



АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ЧЕЛОВЕК-МАШИНА» НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ В НЕЙ АНТРОПОМОРФНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.О. Тырва (Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова)

Изложены результаты теоретико-экспериментального исследования управления объектом в эргатической системе «человек-машина», названного авторами антропоморфным управлением, так как оно является составной частью совместного управления объектом во времени со стороны человека-оператора и управляющего автомата. Предложена процедура моделирования управляемых процессов в пространстве состояний системы на базе множества неполных представлений элементарных движений, построенных на основе модели действий и ответных реакций человека-оператора и машины, принятой в инженерной психологии. На основе решения классической задачи максимального быстродействия сконструировано антропоморфное управление движением судна в условиях повышенной опасности. Рассмотрены вопросы автоматизации системы «человек-машина» с применением в составе человеко-машинного интерфейса новых по принципу действия аппаратов совместного управления.

Ключевые слова: система «человек-машина», управление, модель, представление движения, эргатическая система.

Введение

Исходным основанием для проведения исследований в направлении, указанном в названии статьи, явились результаты обработки информации, полученной в натурных экспериментах с судами — объектами водного транспорта. Эргатическая система «судоводитель-судно» рассматривалась в связи с потребностью повысить пропускную способность судоходных шлюзов за счет ускорения ввода судов в камеру шлюза и вывода из шлюза. В экспериментах изучались ручное управление движением судна, мнения и пожелания судоводителей более чем 20 судов. Изучались также возможности реализации оптимального по быстродействию управления движением, полученного в результате решения классической задачи оптимального управления с использованием математической модели управляемого движения судна. Результаты проведенного исследования доложены на научно-практических конференциях и опубликованы в виде статей, часть из которых приведена в прилагаемом списке. В данной статье конкретизированы новые результаты проведенного исследования и рассмотрены актуальные направления его продолжения.

Методы и результаты

Новым предлагаемым направлением автоматизации системы «человек-машина» (СЧМ) является применение управляющего автомата (УА) и человеко-машинного интерфейса (ЧМИ), с помощью которых реализуется совместное управление объектом СЧМ, когда и человек-оператор (ЧО), и УА совмест-

но и, возможно, одновременно воздействуют на объект через орган управления аппарата ЧМИ. Предложены конструкции таких аппаратов дискретного и непрерывного действия и построены математические модели их действия [1]. Автоматом СЧМ при совместном управлении реализуется так называемое антропоморфное управление. Оно конструируется на множестве неполных представлений элементарных движений в пространстве состояний СЧМ. При моделировании антропоморфного управления использованы подходы к описанию управляемых процессов из нескольких научных направлений:

- метод пространства состояний из теории оптимального управления (Л. С. Понтрягин);
- неполное представление движений из механики управляемого тела (Г. В. Корнев);
- модель действий и ответных реакций человека-оператора и машины из инженерной психологии (В. Г. Денисов, В. Ф. Онищенко);
- совмещение намерений и действий через органы управления ЧМИ из проектирования взаимодействия (А. Купер).

При совместном управлении в СЧМ антропоморфное управление со стороны УА воспринимается человеком через орган управления ЧМИ как намерение УА выполнить управляющее действие. При этом УА действует так, как действовал бы ЧО, перемещая орган управления, например, не быстрее и не медленнее, без рывков и т. п. Поэтому ЧО понимает намерения УА и может соглашаться с ним, тогда управляющее воздействие будет исходить от УА, либо не соглашаться с УА,

тогда управляющее воздействие будет исходить от ЧО через тот же орган управления. Приоритет в управлении объектом отдается человеку. Если по какой-либо причине ЧО отвлекается от управления, то УА продолжает управлять объектом в соответствии со своими намерениями, заранее сообщенными человеку. В другом случае, если УА по мнению ЧО выказывает неправильные намерения или оказывается неспособным управлять, то ЧО, продолжая совершать свои управляющие воздействия, осуществляет ручное управление объектом СЧМ. Такие возможности достигаются за счет конструирования антропоморфного управления на основе базисной модели совместного управления в форме (1).

В отличие от исходного математического представления управления в виде функции времени, явный вид которой определяется, например, в результате решения классической задачи оптимального управления, базисом конструирования антропоморфного управления является конечное множество (1) неполных представлений элементарных движений в пространстве состояний СЧМ. Основой для построения этого множества является модель действий и ответных реакций ЧО и машины. Элементы множества кроме информации о фазовых координатах объекта содержат сведения о состоянии реальных или виртуальных органов управления ЧМИ. Каждый элемент множества представляет элементарное движение машины СЧМ в едином для всех элементарных движений пространстве состояний, чем открывается принципиальная возможность моделирования деятельности СЧМ на всем этапе жизненного цикла СЧМ. Поэтому для ЧО (пользователя ЧМИ) упрощается конструирование управления совместно с УА на всех трех уровнях, описанных А. С. Ющенко для мехатронных систем — уровнях целеуказания, планирования, исполнения [2].

На уровне целеуказания конечное множество

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

из R неполных представлений элементарных движений

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

является источником 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 которых:

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

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

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

Заметим, что на уровне целеуказания построение последовательности (3) сигналов дискретного управления (4) на интервале времени $(t_1 - \Delta t, t_f + \Delta t)$ при достаточно малом значении Δt формально выражается в определении отображения последовательности натуральных чисел $1, 2, \dots, f$ на множество натуральных чисел $1, 2, \dots, R$. Примером интерпретации такого отображения является последовательность: двигаться прямо (1→3), затем повернуть направо (2→1), затем снова двигаться прямо по новому направлению (3→3), повернуть налево (4→2), снова прямо (5→3), опять повернуть налево (6→2). Имеем шесть СДУ ($f=6$) на интервале времени $(t_1 - \Delta t, t_6 + \Delta t)$ как отображение последовательности чисел (нумерованных моментов действия СДУ) $1, 2, \dots, 6$ на множество чисел $\{1, 2, 3\}$ (нумерованных элементарных движений при $R=3$). Неполнота представлений движения заключается в том, что остаются неизвестными моменты времени t_1, t_2, \dots, t_6 .

Значения моментов времени t_1, t_2, \dots, t_f для последовательности (3) определяются на уровне планирования управления. Обычно известными являются значения фазовых координат в начальный момент времени t_1 . Тогда управляемое изменение состояния СЧМ можно представить в виде движения изображающей точки по непрерывной траектории в пространстве состояний $\{t \times x_1 \times x_2 \times \dots \times x_N\}$ на интервале времени $[t_1, t_f + \Delta t)$. Траектория определяется в результате интегрирования дифференциальных уравнений (2) в последовательности, определенной условием (3), и стыковки решений в моменты t_2, t_3, \dots, t_f действия СДУ (4). Разработаны процедуры расчета на ЭВМ моментов времени t_2, t_3, \dots, t_f как решения задач их оптимизации [3] в форме аналогов задач Лагранжа, Майера, Больца и задачи на быстродействие, описанных Н. Н. Моисеевым в [4]. Решение задачи оптимизации t_2, t_3, \dots, t_f может производиться с применением градиентного метода вычислений как в полном объеме на ЭВМ, так и в диалоговом режиме взаимодействия ЧО с ЭВМ, например, с учетом интервальных неопределенностей [5]. В оптимизируемом антропоморфном управлении могут быть учтены ограничения и цели, неформализуемые в классической теории оптимального управления, например, требования к надежности управления объектом.

На уровне исполнения управления в условиях неопределенности возможна реализация последовательности сигналов дискретного управления на основе решения задачи синтеза, выраженного в построении поверхностей переключения в пространстве состояний по Н. Н. Моисееву [4], или (и) с применением метода апостериорного формирования программы с измененной последовательностью СДУ, как пред-

ложено Б. Н. Петровым для задач управления в теории бортовых терминальных систем [6]. Тем самым осуществляются переходы с уровня исполнения на уровень планирования или даже на уровень целеуказания и в обратном направлении на уровень исполнения управления [7].

По результатам упомянутых экспериментов по изучению управляемых движений судов [8] для уровня целеуказания применительно к задаче антропоморфного управления вводом двухвинтового судна в камеру шлюза получено множество (1) неполных представлений движения, состоящее из девяти элементов ($R=9$). Представим это множество в пятимерном пространстве состояний с помощью нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, раскрыв выражение (2) в виде:

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

и пронумеровав элементы множества с помощью таблицы 1.

Например, чтобы получить представление движения под номером 3 нужно из таблицы 1 в систему дифференциальных уравнений (5) вместо ω_1 подставить 0 и вместо ω_2 подставить 1.

В системе уравнений (5) фазовая координата x_1 определяет текущее местоположение судна при его продольном движении; x_2 — скорость движения, x_3, x_4 — упоры движителей (винтов); ω_1, ω_2 — относительные значения скоростей перемещения органов управления гребными двигателями; a_1, a_2, a_3, b — постоянные величины, зависящие от типа судна, его осадки и условий плавания.

Последовательность неполных представлений элементарных движений и соответствующая последовательность ДСУ для ввода судна от причальной стенки в камеру шлюза при ограничении скорости движения получена на основе предварительного решения классической задачи оптимального по быстродействию управления и преобразования этого решения к антропоморфному управлению. Учитывались неформализуемые в классической задаче опти-

Таблица 1. Нумерация элементов множества неполных представлений элементарных движений

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

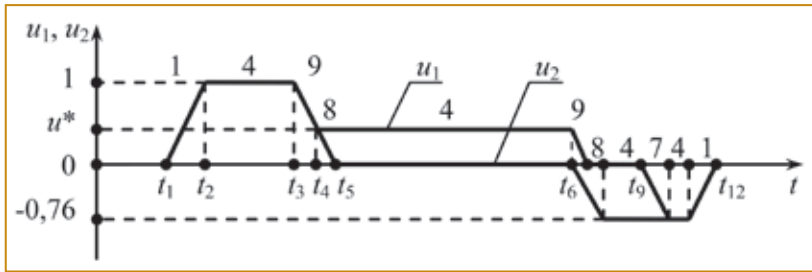
мизации требования к повышению надежности работы гребных двигателей за счет выбора последовательности и моментов действия СДУ.

Представим антропоморфное управление судном в двух видах.

На уровне целеуказания наиболее простым является представление управления в виде последовательности номеров элементов множества неполных представлений элементарных движений. В рассматриваемом случае с двухвинтовым судном для интервала времени $[t_1, t_f]$ это 1-4-9-8-4-9-8-4-7-4-1, считая, что ход времени слева-направо. Для интервала $(t_1 - \Delta t, t_f + \Delta t)$ имеем: 4-1-4-9-8-4-9-8-4-7-4-1-4. Подсчетом устанавливаем, что при вводе судна в камеру шлюза должно быть реализовано $13 - 1 = 12$ СДУ с помощью двух аппаратов совместного управления гребными двигателями. Тогда судно начнет движение от причальной стенки вне шлюза и остановится в камере шлюза.

Таблица 2. Табличная модель целей и действий при антропоморфном управлении вводом судна в камеру шлюза

Цель верхнего уровня		Переместить судно на расстояние l из неподвижного состояния в неподвижное состояние: ($x_1=l, x_2=0, x_3=0, x_4=0$) \rightarrow ($x_1=0, x_2=0, x_3=0, x_4=0$)											
Промежуточные цели		Увеличить скорость: $x_2 \rightarrow v_1$	Поддерживать скорость: $x_2=v_1$	Уменьшить скорость: $x_2 \rightarrow v_2$	Уменьшить скорость: $x_2 \rightarrow 0$								
r	Элементарные цели (нижнего уровня)	Моменты времени действия СДУ											
1	$\begin{matrix} / x_3 \\ / x_4 \end{matrix}$ Увеличить упоры винтов	t_1									t_{11}		
2	$\begin{matrix} / x_3 \\ - x_4 \end{matrix}$ Отсутствует												
3	$\begin{matrix} - x_3 \\ / x_4 \end{matrix}$ Отсутствует												
4	$\begin{matrix} - x_3 \\ - x_4 \end{matrix}$ Не изменять упоры винтов	t_2		t_5		t_8		t_{10}		t_{12}			
5	$\begin{matrix} / x_3 \\ \backslash x_4 \end{matrix}$ Отсутствует												
6	$\begin{matrix} \backslash x_3 \\ / x_4 \end{matrix}$ Отсутствует												
7	$\begin{matrix} \backslash x_3 \\ - x_4 \end{matrix}$ Уменьшить упор винта 1							t_9					
8	$\begin{matrix} - x_3 \\ \backslash x_4 \end{matrix}$ Уменьшить упор винта 2			t_4			t_9						
9	$\begin{matrix} \backslash x_3 \\ \backslash x_4 \end{matrix}$ Уменьшить упоры винтов		t_3			t_6							
Номер элемента последовательности СДУ		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12



Временные диаграммы $u_1(t)$ и $u_2(t)$ технически реализуемого антропоморфного управления перемещением двухвинтового судна типа «Волго-Дон»

Для конкретного случая, если известны тип судна, его осадка и другие данные, а также граничные значения координат перемещения, то на уровне планирования вычисляются моменты действия СДУ. Тогда последовательности номеров элементов множества неполных представлений элементарных движений ставится в соответствие последовательность значений моментов времени действия СДУ: t_1, t_2, \dots, t_{12} (в числе 12). Эти значения сохраняются в качестве ориентиров антропоморфного управления до начала его исполнения и корректируются в зависимости от отклонений реального движения судна от программного, определенного на уровне планирования, по мере исполнения управляемого движения.

Обсуждение

На примере совместного управления движением судна можно обнаружить, что упоры x_3 и x_4 винтов однозначно определяются положениями органов управления гребными двигателями по решениям третьего и четвертого дифференциальных уравнений системы (5). Работа аппарата совместного управления в данном случае описывается моделью многопозиционного органа управления (МП), в котором определена скорость углового перемещения органа управления гребным двигателем [1]. Упор каждого из винтов судна и соответствующее положение органа управления аппарата ЧМИ можно рассматривать на уровнях целеуказания и планирования так, как это показано выше. Однако это неудобно, особенно для судоводителя. Актуальна задача построения такого ЧМИ, который обеспечивал бы максимальную эффективность взаимодействия судоводителя, то есть ЧО с УА. В этом отношении перспективны подходы к проектированию взаимодействия, предложенные А. Купером. Приведем цитату. «Прямые и обширные контакты с пользователями, без которых не обходится серьезное исследование, погружают проектировщиков в мир пользователей и заставляют думать о пользователях задолго до того, как речь пойдет о выработке решений. Одна из наиболее опасных практик при создании продукта — изоляция проектировщиков от пользователей, поскольку это не дает появиться эмпатическому знанию» [9, стр. 50]. Проектирование взаимодействия должно осуществляться в расчете на конкретную СЧМ и пользователя среднего уровня квалификации.

Для судоводителя как пользователя ЧМИ эргатической системы «судоводитель-судно» разработана модель целенаправленных действий при антропоморфном управлении. Представим ее упрощенно в виде табл. 2, используя следующие сокращения и обозначения:

r — номер элемента множества неполных представлений движения (по табл. 1);

x_1 — координата метоположения судна (начальное $x_1=l$, конечное $x_1=0$);

x_2 — скорость движения судна (начальная $x_2=0$, конечная $x_2=0$, промежуточные заданные $x_2=v_1, x_2=v_2$);

x_3, x_4 — упоры движителей с нулевыми значениями на интервалах времени $(t_1-\Delta t, t_1)$ и $(t_{12}, t_{12}+\Delta t)$;

«/», «\», «-» — вербальные значения элементарных целей: «увеличить», «уменьшить», «не изменять».

Табличная модель наглядна, но в ней не конкретизированы процессы для промежутков времени между моментами действий СДУ.

Дополнением к табличной модели целей и действий могут служить графические изображения процессов, полученные путем интегрирования дифференциальных уравнений (2) из множества неполных представлений (1) элементарных движений и стыковки решений в моменты действия СДУ. Для рассмотренного примера СЧМ «судоводитель-судно» в задаче ввода судна в камеру шлюза удобно представить перемещение u_1 и u_2 органов управления графиками зависимостей $u_1=x_3$ и $u_2=x_4$ от t (кусочно-линейные непрерывные функции времени), скорость движения судна — графиком зависимости x_2 от t , а также графиком зависимости x_2 от x_1 (фазовый портрет). Могут (а, возможно, и должны) использоваться и другие представления информационной модели ЧМИ, способствующие наиболее эффективной деятельности ЧО (судоводителя) в совместном с УА управлении объектом СЧМ. Например, апробировалось (но без положительного эффекта) задание скорости движения судна с помощью «бегущей волны».

В качестве примера далее на рисунке показано антропоморфное управление перемещением двухвинтового судна типа «Волго-Дон» в виде графиков, дополняющих представление по табл. 2. Номерам представлений элементарных движений судна 1, 4, 9, ..., 1 по табл. 1, записанным над графиками, соответствуют интервалы времени $(t_1, t_2), (t_2, t_3), (t_3, t_4), \dots, (t_{11}, t_{12})$. Величина u^* рассчитывается из условия, что при $u_1=u^*$ и $u_2=0$ судно движется со скоростью $x_2=v_1$.

Из рисунка следует, что графики отображают непрерывные траектории (временные диаграммы) перемещений u_1 и u_2 двух органов управления упорами движителей судна. В моменты времени t_1, t_2, \dots, t_{12} угловые точки траекторий возникают вследствие действия СДУ в эти моменты. Такое управление технически реализуемо как ручное управление, как автоматическое

управление или как совместное оптимальное по быстройдействию управление повышенной надежности по сравнению с реализациями, зафиксированными в натуральных экспериментах с судами.

Заключение

Представленная работа занимает как бы промежуточное положение в теории и практике управления техническим объектом между ручным управлением и автоматическим управлением, когда оба управления осуществляются параллельно во времени и представляются как совместное управление. Такое совместное управление объектом СЧМ специально не изучалось ранее, хотя его составная часть — антропоморфное управление фактически используется на практике, например, в реализациях с помощью некоторых логических систем управления. В настоящем исследовании антропоморфное управление конструируется в связи с совместным управлением, которое может рассматриваться как автоматизированное управление по определению. Такой подход приближает ЧО в СЧМ к эффективному решению возникающих задач управления объектом с использованием ЭВМ в составе УА при соответствующем приспособлении ЧМИ к пользователю. В этом направлении исследований предложены новые по принципу действия аппараты совместного управления для ЧМИ [1], с помощью которых ЧО может не только управлять объектом СЧМ, но и получать информацию о намерениях УА и, соглашаясь с ними, не совершать управляющих воздействий на органы управления, предоставляя возможность автомату СЧМ реализовать свои намерения. Взаимодействие ЧО с УА может осуществляться на всех трех уровнях управления (целеуказание, планирование, исполнение). При этом намерения УА понятны человеку, так как автомат совместно с ЧО или без него (используя искусственный интеллект) конструирует антропоморфное управление, которое УА и ЧО могут реализовать непосредственно с помощью органов управления ЧМИ.

Проведенные эксперименты с судами в условиях повышенной опасности и сложности управления вводом судна в камеру шлюза показали необходимость учета квалификации, большой умственной напряженности и повышенной осторожности судоводителя в планировании и исполнении управляемого движения. Алгоритм антропоморфного управления,

построенный с учетом экспертных оценок судоводителей, позволяет унифицировать управление, создав предпосылки для повышения его надежности и безопасности. Расчеты показали, что действия по такому алгоритму приводят к сокращению времени перемещения судна из бьефа в камеру шлюза, которое для большинства исполненных движений превышает 15%, что способствует повышению пропускной способности шлюза с соблюдением условий безопасности.

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. №21 (5): 274-281.
2. *Ющенко А.С.* Человек и робот — совместимость и взаимодействие / А.С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика № 1 (2) — СПб.: Изд-во ЦНИИРТК, 2014. — С. 4-9.
3. *Тырва В.О.* Согласование элементарных движений объекта по условиям оптимальности в автоматизированном электроприводе / В.О. Тырва // Тр. IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2016: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2016. — С. 215-219.
4. *Моисеев Н.Н.* Элементы теории оптимальных систем / Н.Н. Моисеев. — М.: Наука, 1975. — 526 с.
5. *Тырва В.О.* Моделирование действий и ответных реакций эргатической системы с электромеханическим объектом управления / В.О. Тырва // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2020. Т.12. № 1. — С. 189-201.
6. *Петров Б.Н.* Проблемы гибкости и надежности управления в теории бортовых терминальных систем / Б.Н. Петров, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов, Ю.П. Портнов-Соколов // Автоматика и телемеханика. 1981. № 2. С. 15-24.
7. *Тырва В.О.* Применение математических моделей для коррекции дискретных сигналов управления объектом эргатической системы / В.О. Тырва // Вестник ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ. 2014. — Вып. 1 (23). — С. 171-178.
8. *Тырва В.О.* Оптимизация управления движением судна в технологическом процессе шлюзования / В.О. Тырва // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы развития транспортной инфраструктуры северных территорий». — Котлас: ГУМРФ. 2014. — С. 22-29.
9. *Купер А.* Основы проектирования взаимодействия / А. Купер, Р. Рейман, Д. Кронин. — Пер. с англ. — СПб.: СимволПлюс. 2009. — 688с.

Тырва Владимир Оскарович — канд. техн. наук, проф., доцент, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова».
 Контактный телефон 8(921)3389657.
 E-mail: v.tyrva@mail.ru, kaf_electroprivod@gumrf.ru

Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:

по электронному каталогу "Почта России" ФГУП Почта России - подписной индекс **П7753**

• сайт журнала <http://www.avtprom.ru> • Редакция

Адрес редакции: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, офис 360 Тел.: (926)212-60-97. E-mail: info@avtprom.ru