

**JOINT CONTROL BY OBJECT IN ERGATIC SYSTEM:
MODELS AND REALIZATIONS****V. O. Tyrva**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

A control is seen as a process of organizing the impact on some part of the environment, which is called a management object. As a result of the impact on the object, the needs of the subject who interacts with this object are satisfied. The subject (human operator) is in the control loop of the ergatic system object. It develops control actions and realizes them by means of controls which are in the human-machine interface. Automatic device (automatic machine) also produces control effects on the object in the implementation of joint management. A discrete model of human-operator actions is used. According to this model, the joint management of the object is organized. The control actions from the human operator and from the machine are formed with the help of the command apparatus control. A person can adjust the control actions of the machine or take full control of the object. The machine through the control informs the person-operator of their intentions and takes over the management, if the person-operator for any reason is removed from it. Traditional human-machine interface command devices are not suitable to implement such joint control capabilities. The principles of construction are considered and the visual models of new man-machine interface command devices for joint control are offered. Mathematical models of their action, combined with the mathematical model of the object, are constructed for such command devices. On this basis, a view of the managed object state change is obtained. This is a set of elementary movements that line up in a certain sequence in a single space of States. Differential equations are used to describe each elementary movement. The sequence of elementary movements is displayed in the state space as a continuous trajectory, and changing the state of the object is characterized by the movement of the depicting point along this path. The developed generalized model is convenient in application for rational distribution of control functions between the human operator and the automaton in the ergatic system. The model is convenient for the use of artificial intelligence software to build a sequence of elementary movements when changing the objectives and conditions of the system. Mathematical models of elementary movements represent an opportunity to execute calculations of optimum control on a computer at the organization of joint control of object. The article presents the results of full-scale experiments to control the movement of the vessel into the shipping lock. They confirmed the expediency of the combined control of the vessel movement in situations of increased danger when entering the vessel into the shipping lock.

Keywords: ergatic system, a human operator, the object of control, joint control, mathematical model, elementary movement.

For citation:

Tyrva, Vladimir O. "Joint control by object in ergatic system: models and realizations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 430–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443.

УДК: 62-50**СОВМЕСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОМ В ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ:
МОДЕЛИ И РЕАЛИЗАЦИИ****В. О. Тырва**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Под «совместным управлением» в статье понимается процесс организации целенаправленного воздействия на некоторую часть среды, называемую объектом управления, в результате которого удовлетворяются потребности субъекта, взаимодействующего с этим объектом. Субъект, находящийся в контуре управления эргатической системы — человек-оператор вырабатывает управляющие воздействия на объект и реализует их с помощью органов управления человеко-машинного интерфейса. При совмест-

ном управлении объектом подобные воздействия на объект вырабатываются также автоматическим устройством — автоматом. На основе дискретной модели действий человека-оператора предлагается организовать совместное управление объектом так, чтобы управляющие воздействия, исходящие от человека-оператора и от автомата, суммировались с помощью органа управления командоаппарата человеко-машинного интерфейса. Человек может корректировать действия автомата или полностью взять на себя управление объектом, а автомат через орган управления командоаппарата информирует человека-оператора о своих намерениях и берет на себя управление объектом, если человек-оператор по какой-либо причине от него устраняется. Для реализации таких возможностей совместного управления традиционные командоаппараты человеко-машинного интерфейса не подходят. В связи с этим рассматриваются принципы построения и предлагаются изобразительные модели новых командоаппаратов человеко-машинного интерфейса. С учетом особенностей таких командоаппаратов построены математические модели их действия, совмещаемые с математической моделью объекта. На основе этих моделей получено математическое представление эволюции состояния объекта через множество элементарных движений, выстраиваемых в определенную последовательность в едином для них многомерном пространстве состояний. Каждое элементарное движение описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями. Последовательность элементарных движений отображается в пространстве состояний в виде непрерывной траектории, а изменение состояния объекта характеризуется движением изображающей точки по этой траектории. Разработанная обобщенная модель удобна для рационального распределения функций управления между человеком-оператором и автоматом в эргатической системе, а также для использования программных средств искусственного интеллекта при построении последовательности элементарных движений, когда изменяются цели и условия функционирования системы. Математические модели элементарных движений представляют возможность выполнения расчетов оптимального управления на ЭВМ. В статье приведены результаты натурных экспериментов, подтверждающих возможность и целесообразность применения совместного управления движением судна в ситуациях повышенной опасности при вводе судна в шлюз.

Ключевые слова: эргатическая система, человек-оператор, объект управления, совместное управление, математическая модель, элементарное движение.

Для цитирования:

Тырва В. О. Совместное управление объектом в эргатической системе: модели и реализации / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 430–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443.

Введение (Introduction)

В широком смысле управление как процесс представляет собой организацию целенаправленного воздействия на некоторую часть среды, называемую *объектом управления*, в результате которого удовлетворяются потребности субъекта, взаимодействующего с этим объектом. При автоматизированном управлении техническим объектом субъект — человек-оператор (ЧО) — находится в контуре управления и взаимодействует с объектом управления с помощью человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) — технических и программных средств, обеспечивающих возможность ЧО управлять этим объектом и контролировать его работу (ГОСТ Р МЭК 60447-2000).

Согласно терминологии, принятой в 1960 г. на Первом конгрессе Международной федерации по автоматическому управлению, автоматизированная система с ЧО в контуре управления представляет собой *эргатическую систему управления* (ЭСУ), которую называют также *человеко-машинной системой*, если объектом управления является некоторый технический объект. Особенности управления объектом в ЭСУ состоят в том, что психофизические свойства ЧО должны быть учтены в параметрах (свойствах) системы управления. В этой связи при проектировании ЭСУ учитываются и используются рекомендации по распределению функций управления между ЧО и техническими средствами управления объектом, выработанные в научном направлении «Инженерная психология» — отрасли психологии, исследующей процессы и средства информационного взаимодействия между человеком и машиной, а также техническими средствами автоматизации. Наиболее существенные результаты в изучении и создании ЭСУ получены в авиации. Учеными и практиками обоснована и подтверждена эффективность совместного управления полетом самолета, когда управляющие воздействия на исполнительные механизмы самолета вырабатываются совместно и пилотом, и автоматической системой [1].

На водном транспорте актуальной проблемой автоматизации ЭСУ является обеспечение с помощью технических средств рационального распределения функций управления между техническими средствами управления (автоматом ЭСУ) и ЧО с возможностью взаимной коррекции управляющих действий, вырабатываемых автоматом ЭСУ и создаваемых ЧО как в нормальных условиях эксплуатации объекта, так и при возникновении аварийных ситуаций. Рациональному распределению функций управления способствует реализация совместного управления объектом по принципу NOTAS (HandsOnThrottle-And-Stick — руки на секторе газа и ручке управления [1]) с помощью единых для ЧО и автомата ЭСУ командоаппаратов [2], [3]. Для реализации такого совместного взаимодействия ЧО и автомата ЭСУ, в дополнение к проведенным исследованиям, требуется решить задачи разработки новых типов командоаппаратов ЧМИ, приспособленных для совместного человеко-машинного управления объектом, а также моделей управляемого изменения во времени состояний объекта ЭСУ под действием совмещенного управления.

Предлагаемый подход к решению выделенных задач основан на представлениях и методах теорий ЭСУ, включая инженерную психологию, и автоматического управления, включая теорию оптимального управления. Чтобы совместить управляющие действия ЧО и автомата ЭСУ в математической модели ЭСУ, используется дискретная модель действий ЧО, разработанная в инженерной психологии [4], и модель объекта с сосредоточенными параметрами в форме нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Математическая модель ЭСУ определяется в классе систем с переменной структурой в едином для всех структур пространстве состояний. Математическая модель технической части ЭСУ как бы приближается к ЧО с учетом особенностей реализации ЧМИ. Модель представляется в форме, удобной для построения последовательности управляющих воздействий на объект, с применением элементов искусственного интеллекта (базы знаний, экспертной системы и системы логического вывода) и использованием вычислительных средств для оптимизации управления при заданных целях и ограничениях параметров состояния технического объекта. В основу моделирования ЭСУ положены представления о взаимосвязи действий и ответных реакций ЧО и машины [4], о неполных кусочных описаниях конструируемого движения объекта для последовательности ситуаций [5], ситуационном управлении [6], рациональном агенте [7] и искусственном интеллекте [8].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Особенности совместного управления техническим объектом. Исследованиями [4] установлено, что деятельность ЧО в контуре управления системы представляется алгоритмом, выраженным как «*всё или ничего*». Входной сигнал либо передается в нервную систему, либо не передается. Центральная нервная система получает сигналы-раздражители и посредством обратной связи производит сличение этих сигналов, сохраняющихся в кратковременной (оперативной) памяти. Минимальное время, затрачиваемое на это сравнение (по данным источника [4]), равно примерно 0,3 с. Затем вырабатывается решение об управляющем воздействии и производится воздействие на орган управления объектом. Это происходит в течение примерно 0,2 с или более, причем внимание ЧО полностью обращено на контроль действия исполнительного органа и никаких новых раздражителей центральная нервная система не принимает. После этого центральная нервная система снова переключается на получение новых раздражений. Интервалом не менее чем $0,3 + 0,2 = 0,5$ с завершается один из повторяющихся циклов получения информации, переработки ее и ответной реакции ЧО. Это оптимистическая оценка. В действительности время реакции человека больше, оно зависит от возраста и от пола. Время решения мыслительных и логических задач зависит от квалификации и индивидуальных особенностей ЧО, а также от количества решаемых задач, количества возможных вариантов решения, количества органов управления и т. д. [9]. Диаграмма взаимосвязи действий и ответных реакций в системе «человек – машина» приведена на рис. 1.

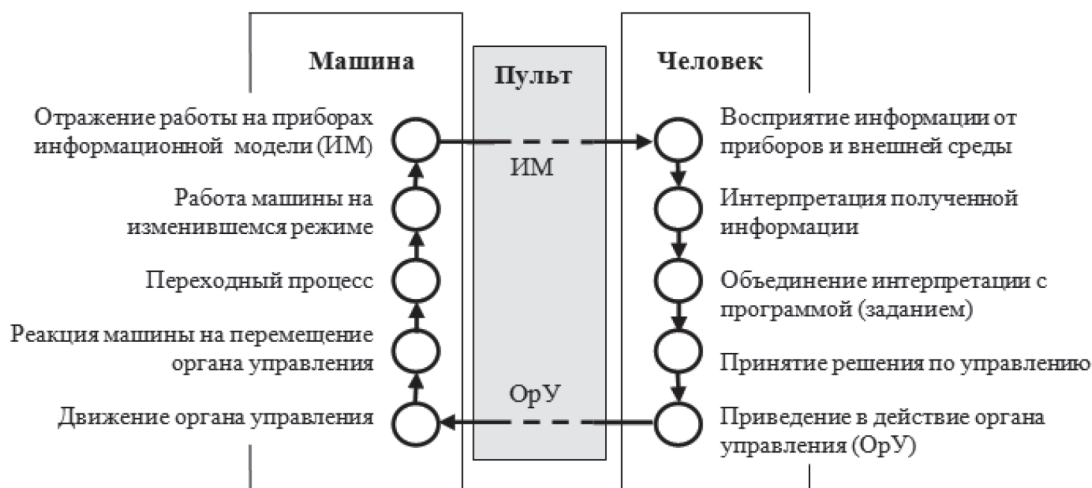


Рис. 1. Диаграмма взаимосвязи действий и ответных реакций ЧО и машины:
ИМ — информационная модель; ОрУ — орган управления

Установлено, что в промежутках между интервалами контроля параметров движения и приложения управляющего воздействия человеком система управления объектом остается как бы разомкнутой (по контуру управления, в котором находится ЧО). Принятие человеком решения на цикле управления выражается в реализации одной из возможностей: либо воздействовать на орган управления, либо не воздействовать, т. е. «оставить так, как есть».

Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 60447-2000 устанавливает общие требования к приводимым в действие вручную органам управления электрическим оборудованием, машинами или технологическими процессами, составляющими ЧМИ. Орган управления — это часть электрооборудования ЭСУ, которая принимает воздействие человека (от руки, ноги или другой части тела). Орган управления может быть технически реализован в виде ручки, штурвала, педали, кнопки, «мыши», светового пера, клавиатуры, чувствительной области экрана монитора или другим образом. Согласно требованиям ГОСТа Р МЭК 60447-2000, орган управления должен выполнять только команды, соответствующие заданным целям его применения.

Моделирование управляющих действий человека-оператора. Для командоаппарата ЧМИ описание целенаправленных перемещений органа управления (ОрУ), положение которого характеризуется координатой u , представляется следующими моделями:

– модель двухпозиционного органа управления (модель 2П):

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 - \text{включено;} \\ u &= 0 - \text{выключено;} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

– модель трехпозиционного органа управления (модель 3П):

$$\left. \begin{aligned} u &= u_{\text{в}} - \text{включено "Вверх" ("Вперед", "Влево", ...);} \\ u &= 0 - \text{отключено;} \\ u &= -u_{\text{н}} - \text{включено "Вниз" ("Назад", "Вправо", ...);} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

– модель многопозиционного органа управления (модель МП):

$$\dot{u} = \omega; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \omega_{\text{в}} - \text{изменить "Вверх" ("От себя", "Влево", ...) положение ОрУ;} \\ \omega &= 0 - \text{оставить неизменным положение ОрУ;} \\ \omega &= -\omega_{\text{н}} - \text{изменить "Вниз" ("К себе", "Вправо", ...) положение ОрУ;} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

– модель многопозиционного многоскоростного органа управления (модель МПС):

$$\left. \begin{aligned} \dot{u} &= \omega; \\ \dot{\omega} &= \varepsilon; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_{\text{в}} - \text{изменить "Вверх" скорость перемещения ОрУ}; \\ \varepsilon &= 0 - \text{оставить неизменной скорость перемещения ОрУ}; \\ \varepsilon &= -\varepsilon_{\text{н}} - \text{изменить "Вниз" скорость перемещения ОрУ}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь и далее точкой над буквой обозначается операция дифференцирования по времени t . Параметрам $u_0, u_{\text{в}}, u_{\text{н}}, \omega_{\text{в}}, \omega_{\text{н}}, \varepsilon_{\text{в}}, \varepsilon_{\text{н}}$ придаются некоторые числовые положительные значения. Пример временной диаграммы скорости перемещения органа управления по модели МПС приведен на рис. 2.

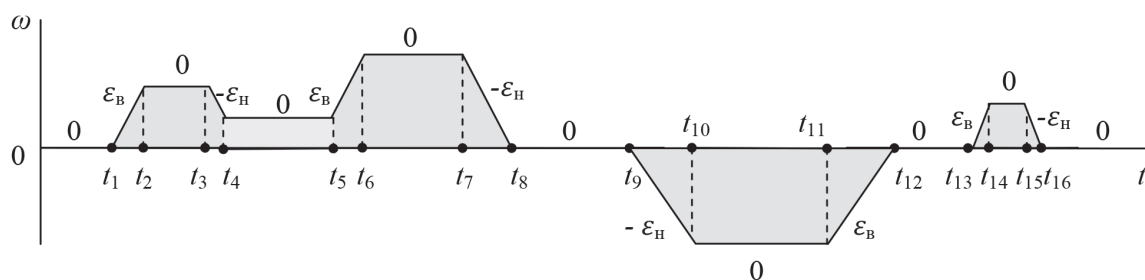


Рис. 2. Пример временной диаграммы скорости перемещения органа управления командоаппарата

График зависимости скорости ω от времени t представлен как результат интегрирования второго уравнения системы дифференциальных уравнений (5) на интервале времени $t < t_1$ при $\varepsilon = 0$, на интервале времени $t_1 < t < t_2$ при $\varepsilon = \varepsilon_{\text{в}}$ и стыковки решений в момент t_1 , затем интегрирования на интервале времени $t_2 < t < t_3$ при $\varepsilon = 0$ и стыковки решений в момент t_2 , затем интегрирования при значениях ε , равных $-\varepsilon_{\text{н}}$, затем 0, затем $\varepsilon_{\text{в}}$ и так далее, со стыковкой решений в моменты времени $t_3, t_4, t_5, \dots$. Точки графика для моментов времени $t_1, t_2, t_3, \dots$ являются угловыми точками непрерывной линии, которая изображает проекцию траектории движения органа управления командоаппарата в пространстве $M^3 = \{t \times u \times \omega\}$ на плоскость $M^2 = \{t \times \omega\}$.

Командоаппараты совместного управления объектом. На рис. 3 показаны изобразительные модели командоаппаратов совместного управления объектом ЭСУ, иллюстрирующие особенности их построения.

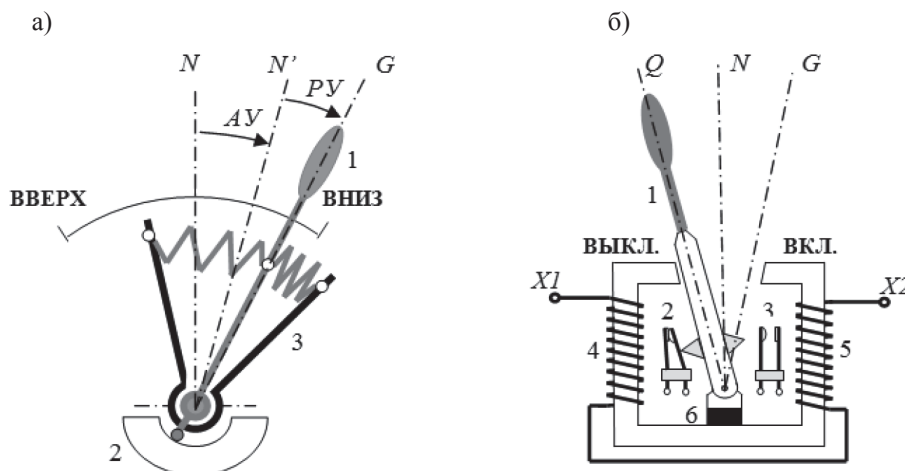


Рис. 3. Изобразительные модели аппаратов совместного управления техническим объектом:

а — аппарат с многопозиционным органом управления;
б — аппарат с двух- или трехпозиционным органом управления

По рис. 3, а можно представить принцип построения командоаппарата с многопозиционным органом управления на основе аналогового датчика углового перемещения 2. Сигнал на выходе датчика однозначно определяется положением рукоятки ручного управления 1 (положение G). Рукоятка управления 1 с помощью пружин связана с угловой поворотной вилкой 3, отклоняемой от нейтрального положения N до положения N' серводвигателем автомата ЭСУ (угол AU) при управлении объектом ЭСУ. Результирующее положение рукоятки равно алгебраической сумме углов ее отклонения ($AU + PU$), созданных автоматом (положение N') и рукой ЧО (до положения G). Когда ЧО держит рукой орган управления, то через перемещение рукоятки и возникших усилий, из-за упругости пружин, ЧО получает информацию о «намерениях» автомата ЭСУ изменить текущее состояние ЭСУ (реализация принципа NOTAS). При этом ЧО за счет перемещения органа управления (угол PU) может корректировать управляющие действия автомата ЭСУ, если он «не соглашается» с автоматом. Если ЧО не создает корректирующие воздействия на орган управления ($PU = 0$), то управление объектом ЭСУ полностью осуществляется автоматом ЭСУ. Приоритет в управлении объектом имеет ЧО. При отключении или отказе автоматики управление объектом ЭСУ не прерывается, так как его продолжает ЧО с помощью воздействия на орган управления командоаппарата.

На рис. 3, б показана изобразительная модель командоаппарата совместного управления с двухпозиционным органом управления на основе поляризованного электромагнитного механизма с постоянным магнитом. На трехконтурном магнитопроводе размещена катушка с двухсекционной обмоткой 4–5, на которую автоматом ЭСУ подается импульс электрического напряжения определенной полярности при включении (поворот рукоятки 1 из положения Q в положение G) или импульс напряжения противоположной полярности при выключении (поворот рукоятки 1 из положения G в положение Q). В положении Q контакт 2 замкнут, а контакт 3 разомкнут. В положении G замкнут контакт 3 и разомкнут контакт 2. С помощью контактов коммутируются электрические цепи управления объектом ЭСУ. При отсутствии напряжения на зажимах $X1, X2$ орган управления командоаппарата сохраняет принятое положение либо Q , либо G благодаря созданной постоянным магнитом 6 силе, действующей на орган управления. ЧО может мускульным усилием изменить положение органа управления, повернув рукоятку, или воспрепятствовать повороту рукоятки, если от автомата ЭСУ поступает импульс управления на обмотку 4–5. Тем самым обеспечивается возможность коррекции автоматического управления объектом ЭСУ действиями ЧО. Приоритет в управлении объектом этим командоаппаратом также имеет ЧО.

Командоаппарат совместного управления объектом ЭСУ с трехпозиционным органом управления командоаппарата можно получить на базе поляризованного электромагнитного механизма, введя в конструкцию командоаппарата, показанного на рис. 3, б, возвратную пружину, перемещающую рукоятку 1 в нейтральное положение N при отсутствии электрического напряжения на обмотке 4–5 катушки механизма, если ЧО не создает мускульное усилие, препятствующее перемещению рукоятки. При такой конструкции командоаппарата совместного управления объектом ЭСУ рукоятка 1 должна удерживаться в любом из положений Q или G благодаря электрическому напряжению соответствующей полярности, приложенному к обмотке катушки или / и мускульному усилию ЧО.

Рассмотренные командоаппараты совместного управления объектом и командоаппараты подобного принципа действия удобны для применения в ЭСУ с целью обучения автомата, если он реализован как адаптивная система. Возможно решение и другой задачи обучения ЧО оптимальному управлению, если такое управление реализуется автоматом. Аналогичные возможности открываются при использовании автомата ЭСУ с искусственным интеллектом, например, автомата, которому придаются свойства «рационального агента», реализующего функцию, которая отображает последовательность актов восприятия в действия [7].

Представление управляемых движений технического объекта в пространстве состояний. Для описания динамики состояния объекта ЭСУ в зависимости от положения органа управления командоаппарата используем дифференциальные уравнения, получаемые на основе законов физики. Для технического объекта (ТО) ЭСУ с сосредоточенными параметрами имеем диффе-

ренциальные уравнения, которые всегда можно привести к нормальной системе обыкновенных дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_{N_0}, u_1, u_2, \dots, u_p); \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_{N_0}, u_1, u_2, \dots, u_p); \\ &\vdots \\ \dot{x}_{N_0} &= f_{N_0}(x_1, x_2, \dots, x_{N_0}, u_1, u_2, \dots, u_p), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_{N_0}$ — переменные состояния объекта, называемые также *фазовыми координатами*; $u_1, u_2, \dots, u_p$ — переменные управления объекта, каждая из которых определяется положением органа управления соответствующего командоаппарата.

Предполагается, что функции $f_1(*), f_2(*), \dots, f_{N_0}(*)$ правых частей уравнений (7) дифференцируемы по переменным состояниям.

Выделим из общего количества P командоаппаратов интерфейса ЭСУ:

- P_a аппаратов управления $u_1, u_2, \dots, u_{P_a}$ с двухпозиционным ОрУ модели 2П (1);
- P_b аппаратов управления $u_{P_a+1}, u_{P_a+2}, \dots, u_{P_a+P_b}$ с трехпозиционным ОрУ модели 3П (2);
- P_c аппаратов управления $u_{P_a+P_b+1}, u_{P_a+P_b+2}, \dots, u_{P_a+P_b+P_c}$ с многопозиционным ОрУ модели МП (3), (4);
- P_d аппаратов управления $u_{P_a+P_b+P_c+1}, u_{P_a+P_b+P_c+2}, \dots, u_P$ с многопозиционным ОрУ модели МПС (5), (6).

Введем дополнительно:

- P_c переменных состояния $x_{N_0+1}, x_{N_0+2}, \dots, x_{N_0+P_c}$ вместо $u_{P_a+P_b+1}, u_{P_a+P_b+2}, \dots, u_{P_a+P_b+P_c}$ в соответствии с (3);
- P_d переменных состояния $x_{N_0+P_c+1}, x_{N_0+P_c+2}, \dots, x_{N_0+P_c+2P_d}$ вместо $u_{P_a+P_b+P_c+1}, u_{P_a+P_b+P_c+2}, \dots, u_P$ и еще P_d переменных состояния $x_{N_0+P_c+2}, x_{N_0+P_c+3}, \dots, x_{N_0+P_c+2P_d}$ в соответствии с моделью МПС (5).

Таким образом, количество переменных состояния x_i в уравнениях (7) для ЭСУ увеличено на $P_c + 2P_d$ фазовых координат $x_{N_0+1}, x_{N_0+2}, \dots, x_{N_0+P_c+2P_d}$.

Обозначим через $N = N_0 + P_c + 2P_d$ общее количество переменных состояния ТО $x_1, x_2, \dots, x_{N_0}, x_{N_0+1}, \dots, x_N$ и объединим переменные состояния в вектор (матрицу-столбец):

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Тогда, используя для каждого управления $u_1, u_2, \dots, u_p$ его модель, в соответствии с выражениями (1) – (6), получим множество Z элементарных представлений движения ТО для ЭСУ:

$$Z = \{ \dot{X} = F^r(X), r = 1, 2, \dots, R \}, \quad (9)$$

в котором все элементарные неполные представления движения [5]:

$$\dot{X} = F^r(X), \quad (10)$$

при $r = 1, 2, \dots, R$ имеют попарно различные векторы-функции правых частей:

$$F^r(X) = \begin{bmatrix} f_1^r(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ f_2^r(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ \vdots \\ f_N^r(x_1, x_2, \dots, x_N) \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} f_1^k(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ f_2^k(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ \vdots \\ f_N^k(x_1, x_2, \dots, x_N) \end{bmatrix} = F^k(X), \quad (11)$$

если $k \neq r$ (различия между $F^r(X)$ и $F^k(X)$ обусловлены моделями органов управления).

Теоретически максимальное количество элементов множества (9) представлений элементарных движений составит

$$R = 2^{Pa} \cdot 3^{Pb+Pc+Pd} \quad (12)$$

Каждому представлению элементарного движения объекта ЭСУ из множества (9) поставим в соответствие определенную структуру технического объекта ЭСУ. Изменение структуры объекта при совместном управлении объектом происходит дискретно в результате перемещения любого органа управления любого командоаппарата, скорости или ускорения перемещения органа управления в соответствии с моделями (1) – (6). У ЧО длина интервала времени между соседними моментами смены структур путем воздействия на орган управления ограничена снизу величиной 0,5 с [4] (показано на рис. 1).

Поведение объекта ЭСУ при управлении с помощью органа управления отображается в пространстве состояний $R^{1+N} = \{t \times x_1 \times x_2 \times \dots \times x_N\}$ изображающей точкой, перемещающейся во времени t по некоторой непрерывной траектории. При моделировании управляемого поведения (движения) объекта ЭСУ траектория определяется в результате интегрирования дифференциальных уравнений (10) из множества (9) и стыковки их решений в моменты, когда r -я вектор-функция $F^r(X)$ в уравнении (10) изменяется на другую k -ю вектор-функцию $F^k(X)$ по условию (11). Точки траектории движения объекта ЭСУ, в которых стыкуются решения уравнений, представляют собой угловые точки траектории (в которых, по крайней мере, одна переменная состояния не имеет производную по времени). Пример траектории движения объекта в пространстве R^{1+2} приведен на рис. 4.

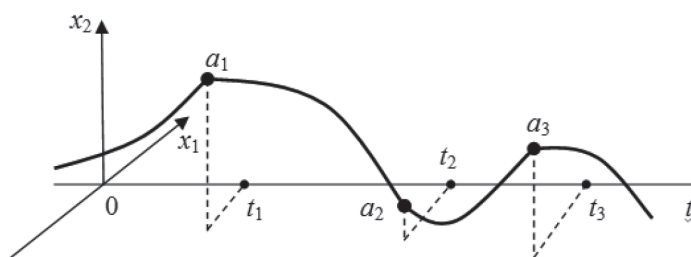


Рис. 4. Пример фрагмента траектории движения объекта в пространстве состояний R^{1+2}

Моментам времени t_1, t_2, t_3 соответствуют угловые точки a_1, a_2, a_3 траектории.

Неполные представления элементарных движений судна. Воспользуемся описанием плоского движения судна в неподвижной системе координат [10], выделив в нем дифференциальные уравнения, которые являются неполным представлением продольного движения судна. В соответствии с дифференциальными уравнениями (7) запишем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + v_r; \\ \dot{x}_2 &= a_1 x_2^2 + a_2 x_2 u + a_3 u, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где x_1 — координата центра масс судна в неподвижной системе координат (вдоль продольной оси судна); x_2 — скорость продольного движения судна относительно воды при $x_2 \geq 0$; u — упор движителей, действующий в направлении продольной оси; v_r — скорость течения воды в месте расположения судна; a_1, a_2, a_3 — коэффициенты, числовые значения которых зависят от осадки судна T , глубины судового хода H и, возможно, от других характеристик внешней среды.

Расчетные значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 для судна «Волго-Дон» [10] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения коэффициентов дифференциальных уравнений движения судна

Коэффици- циент	Единица измерения	Множи- тель	Осадка судна T , м					
			1,5		2,5		3,5	
			Глубина судового хода H , м					
			10	20	10	20	10	20
a_1	м ⁻¹	10 ⁻³	-2,39	-2,22	-1,75	-1,55	-1,03	-0,88
a_2	с ⁻¹	10 ⁻²	-1,79	-1,79	-0,46	-0,46	-0,18	-0,18
a_3	мс ⁻²	10 ⁻¹	2,18	2,18	0,93	0,93	0,40	0,40

Упор u создается двумя винтами, каждый из которых создает свой упор, который для открытого винта может принимать значения из диапазона от $-0,38$ до $0,50$ в модели (13), а для комплекса винт – насадка — от $-0,27$ до $0,50$. В указанных пределах изменяется упор винта при управлении скоростью его вращения. Для описания связи между положением органа управления (главным двигателем) и упором применяется модель МП (3), (4). Количество представлений элементарных движений судна (структур объекта) $R = 3^2 = 9$ определяется согласно выражению (12).

Общее представление элементарных движений получим, дополнив систему уравнений (13) уравнением (3) для каждого винта:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + v_T; \\ \dot{x}_2 &= a_1 x_2^2 + (a_2 x_2 + a_3)(x_3 + x_4); \\ \dot{x}_3 &= \omega_1; \\ \dot{x}_4 &= \omega_2, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где x_3, x_4 — фазовые координаты, введенные в модель (13) вместо u ; ω_1, ω_2 — скорости перемещения органа управления упором винтов судна при условии (4).

Конкретизируем множество (9) неполных представлений элементарных продольных движений судна и пронумеруем их от одного до девяти в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Нумерация элементов множества представлений элементарных движений

ω_1 / ω_2	$\omega_2 = \omega_b$	$\omega_2 = 0$	$\omega_2 = -\omega_n$
$\omega_1 = \omega_b$	1	2	5
$\omega_1 = 0$	3	4	8
$\omega_1 = -\omega_n$	6	7	9

Чтобы конкретизировать, например, представление движения под номером 3, нужно в систему дифференциальных уравнений вместо ω_1 подставить 0, а вместо ω_2 — ω_b . Для рассматриваемых судов имеем $\omega_b = \omega_n = 0,12 \text{ с}^{-1}$.

Результаты (Results)

Натурные исследования режимов продольного движения судов при вводе в камеру шлюза, инициированные Ю. М. Кулибановым [11], показали, что элементарные движения судна из построенного множества реализуются при ручном управлении судном [12]. На рис. 5 в качестве примера представлены эпюры упоров u_1 и u_2 винтов двух судов «Волго-Дон», введенных в камеру шлюза в разное время при одинаковых внешних условиях. Эпюры построены на основе осциллограмм записи частоты вращения винтов. Из-за сжатия графиков по времени, переходные процессы отражены вертикальными отрезками эпюр.

На времени ввода судна в шлюз $[0, t_f]$ (зафиксированы разные значения продолжительности ввода в экспериментах с судами) реализуется последовательность элементарных движений, которая получается в результате последовательных дискретных воздействий судоводителя на орган управления. На рис. 5, а над осью времени отмечены цифрами из табл. 2 представления движений на разных участках пути движения судна вдоль причальной стенки в камеру шлюза. Количество реализованных элементарных движений составляет 17. Следует отметить, что при управлении судном не было использовано представление движения с номером 3.

Из сравнения рис. 5, а и б видно, что отсутствует единообразие в реализации управления движением судна в сходных ситуациях. Количество элементарных движений для показанного на рис. 5, б управления равно 35. Несмотря на разное количество управляющих действий, вы-

полненных судоводителями в экспериментах, просматривается следующая закономерность: один из создаваемых винтами упоров (u_2) поддерживается отрицательным по мере приближения судна к месту остановки в камере шлюза (к моменту t_f). Тем самым повышается вероятность безаварийного ввода судна в камеру (без навала на ворота) благодаря тому, что один из главных двигателей поддерживается «горячим», т. е. способным к выполнению экстренного торможения судна в любой момент времени для предотвращения навала на ворота камеры шлюза.

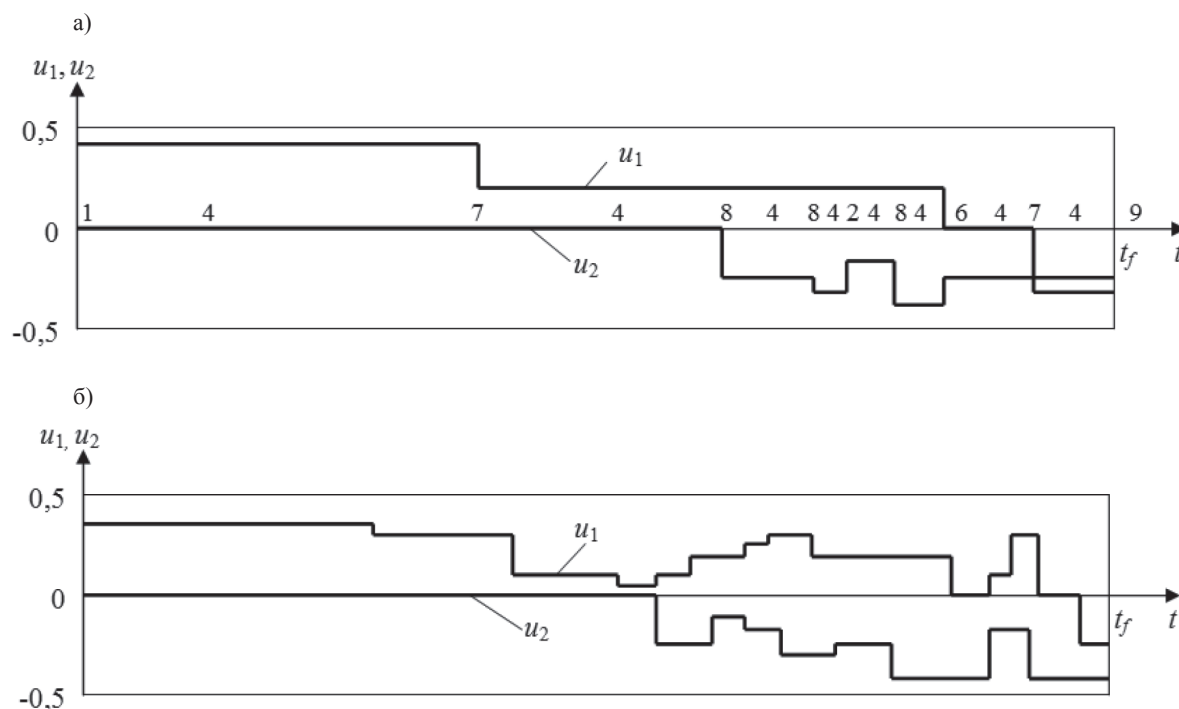
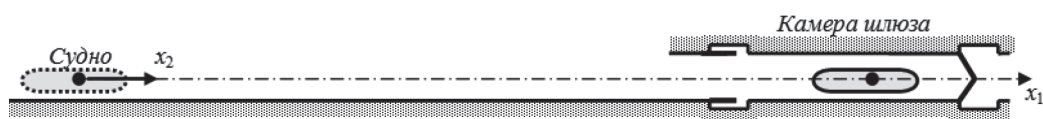


Рис. 5. Эпюры упоров u_1 , u_2 винтов судна на времени $[0, t_f]$ ввода судна в камеру шлюза:
а — Волго-Дон XX; б — Волго-Дон YY

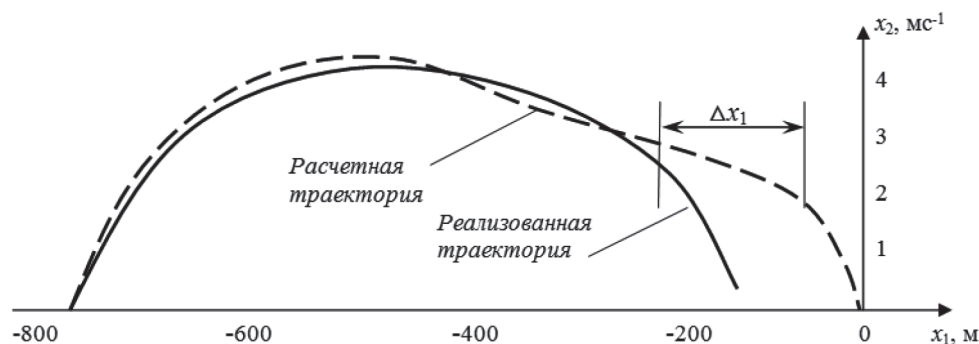
В одном эксперименте (рис. 6, а) был отмечен психологический фактор неправильного восприятия судоводителем тормозного пути, повлекший за собой преждевременный переход к режиму активного торможения судна двумя винтами при попытке реализации расчетного ускоренного ввода судна в камеру шлюза (см. рис. 6, б и в) [12]. Опережение начала торможения по координате x_1 составило $\Delta x_1 = 160$ м. При построении модели расчетного движения (см. рис. 6, б) был максимально упрощен алгоритм управления (см. рис. 6, в). Принято $u_1 = u_2$ и три представления: 1, 4, 9 элементарных движений (см. табл. 2), включенных в последовательность, состоящую из девяти элементов (показаны цифрами на рис. 6, в).

В указанном эксперименте роль «рационального агента» в смысле, определенном в [7], исполняли авторы статьи [11], которые рассчитали и предложили судоводителю алгоритм управления, а также осуществляли контроль текущих значений фазовых координат согласно представлению (14) и фиксировали отклонения в реализации предложенного судоводителю алгоритма управления ввиду отсутствия необходимых технических средств автоматизации управления. Эксперимент показал возможность сокращения количества управляющих действий, выполняемых судоводителем, и повышения качества управления в плане безопасности и сокращения времени ввода судна в камеру шлюза, а в дополнение к этому — необходимость учета квалификации и опыта судоводителя в построении рациональным агентом алгоритма совместного управления движением судна.

а)



б)



в)



Рис. 6. Ускоренный ввод судна в шлюз:

а — начальное и конечное положения судна при вводе в камеру шлюза;

б — фазовые траектории движения судна; в — эпюры упоров винтов

Обсуждение (Discussion)

Распределение функций управления между ЧО и ТСУ в ЭСУ ТО, в максимальной степени учитывающее преимущества и недостатки ЧО и ТСУ, необходимо не только на этапе проектирования системы, но и во время ее эксплуатации. Полученные, например, в авиации результаты от совмещения управляющих действий в автоматизированном управлении истребителем [13] подтверждают целесообразность продолжения исследований в этом направлении. Научную новизну и практическую ценность приобретают исследования по разработке моделей управляемых движений объекта ЭСУ и технических средств, обеспечивающих качественное управление объектом как при совмещении во времени управляющих воздействий на объект со стороны человека-оператора и автомата ЭСУ, так и при условиях, когда один из этих источников управляющих воздействий перестает их создавать по какой-либо причине. Представленные ранее данные о натурных экспериментах судами в условиях повышенной опасности при вводе судна в камеру шлюза свидетельствуют об актуальности исследований применительно к водному транспорту.

Для реализации машинных алгоритмов совместного управления необходимо приблизить управляющие воздействия на объект, вырабатываемые автоматом ЭСУ, к такой форме, в какой они присущи ЧО. В связи с этим предложен инновационный подход к математическому описанию динамики объекта ЭСУ при совместном управлении объектом на основе конечного множества неполных представлений элементарных движений объекта. Согласно данному подходу, процесс конструирования автоматического управления разделен на построение последовательности элементарных движений и выбор моментов времени смены элементарных движений в определен-

ной последовательности. На первом из этих двух этапов возможно и целесообразно применение средств систем искусственного интеллекта: экспертной системы, базы знаний, системы вывода. При реализации первого этапа в максимальной степени можно учесть «человеческий фактор», проявляющийся в совместном управлении объектом ЭСУ, и организовать оперативное обучение человека-оператора и автомата в процессе функционирования ЭСУ. Для реализации второго этапа предложенные математические модели обеспечивают возможность проведения вычислений на ЭВМ моментов времени смены элементарных движений объекта, которые реализуются как переключения структур технической части ЭСУ с помощью командоаппаратов совместного управления. Предложены постановки и решения задач оптимального дискретного управления объектом [14] на основе указанных моделей. Существенное влияние на содержание исследования, отраженного в статье, оказали работы [4] – [8], [13] и эксперименты, проведенные с судами.

Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ особенностей эргатических систем управления техническим объектом и результаты натурных экспериментов с судами по управлению движением судна в условиях повышенной опасности при вводе в камеру шлюза показали целесообразность разработки технических средств и моделей совместного управления объектом со стороны ЧО и автомата ЭСУ.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что ЧМИ, применяемый в настоящее время в ЭСУ, нуждается в адаптации к совместному управлению техническим объектом, входящим в состав ЭСУ; необходимо разработать командоаппараты совместного управления, обеспечивающие возможность одновременного и разновременного управления объектом со стороны человека и со стороны автомата без каких-либо дополнительных команд на переключение режимов управления. Принцип действия таких командоаппаратов показан в статье с помощью изобразительных и математических моделей аппаратов, рекомендованных для применения в ЧМИ эргатической системы совместного управления техническим объектом.

Разработаны математические модели, описывающие формирование команд совместного управления объектом ЭСУ и управляемое движение объектов в пространстве состояний с помощью неполных представлений элементарных движений, выстраиваемых в определенную последовательность на конечном отрезке времени управления объектом. Обоснована возможность применения технических средств систем искусственного интеллекта и методов теории оптимального управления для конструирования и реализации совместного управления техническим объектом с рациональным распределением функций управления в ЭСУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совмещенное управление (управление через САУ) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://oobskspetsavia.ru/2015/11/16/sovmeshhennoe-upravlenie-upravlenie-cherez-sau/> (дата обращения: 27.02.2018).
2. *Тырва В. О.* Особенности эргатической системы совместного управления техническим объектом / В. О. Тырва // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 438–443.
3. *Доронин А. М.* Человеко-машинное взаимодействие и его показатели / А. М. Доронин, Д. А. Романов, М. Л. Романова // Вестник Адыгейского государственного университета. — 2005. — № 4. — С. 244–250.
4. *Денисов В. Г.* Инженерная психология в авиации и космонавтике / В. Г. Денисов, В. Ф. Онищенко. — М.: Машиностроение, 1972. — 316 с.
5. *Корнев Г. В.* Цель и приспособляемость движения / Г. В. Корнев. — М.: Наука, 1974. — 528 с.
6. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. — М.: Наука, 1986. — 228 с.
7. *Стюарт Р.* Искусственный интеллект: современный подход / Р. Стюарт, Н. Питер. — 2-е изд. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. — 1408 с.

8. Макаров И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров [и др.]. — М.: Наука, 2006. — 333 с.
9. Shub Y. Differences between left-and right-hand reaction time rhythms: indications of shifts in strategies of human brain activity / Y. Shub, I. E. Ashkenazi, A. Reinberg // *Cognitive brain research*. — 1997. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 141–146. DOI: 10.1016/S0926-6410(97)00025-6.
10. Тырва В. О. Трансформированные уравнения динамики судна / В. О. Тырва, Э. Б. Якимов // *Материалы международной НПК «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление»*. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2009. — С. 301–305.
11. Кулибанов Ю. М. Исследование режимов движения судов проекта 507 при шлюзовании / Ю. М. Кулибанов, В. Н. Бачернихин, В. О. Тырва // *Материалы XXVIII научно-технической конференции ЛИВТ*. — Л.: ЛИВТ, 1974. — С. 52–55.
12. Тырва В. О. Оптимизация управления движением судна в технологическом процессе шлюзования / В. О. Тырва // *Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. «Проблемы развития транспортной инфраструктуры северных территорий»*. — Котлас: ГУМРФ, 2014. — С. 22–29.
13. Почему Су-35 самый опасный истребитель в мире? [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.kramola.info/vesti/novosti/pochemu-su-35-samyu-opasnyu-istrebitel-v-mire> (дата обращения: 23.08.2017).
14. Тырва В. О. Согласование элементарных движений объекта по условиям оптимальности в автоматизированном электроприводе / В. О. Тырва // *Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2016*. — Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2016. — С. 215–219.

REFERENCES

1. Sovmeshchennoe upravlenie (upravlenie cherez SAU). Web. 27 Feb. 2018 <<http://oobskspetsavia.ru/2015/11/16/sovmeshchennoe-upravlenie-upravlenie-cherez-sau/>>.
2. Tyrva, V.O. “Features of ergatic system joint management of the technical object.” *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017: 438–443.
3. Doronin, A.M., D.A. Romanov, and M.L. Romanova. “Cheloveko-mashinnoe vzaimodeistvie i ego pokazateli.” *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta* 4 (2005): 244–250.
4. Denisov, V.G., and V.F. Onishchenko. *Inzhenernaya psikhologiya v aviatsii i kosmonavtike*. M.: «Mashinostroenie», 1972.
5. Korenev, G.V. *Tsel' i prispособляemost' dvizheniya*. M.: «Nauka», 1974.
6. Pospelov, D.A. *Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika*. M.: Nauka, 1986.
7. Styuart, R., and N. Piter. *Iskusstvennyi intellekt: sovremennyyi podkhod*. 2-d ed. M.: Izdatel'skii dom “Vil'yams”, 2006.
8. Makarov, I.M., V.M. Lokhin, S.V. Min'ko, and M.P. Romanov. *Iskusstvennyi intellekt i intellektual'nye sistemy upravleniya*. M.: Nauka, 2006.
9. Shub, Yosi, Israel E. Ashkenazi, and Alain Reinberg. “Differences between left-and right-hand reaction time rhythms: indications of shifts in strategies of human brain activity.” *Cognitive brain research* 6.2 (1997): 141–146. DOI: 10.1016/S0926-6410(97)00025-6.
10. Tyrva, V.O., and E.B. Yakimov. “Transformirovannye uravneniya dinamiki sudna.” *Materialy mezhdunarodnoi NPK «Vodnye puti Rossii: stroitel'stvo, ekspluatatsiya, upravlenie»*. SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2009: 301–305.
11. Kulibanov, Yu.M., V.N. Bachernikhin, and V.O. Tyrva. “Issledovanie rezhimov dvizheniya sudov proekta 507 pri shlyuzovanii.” *Materialy XXVIII Nauchno-tekhnicheskoi konferentsii LIVTa*. L.: LIVT, 1974: 52–55.
12. Tyrva, V.O. “Optimizatsiya upravleniya dvizheniem sudna v tekhnologicheskom protsesse shlyuzovaniya.” *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy razvitiya transportnoi infrastruktury severnykh territorii»*. Kotlas: GUMRF, 2014: 22–29.

13. Pochemu Su-35 samyi opasnyi istrebitel' v mire? Web. 23 Aug. 2017 <<http://www.kramola.info/vesti/novosti/pochemu-su-35-samy-opasnyy-istrebitel-v-mire>>.

14. Tyrva, V.O. "Coordination of elementary movements of object under the terms of an optimality in the automated electric drive." *Trudy IX Mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016*. Perm': Izd-vo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2016: 215–219.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
v.tyrva@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 14 марта 2018 г.
Received: March 14, 2018.*