$ . Если на судне два движителя, то число аппаратов совместного управления увеличится до трех, либо останется неизменным, как показано на рис. 2, в случае использования в аппарате  $OpU$ , например, двух степеней подвижности для создания независимых воздействий на каждый из двух движителей. Возможно также применение двух джойстиков в качестве  $OpU$  с двумя степенями подвижности в ЧМИ судна с независимо управляемыми двумя движителями и двумя рулями. Как было показано, в этом случае может быть реализовано до 6480 различных сигналов дискретного управления движением судна, создаваемых судоводителем и  $УА$ . Намерения  $УА$  передаются судоводителю через  $OpU$ .

Для решения практических задач построено описание оптимального по быстродействию перемещения судна от причальной стенки в камеру шлюза. Продольное движение судна при отсутствии возмущающих воздействий (3) выполняется при  $x_3(t) = 0$  на всем времени движения. Поэтому достаточно выбрать из множества  $Z$  только элементы среднего столбца табл. 1 при  $\omega_2 = 0$ . Оптимальное по выбранному критерию антропоморфное управление дискретными сигналами через  $ApCU1$  (рис. 2) реализуется на 11 элементарных движениях [4] и определяется отображением множества  $S = \{1, 2, \dots, 11\}$  натуральных чисел на множество  $R = \{1, 2, 3\}$  номеров  $r$  элементов множества  $Z$  при  $\omega_2 = 0$  в соответствии с верхними двумя строками табл. 2 (в табл. 2 ячейки последней строки сдвинуты, чтобы показать, что моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_{10}$  "разделяют" элементарные движения, записанные в ячейках строк выше).

Из приведенного в табл. 2 примера для судна с одним движителем видно, что кроме неполных представлений элементарных движений и их номеров  $r \in R$  в базу знаний целесообразно поместить прецеденты в виде повторяющихся последовательностей  $\{2-1-2\}$  и  $\{2-3-2\}$ , первая из которых определяет режим снижения скорости судна путем уменьшения упора движителя, а вторая — увеличение скорости при увеличении упора движителя. Соответ-

ствующие шаблоны управления предусматривают реализацию двух сигналов дискретного управления  $\{D_{2-1}, D_{1-2}\}$  и  $\{D_{2-3}, D_{3-2}\}$ , последовательно создаваемых УА.

На уровне планирования антропоморфного управления движением судна решается задача определения моментов времени реализации сигналов дискретного управления [9]. Формально планирование можно рассматривать исходя из приведенного примера как заполнение в табл. 2 нижней строки значениями моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_{10}$ , где индекс в обозначении каждого момента времени соответствует номеру  $s$  интервала времени исполнения элементарного движения. Значения моментов времени действия сигналов дискретного управления определяются путем решения задачи математического программирования при дифференциальных связях переменных состояния ССС. На основании исследования задачи максимального быстродействия, проведенного в работе [9], на рис. 3 приведена программа оптимального по быстродействию управления в традиционном представлении в виде функции времени. Для каждого интервала зависимости  $x_7$  от  $t$  по вертикали проставлен номер  $r \in \mathbf{R}$  неполного представления элементарного движения из множества  $\mathbf{Z}$ .

Из выполненного конструирования антропоморфного управления следует, что на уровне целеуказания последовательности элементарных движений судна и соответствующих сигналов дискретного управления, отображенных табл. 2, можно отнести к прецедентам и рассматривать в качестве шаблонов управления. Они обладают свойством инвариантности к расстоянию, на котором осуществляется движение судна (если расстояние больше некоторого определенного значения), поэтому достаточно универсальны, в частности, для технологического процесса шлюзования судна. На уровне планирования антропоморфного управления говорить об инвариантности шаблона не приходится, поскольку становятся известными моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_{10}$ .

Программе управления двигателем (рис. 3) соответствует некоторая траектория движения судна. Для уровня планирования положение

Таблица 2  
Table 2

Задание последовательности представлений элементарных движений судна при вводе судна в шлюз

*Setting the sequence of representations of elementary movements when entering the ship into the lock*

$s \in \mathbf{S}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
$r \in \mathbf{R}$	2	3	2	1	2	1	2	1	2	3	2	
$t_s$		$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	

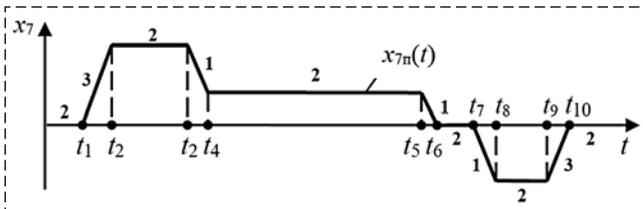


Рис. 3. Пример программы оптимального по быстродействию управления двигателем судна

Fig. 3. Example of a program for optimal speed control of the ship's propulsion system

центра масс судна ( $x_1$ ) и скорости движения ( $x_4$ ) иллюстрируются графиками, представленными на рис. 4. Эти графики отображают траекторию движения судна в подпространстве состояний  $\{t \times x_1 \times x_4\}$  и ее проекции на координатные плоскости  $\{t \times x_1\}$ ,  $\{t \times x_4\}$ ,  $\{x_1 \times x_4\}$  [9].

Графики, представленные на рис. 3 и рис. 4, отображают программное движение судна  $X_n(t)$  и программу  $x_{7n}(t)$  управления перемещением органа управления ЧМИ без учета сигнальной неопределенности по параметрам  $v_B, v_B$  ветра,  $u_T, v_T$  течения (см. рис. 1), параметрической неопределенности модели плоского движения судна и координатной неопределенности вследствие погрешностей измерений. Поэтому построенную таким образом программную

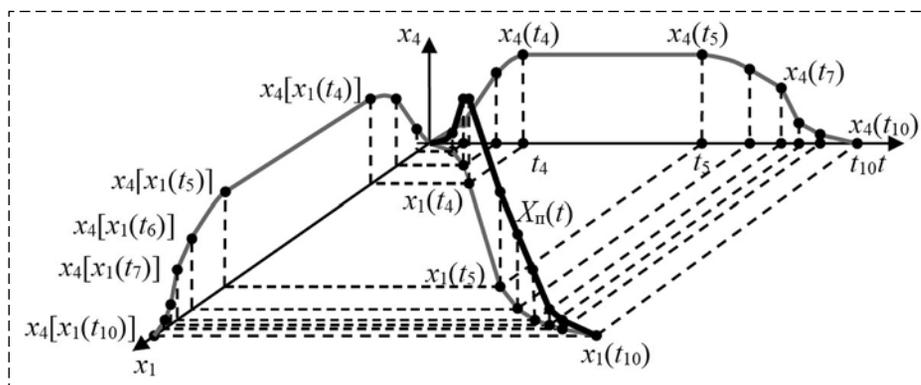


Рис. 4. Пример фрагмента траектории перемещения центра масс судна в проекциях на координатные плоскости пространства состояний

Fig. 4. Example of a fragment of the trajectory of the ship's center of mass movement in projections on the coordinate planes of the state space

траекторию изменения состояния ССС можно рассматривать как первое приближение в решении задачи конструирования антропоморфного управления движением судна.

### Планирование управляемого движения судна с учетом неопределенностей

Анализ значений коэффициентов модели (2) на примере судна типа Волго-Дон показал, что их значения изменяются в зависимости от осадки судна. При известной осадке судна основную параметрическую неопределенность в значениях коэффициентов уравнений (2) создает глубина судового хода, которая может изменяться в зависимости от текущего местоположения судна, особенно для судов внутреннего плавания. Наибольшие интервалы неопределенности имеют коэффициенты  $a_{42}$ ,  $a_{51}$ . Например, параметрическая интервальная неопределенность (ПИН) коэффициента  $a_{42}$  ( $\text{м}^{-1}$ ) при осадке судна, равной 3,5 м, составляет  $[a_{42}] = [-2,57 \cdot 10^{-3}, -2,39 \cdot 10^{-3}]$  при номинальном значении  $a_{42} = -2,48 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ , а при осадке судна 1,5 м имеем  $[a_{42}] = [-1,29 \cdot 10^{-3}, -1,03 \cdot 10^{-3}]$  при номинальном значении  $a_{42} = -1,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ . Из приведенных данных следует, что априорная информация об осадке судна позволяет снизить ПИН  $a_{42}$  в 6 раз.

Достаточно часто ССС не располагает при планировании управляемого движения судна точной априорной информацией о глубине судового хода. Поэтому актуальна задача конструирования антропоморфного управления движением судна с учетом параметрических неопределенностей, зависящих от глубины по маршруту следования судна. Требуется также учитывать сигнальные неопределенности в угле направления  $y_{\text{в}}$  и скорости  $v_{\text{в}}$  ветра, угле направления  $y_{\text{т}}$  и скорости  $v_{\text{т}}$  течения в месте расположения судна. Соответствующие интервалы неопределенностей могут быть определены по метеопрогнозу и карте течений, а также использованы при планировании совместного управления движением судна.

Процедуры оценки точности прогнозирования состояния технической части

СЧМ с использованием интервальных представлений неопределенностей приведены в работе [6]. Для рассматриваемого случая управления продольным движением судна применима процедура построения прямоугольника координатных неопределенностей (ПKN) для каждого программного значения момента действия СДУ (учитывается, что ошибка в задании положения  $x_{7\text{п}}(t)$  органа управления упором пренебрежительно мала). На рис. 5 приведена иллюстрация интервальных координатных неопределенностей в виде затемненных фигур ПKN для программной траектории  $X_{\text{п}}(t)$ , показанной с помощью проекций на рис. 4 и рис. 5.

Каждый ПKN определяется путем сложения по осям  $\{x_1\}$  и  $\{x_4\}$  интервалов, получаемых в результате интегрирования системы дифференциальных уравнений из множества  $\mathbf{Z}$  на соответствующем интервале времени элементарного движения ССС. Учитываются начальные значения фазовых координат каждой границы интервалов координатной, сигнальной и параметрической неопределенностей. Суммирование интервалов проводится по правилам интервальной математики. Поэтому сумма интервалов есть интервал, представленный на рис. 5 в виде соответствующей стороны ПKN.

По анализу проекций траектории  $X_{\text{п}}(t)$  и прямоугольников неопределенностей на координатную плоскость  $\{x_1 \times x_4\}$  делается заключение о том, приведет ли программное управление  $x_{7\text{п}}(t)$  (см. рис. 3) к недопустимым отклонениям движения судна от расчетной траектории. Для увеличения точности позиционирования судна на уровне исполнения движения следует использовать принцип обратной связи и осуществлять измерения фазовых координат.

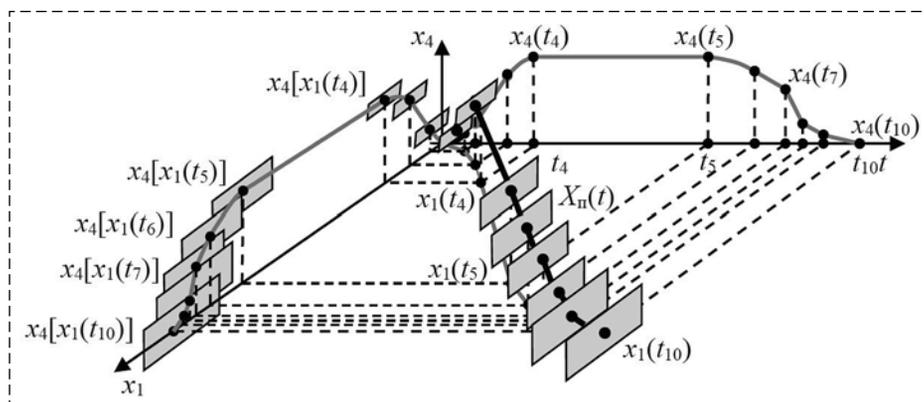


Рис. 5. Иллюстрация интервальных неопределенностей на фрагменте траектории перемещения центра масс судна

Fig. 5. Illustration of interval uncertainties on a fragment of the trajectory of the ship's center of mass movement

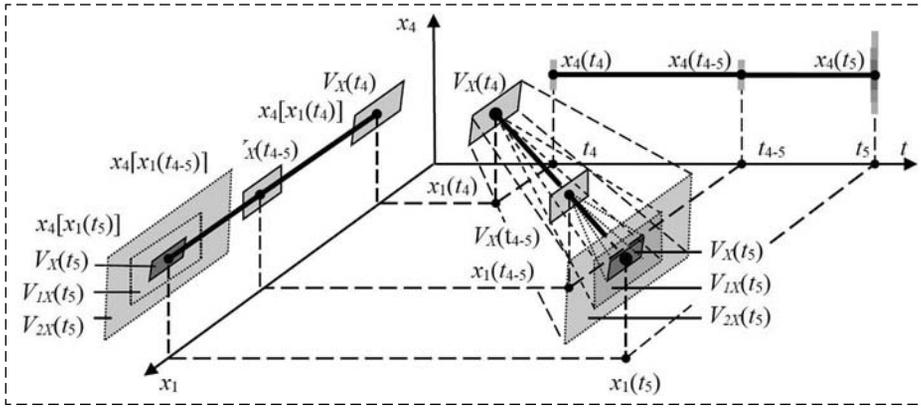


Рис. 6. Иллюстрация приема уменьшения координатной неопределенности по результатам измерений фазовых координат и использования шаблонов корректирующего управления  
 Fig. 6. Illustration of the method of reducing the coordinate uncertainty based on the results of phase coordinate measurements and the use of correction control templates

Вместе с тем, на уровне планирования можно оперировать лишь априорными неопределенностями. Обратимся к рис. 6. Рассмотрим элементарное движение  $X_n(t)$ , например, на интервале  $[t_4, t_5]$ . На левом конце интервала при  $t = t_4$  координатная неопределенность характеризуется прямоугольником  $V_X(t_4)$ . Эта неопределенность, а также сигнальная и параметрическая неопределенности исходной (номинальной) модели ССС позволяют получить оценку координатной неопределенности  $V_{2X}(t_5)$  на правом конце рассматриваемого интервала при  $t = t_5$  по результатам интегрирования систем дифференциальных уравнений элементарного движения.

Допустим, что проводятся измерения фазовых координат  $x_1, x_4$  к моменту  $t = t_4$ , и ошибки оценок фазовых координат пренебрежимо малы. По результату измерений можно предположить, что прямоугольник  $V_X(t_4)$  сожмется в точку. При этом ПКН  $V_{2X}(t_5)$  трансформируется в  $V_{1X}(t_5)$  и, очевидно, что  $V_{2X}(t_5) \supset V_{1X}(t_5)$ . Неопределенность на правом конце интервала  $[t_4, t_5]$  уменьшится (в крайнем случае не изменится). В каком месте на ПКН  $V_{2X}(t_5)$  находится меньший по площади ПКН  $V_{1X}(t_5)$  ("пятно" на  $V_{2X}(t_5)$ ) — не известно, так как измерения и оценки фазовых координат фактически не осуществлялись на уровне планирования. Тем не менее, по "величине"  $V_{1X}(t_5)$  принципиально возможно сделать заключение о том, допустима или нет координатная неопределенность  $V_{1X}(t_5)$  для планирования дальнейшей (при  $t > t_5$ ) части траектории  $X_n(t)$ . Если неопределенность  $V_{1X}(t_5)$  допустима, то анализ неопределенностей продолжается аналогичным образом для следующего интервала времени  $[t_5, t_6]$  (см. рис. 5), и ПКН  $V_{1X}(t_5)$  принимается в качестве априорной

неопределенности при  $t = t_5$  для левого конца интервала  $[t_5, t_6]$ .

Предположим теперь, что неопределенность  $V_{1X}(t_5)$  больше допустимой. Тогда, следуя принципу обратной связи, целесообразно предусмотреть дополнительное терминальное управление на интервале времени  $[t_4, t_5]$ , уменьшающее  $V_{1X}(t_5)$ . Априори на уровне планирования конкретный вид дополнительного управления определить нельзя, но можно задать (рассчитать)

начало его действия, например, при  $t = t_{4.5}$ , как это видно из рис. 6. Для рассматриваемого движения судна в качестве такого управления можно было бы выбрать в зависимости от результатов измерений  $x_1, x_4$  шаблон 2-1-2 из табл. 2, снижающий скорость движения, или шаблон 2-3-2, увеличивающий скорость движения судна. Благодаря измерениям фазовых координат в момент  $t = t_{4.5}$  ПКН  $V_X(t_{4.5})$  "стянется" в точку при  $t = t_{4.5}$ . В результате  $V_{1X}(t_5)$  трансформируется до  $V_X(t_5)$ .

Таким образом, неопределенность реакции судна на антропоморфное управление можно уменьшить, предусмотрев дополнительные терминальные управления, построенные на элементах множества  $Z$ . Описанный прием согласуется с предложением академика Б. Н. Петрова и его коллег по использованию апостериорно формируемой программы управления движением в условиях неопределенности [11].

Отметим отличие в результатах применения дополнительного терминального управления движением судна от автоматического управления с помощью управляющей скоростью судна системы, которую можно назвать традиционной в том смысле, что ее синтез осуществляется без учета программного движения судна во времени [1]. Традиционная система управления в рассматриваемом случае представляет собой систему стабилизации скорости. Ошибка стабилизации интегрируется по времени, что приводит к увеличению со временем отклонения пути, пройденного судном, от программного значения в каждый текущий момент времени. На практике это приведет к отклонению от расписания движения. Во избежание этого судоводитель изменяет уставку скорости путем перемещения

органа управления ЧМИ, осуществляя тем самым дополнительное терминальное управление. Например, на интервале  $[t_4, t_5]$  (рис. 6) судоводителем может быть реализовано несколько дополнительных сигналов дискретного управления указанных шаблонов из такого расчета, чтобы в момент  $t_5$  судно оказалось в нужном, определенном на уровне планирования месте и двигалось с расчетной программной скоростью. Например, судно подходит к шлюзу к заданному времени начала шлюзования с требуемой скоростью. Если рассматривать траектории движения изображающей точки в пространстве состояний, то скорректированное движение при антропоморфном управлении будет в максимальной степени приближаться к программному управлению в окрестностях угловых точек, определенных при планировании движения.

### Заключение

Процесс конструирования совместного управления объектом эргатической СЧМ показан в решении практической задачи целеуказания и планирования плоского движения судна с учетом сигнальной, параметрической и координатной неопределенностей.

На начальном этапе построены множества неполных представлений элементарных движений в пространстве состояний на основе модели действий судоводителя и ответных реакций судна, представленной в математической форме. Множества неполных представлений элементарных движений конкретизированы для различных судов в зависимости от числа движителей и рулей, установленных на судне, и даны оценки числа элементов множества и максимального числа сигналов дискретного (антропоморфного) управления плоским движением судна.

Для уровня целеуказания синтезирована последовательность элементарных движений судна при вводе в шлюз от причальной стенки, представляемая в математической форме в виде нормальных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Выделены шаблоны управления в виде последовательностей из нескольких дискретных сигналов управления, повторяемых на времени ввода судна в шлюз.

Предложен способ учета сигнальной, параметрической и координатной неопределенностей при планировании управляемого движения судна и уменьшения неопределенностей на основе при-

менения принципа обратной связи с виртуальными измерениями фазовых координат в предположении малости ошибок измерений. Наглядная иллюстрация учета неопределенностей осуществлена с помощью построения прямоугольников неопределенностей в подпространстве состояний с применением интервальной математики.

Для выработки подхода к совершенствованию априорной программы управления движением судна, приводящего к апостериорно формируемой программе с дополненными элементарными движениями по шаблонам управления, использован анализ действий судоводителей по результатам натуральных экспериментов на шлюзе. В этой части планирования управляемого движения судна разработанные предложения по коррекции программы относятся лишь к продольному движению судна, поскольку они основаны только на опыте судовождения, проявленном в натуральных экспериментах ввода судов в камеру шлюза.

### Список литературы

1. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судов. М.: Транслит, 2007. 376 с.
2. Ющенко А. С. Человек и робот — совместимость и взаимодействие // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1 (2). С. 4—9.
3. Saushev A., Tyrva V., Kovtun L. Joint control actions on electromechanical devices in ergatic systems // E3S Web Conf., Volume 135, 2019 Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019), E3S Web of Conferences 135, 01006 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501006>.
4. Тырва В. О., Саушев А. В. О реализации совместимых управляющих воздействий на объект в системах "человек-машина" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. № 21(5). С. 274—281.
5. Tyrva V. O., Saushev A. V., Shergina O. V. Anthropomorphic Control over Electromechanical System Motion: Simulation and Implementation // Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon. 2020. P. 374—379.
6. Тырва В. О. Моделирование действий и ответных реакций эргатической системы с электромеханическим объектом управления // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12, № 1. С. 189—201.
7. Шерстюк В. Г., Бень А. П. Гибридная интеллектуальная СППР для управления судном // Искусственный интеллект. 2008. № 3. С. 490—499.
8. Тырва В. О. Автоматизация эргатической системы "человек-машина" на основе применения в ней антропоморфного управления // Автоматизация в промышленности. 2021. № 2. С. 3—7.
9. Cooper A., Reimann R., Cronin D. AboutFace 3. The Essentials of Interaction Design. Wiley Publishing, Inc., 2007. P. 1—6.
10. Raskin J. The humane interface: new directions in the design of computer systems. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. New York, NY, United States. 233p.
11. Сергеев С. Ф. Методологические проблемы человеко-машинного интерфейса // XII Всероссийское совещание по проблеме управления ВСПУ-2014. Москва 16-19 июня 2014 г. Сб. трудов ВСПУ. 2014. С. 6414—6421.
12. Шанчуров П. Н., Соларев Н. Ф., Щепетов И. А. Управление судами и составами. М.: Транспорт, 1971. 352 с.

# Analytical Approach to the Design of Joint Motion Control of the Ergatic System "Skipper-Ship"

V. O. Tyrva, Professor, v.tyrva@mail.ru, A. V. Saushev, Head of the Department, saushev@bk.ru, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation

Corresponding author: Tyrva V. O., Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: v.tyrva@mail.ru

Accepted on May 29, 2021

## Abstract

The article deals with the problem of designing a joint control of the movement of a water transport object — the ergatic system "ship-to-ship". Joint motion control is presented in mathematical form on the basis of the model of actions and responses of the human operator and the machine, adopted in engineering psychology for the "human-machine" systems. The model is formalized by composing mathematical models of the plane motion of the ship and the movements of the controls of the propellers (propellers) and rudders of the ship. For the ship's human-machine interface, it is proposed to use a new type of apparatus, with the help of which the control actions on the control body from the boatmaster and the control automaton of the ergatic system are combined.

For the mathematical description of virtual signals of discrete control in solving problems of target designation and planning, a method for constructing a set of incomplete representations of elementary movements in the state space of the "skipper-ship" system is proposed. The numerical estimates of pairwise different representations of elementary movements and discrete control signals that implement transitions from one elementary movement to another by influencing the propellers and rudders of the ship using the ship's human-machine interface controls are obtained.

In order to unify the anthropomorphic control of ship movement at the target designation and planning levels, it is proposed to use templates from several discrete control signals, based on the experience of navigation and solving mathematical programming problems. The solution of the practical problem of optimal anthropomorphic control of the vessel movement from the mooring wall to the lock chamber is obtained, which provides for the implementation of a sequence of ten discrete control signals and two control templates. A method is proposed for estimating the influence of signal, parametric, and coordinate uncertainties on the position of the image point in the state space of the "su-driver-ship" system relative to the nominal trajectory of the program motion. The regions of interval representations of uncertainties in the subspace of the ship's "time-position-speed" states are obtained. The procedure for correcting the a priori description of nominal anthropomorphic control is considered on the basis of control patterns and analysis of rectangles of uncertainty in the subspace of states of the "skipper-ship" system.

**Keywords:** ergatic system, control, state space, model, planning, uncertainty, ship

For citation:

Tyrva V. O., Saushev A. V. Analytical Approach to the Design of Joint Motion Control of the Ergatic System "Skipper-Ship", *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 9, pp. 459–467.

DOI: 10.17587/mau.22.459-467

## References

1. Vagushchenko L. L., Tsybmal N. N. Systems of automatic control of the movement of ships, Moscow, TransLit, 2007, 376 p. (in Russian).
2. Yushchenko A. S. Man and robot-compatibility and interaction, *Robotics and Technical Cybernetics*, 2014, no. 1 (2), pp. 4–9 (in Russian).
3. Saushev A., Tyrva V., Kovtun L. Joint control actions on electromechanical devices in ergatic systems, E3S Web Conf., Volume 135, 2019 Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019), E3S Web of Conferences 135, 01006 (2019), DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501006>.
4. Tyrva V. O., Saushev A. V. On the implementation of combined control actions on the object in the systems "man-machine", *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, no. 21(5), pp. 274–281 (in Russian).
5. Tyrva V. O., Saushev A. V., Shergina O. V. Anthropomorphic Control over System Electromechanical Motion Simulation and Implementation, *Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020*, pp. 374–379.
6. Tyrva V. O. Modeling of actions and responses of an ergatic system with an electromechanical control object, *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 189–201 (in Russian).
7. Sherstyuk V. G., Ben A. P. Hybrid intellectual DSS for ship control, *Artificial Intelligence*, 2008, no. 3, pp. 490–499 (in Russian).
8. Tyrva V. O. Automation of the ergatic system "man-machine" on the basis of the application of anthropomorphic control in it, *Automation in Industry*, 2021, no. 2, pp. 3–7 (in Russian).
9. Cooper A., Reimann R., Cronin D. AboutFace 3. The Essentials of Interaction Design, Wiley Publishing, Inc., 2007, pp. 1–6.
10. Raskin J. The humane interface: new directions in the design of computer systems, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. New York, NY, United States, 233 p.
11. Sergeev S. F. Methodological problems of human-machine interaction, *XII All-Russian meeting on the problem of VSPU management-2014*. Moscow, June 16–19, 2014, VSPU Proceedings Collection, 2014, pp. 6414–6421 (in Russian).
12. Shanchurov P. N., Solarev N. F., Shchepetov I. A. Management of ships and trains, Moscow, Transport, 1971, 352 p. (in Russian).