

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-189-201

MODELING ACTIONS AND REACTIONS OF ERGATIC SYSTEM WITH ELECTROMECHANICAL CONTROL OBJECT

V. O. Tyrva

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

A method for constructing a model of actions and reactions of the ergatic human-machine system is proposed. Coordinate and parametric uncertainties are taken into account when joint controlling an electromechanical object. It is used to provide information support for the interaction of a human operator and an automaton while joint managing a technical object at the planning and execution levels. As the initial basis, many incomplete representations of elementary motions in the form of normal systems of ordinary differential equations are used. They allow us to describe the dynamics of the ergatic system state by the image point movement along a trajectory in the state space. Actions in the model are expressed through the movements of the human-machine interface controls. Therefore, “naturalness” of the interaction between management partners is achieved, which contributes to the cognitive process of improving and optimizing the management of an object, taking into account the unformalized conditions of the so-called “human factor”. The possibilities of applying clear and interval mappings to clear and interval arguments of the mathematical model of actions and responses in the presence of coordinate and parametric uncertainties are considered. The examples and methods of mathematical and computational transformation of intervals of coordinate and parametric uncertainties into a terminal multidimensional rectangular parallelepiped of uncertainty in the space of phase coordinates are given in the paper. Methods for converting uncertainties include integrating the differential equations of a human-machine system model. Integration is performed for each vertex of a multidimensional rectangular parallelepiped of uncertainty with initial values of phase variables equal to the values of the coordinates of its vertices obtained for the time moment of the end of the previous elementary motion. Illustrative examples of the transformation of uncertainty intervals in a three-dimensional state space are given, and uncertainty rectangles are constructed in the form of projections onto a two-dimensional phase space. The proposed models are technically feasible in the human-machine interface and allow the use of mathematical and computational optimization methods to improve joint management in the ergatic human-machine system.

Keywords: modeling, ergatic system, a human operator, joint control, uncertainty interval.

For citation:

Tyrva, Vladimir O. “Modeling actions and reactions of ergatic system with electromechanical control object.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 189–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-189-201.

УДК 62-50

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ И ОТВЕТНЫХ РЕАКЦИЙ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ УПРАВЛЕНИЯ

В. О. Тырва

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

Предложен способ построения модели действий и ответных реакций эргатической системы «человек-машина» с учетом координатной и параметрической неопределенностей при совместном управлении электромеханическим объектом. Модель предназначена для информационного обеспечения взаимодействия человека-оператора и автомата при совместном управлении объектом на уровнях планирования и исполнения. В качестве исходного базиса модели использовано множество неполных представлений элементарных движений объекта в форме нормальных систем обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяющих описать динамику состояния эргатической системы движением изображающей точки по траектории

в пространстве состояний. Действия в модели выражены через перемещения органов управления человеко-машинного интерфейса. Этим достигается «естественность» взаимодействия партнеров по управлению, способствующая когнитивному процессу совершенствования и оптимизации управления электро-механическим объектом с учетом неформализуемых условий так называемого «человеческого фактора». Рассмотрены возможности применения четких и интервальных отображений к четким и интервальным аргументам математической модели действий и ответных реакций в условиях существования координатной и параметрической неопределенностей. Приведены примеры и способы математического и вычислительного преобразования интервалов координатной и параметрической неопределенностей в терминальный многомерный прямоугольный параллелепипед неопределенности в пространстве фазовых координат. Способы преобразования неопределенностей предусматривают выполнение интегрирования дифференциальных уравнений модели системы «человек-машина» для каждой вершины многомерного прямоугольного параллелепипеда неопределенности с начальными значениями фазовых переменных, равными значениям координат его вершин, полученным для момента времени окончания предшествующего элементарного движения. Приведены наглядные примеры преобразования интервалов неопределенностей в трехмерном пространстве состояний и построены прямоугольники неопределенностей в виде проекций на двумерное фазовое пространство. Предложенные модели технически реализуемы в человеко-машинном интерфейсе, допускают применение математических и вычислительных методов оптимизации для совершенствования совместного управления в эргатической системе «человек-машина».

Ключевые слова: моделирование, эргатическая система, человек-оператор, совместное управление, интервал неопределенности.

Для цитирования:

Тырва В. О. Моделирование действий и ответных реакций эргатической системы с электромеханическим объектом управления / В. О. Тирва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 189–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-189-201.

Введение (Introduction)

Автоматизация управления сложными электромеханическими объектами как процесс перехода от ручного управления к автоматическому и по современным представлениям — к автоматическому управлению с искусственным интеллектом, можно представить с позиций придания управляющему автомату (УА) эргатической системы «человек-машина» (СЧМ) с объектом управления способностей к рассуждениям, планированию и принятию решений. Например, применительно к робототехнической интеллектуальной системе А.С. Ющенко сформулировал основную задачу создания такой системы, которая «состоит в организации взаимодействия и согласования возможностей технической и биологической частей системы с тем, чтобы обеспечить наибольшую эффективность системы в целом» [1, с. 5].

«Проектирование взаимодействия» как научное направление в настоящее время получило интенсивное развитие благодаря работам А. Купера [2] и других зарубежных и отечественных ученых. Для стадий исследования и моделирования взаимодействия технической и биологической частей СЧМ выделены три уровня управления объектом системы: целеуказание, планирование и исполнение. Например, систему «человек-робот» следует рассматривать как «способную взаимодействовать с человеком на всех уровнях, включая уровень постановки целей» [3]. Конечная (стратегическая) цель такой системы — *эргамата* — задается человеком-оператором (ЧО). Эргамата можно представить как систему кооперативной деятельности ЧО и ассистента — УА, т. е. устройства, самостоятельно выполняющего целенаправленные действия [4]. Одной из форм взаимодействия в эргамате является совместное управление (СУ), при котором действия УА связываются с органами управления человеко-машинного интерфейса СЧМ [5]. При такой форме взаимодействия эргамата приобретает свойство «естественности» (с точки зрения человека), т. е. способности обеспечить антропоморфизм технической части системы на когнитивном уровне [3]. Исследования в этом направлении находятся на начальной стадии.

В настоящей работе исследованы возможности использования антропоморфизма УА СЧМ для организации взаимодействия ЧО и УА на уровнях задач планирования и исполнения совместного управления электромеханическим объектом с сосредоточенными параметрами в условиях

неопределенности с целью получения технически реализуемых решений с помощью человеко-машинного интерфейса. Исследование проведено с применением методов интервальной математики в моделировании поведения СЧМ в пространстве состояний при дифференциальных связях фазовых координат СЧМ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Математическое моделирование действий и ответных реакций, выполненное для совместного управления электромеханическим объектом с сосредоточенными параметрами в СЧМ, имеет результатом построение множества неполных представлений движения изображающей точки по траектории в пространстве состояний системы [5]. С помощью систем обыкновенных дифференциальных уравнений — элементов этого множества — представлены результаты мыслительной деятельности человека-оператора, воплощенные в воздействиях на органы управления человеко-машинного интерфейса и ответные реакции машины на эти действия [6]. Исходным условием требуемого обеспечения антропоморфизма технической части СЧМ является установление соответствия между элементами множества неполных представлений движения и целями, побуждающими к действию ЧО. Возможность установления такого соответствия подтвердил, в частности, анализ результатов натурных экспериментов по реализации управляемого движения судов в условиях повышенной опасности [6], [7]. Каждому из выделенных девяти неполных представлений элементарных движений судна, например, рассмотренных в работе [5], относится одна или несколько элементарных целей, связанных как с перемещением органа ручного управления упором движителя, так и с ожидаемым при этом движением судна. Причем в решении каждой терминальной задачи перемещения органа управления и самого судна содержалась реализация последовательности элементарных целей и соответствующих им представлений элементарных движений. Например, выполнению команды «малый ход» соответствует терминальная задача перемещения в определенное положение рукоятки управления упором винта судна из некоторого исходного положения. От исходного положения рукоятки управления гребным двигателем и терминальной цели зависит последовательность элементарных целенаправленных действий и моделирующих их неполных представлений движения из указанного множества, состоящего из девяти элементов.

На этапах планирования и исполнения совместного управления электромеханическим объектом СЧМ приходится решать задачи терминального управления, имея в виду смысл, вложенный Б. Н. Петровым и его коллегами в понятие «терминальность» применительно к бортовым системам летательных аппаратов [8]. В частности, обращается внимание на связь цели и параметров движения: «изменение цели полета космического объекта приводит к изменению параметров уравнений объекта». Отметим также следующую особенность: «программу невозмущенного движения приходится пересчитывать заново при каждой смене цели управления. В этом смысле значительно более удобной оказывается система управления с апостериорно формируемой программой: организация процесса расчета на борту значений параметров оптимального закона управления остается неизменной» [8, с. 15]. Идея построения многорежимной (при различных критериях качества и ограничениях на управления) системы управления основана на создании бортовой библиотеки алгоритмов терминального управления, размещенной в памяти бортовой ЦВМ и перепрограммирования ЦВМ в полете. Каждый из «терминальных» алгоритмов получается в результате синтеза системы, оптимальной в одном данном режиме работы системы.

Для анализа содержания этапов планирования и исполнения «управляемой деятельности» [3] СЧМ СУ воспользуемся предложенным подходом: «в общем случае прогнозирование будущего движения может выполняться путем численного интегрирования уравнений объекта, а процесс управления строиться итеративным путем. При этом, естественно, должна быть решена задача оценки координат состояния системы на основе метода фильтрации результатов наблюдений» [8, с. 15].

С учетом особенностей СУ [6], [9] элементарные операции в модели действий и ответных реакций СЧМ характеризуются множеством $\mathbb{Z}$ неполных представлений элементарных движений

изображающей точки по траектории в едином для всех элементарных операций (движений) пространстве состояний $\{t \times X\}$:

$$\mathbb{Z} = \left\{ \frac{dX}{dt} = F^r(X), r = 1, 2, \dots, R \right\}, \quad (1)$$

где t — время; X — вектор-столбец $[N \times 1]$ фазовых координат x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) СЧМ в модели (1), учитывающей действия ЧО и УА через органы управления человеко-машинного интерфейса.

Все неполные представления элементарных движений, выражаемые обыкновенными дифференциальными уравнениями

$$\frac{dX}{dt} = F^r(X), r \in \overline{1, R}, \quad (2)$$

имеют попарно различные по параметрам вектор-функции правых частей и

$$F^r(X) = \begin{bmatrix} f_1^r(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ f_2^r(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ \vdots \\ f_N^r(x_1, x_2, \dots, x_N) \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} f_1^k(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ f_2^k(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ \vdots \\ f_N^k(x_1, x_2, \dots, x_N) \end{bmatrix} = F^k(X) \quad (3)$$

при $k \neq r$. Структурные различия между $F^r(X)$ и $F^k(X)$ обусловлены моделями конкретных органов управления и действиями человека-оператора и, возможно, внешними и внутренними возмущениями. На стадии исполнения управления переход от $F^r(X)$ к $F^k(X)$ с помощью органа управления осуществляется по дискретному сигналу управления на основе определенной (элементарной) цели. Такой переход можно рассматривать как антропоморфное управление, моделируемое скачкообразным изменением параметров правой части уравнения (2) при изменении цели [8], которое приводит к выполнению новой операции в управляемой деятельности согласно источнику [3], т. е. к выполнению нового элементарного движения и появлению угловой точки на непрерывной траектории движения в пространстве состояний СЧМ при условии (3). В реальной СЧМ подобное управление часто реализуется путем коммутации электрических цепей электромеханической части системы с помощью аппаратов контактной и бесконтактной коммутации, а также кинематических цепей путем подключения-отключения тормозных устройств, механических передач и т. п. При этом изменяются каналы передачи энергии (и информации) в СЧМ, что интерпретируется как изменение структуры технической части СЧМ и связанное с этим управление представляется как структурное управление [9], [10].

Если рассматривать управляемую деятельность СЧМ в прошлом как выполненное движение изображающей точки в пространстве состояний $\{t \times X\}$, то каждой k -й угловой точке траектории соответствует смена одной цели управления на другую цель, в результате достижения предшествующей цели при определенных значениях $t = t_k, x_1 = x_1(t_k), x_2 = x_2(t_k), \dots, x_N = x_N(t_k)$. Если при выборе пространства состояний учесть, в достаточной мере, в представлениях (2) воздействия на объект со стороны органов управления и со стороны внешней среды на СЧМ, то множество (1) можно использовать для описания многоцелевого поведения СЧМ на продолжительном интервале этапа эксплуатации жизненного цикла и, следовательно, отражать эксплуатацию СЧМ с помощью траектории в пространстве состояний.

Экстраполяция траектории как составная часть планирования программного изменения состояния СЧМ может осуществляться на основе предшествующего опыта, отраженного в траектории выполненного движения, и базы знаний с априорными сведениями об адекватности представлений множества (1). В связи с этим следует учесть особенности вычисления функций для четких, интервальных и нечетких данных, основываясь на классификации, приведенной в [11]. Варианты применения вычислительных процедур в зависимости от типа функции f и аргумента x показаны на рис. 1.

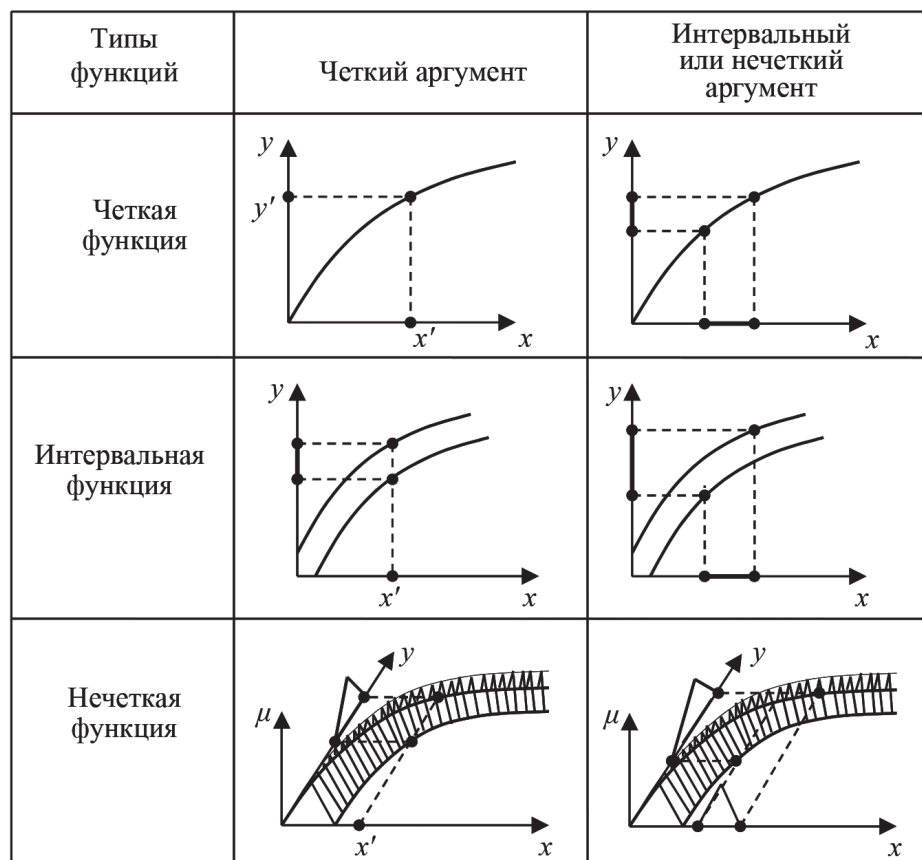


Рис. 1. Вычисление значений четких интервальных и нечетких функций для четких, интервальных и нечетких аргументов с функцией принадлежности μ

Функция f может быть задана в виде отношения на декартовом произведении $X \times Y$ с аргументом $x \in X$ и значением $y \in Y$. Вычисление функции для заданного значения входной переменной выполняется за три шага вне зависимости от типа функции и данных (четких, интервальных, нечетких):

- задание значения входной переменной x в пространстве $X \rightarrow Y$ (вертикальные пунктирные линии на рис. 1);
- нахождение пересечения с отношением;
- проекция этого пересечения на Y (горизонтальная пунктирная линия).

На основе применения приема трехшагового вычисления функции предусмотрим оценку точности прогнозирования (экстраполяции) траектории изменения состояния СЧМ по исходной модели (1) с учетом:

- параметрической неопределенности вектор-функции $F^r(X)$ ($r \in \overline{1, R}$);
- координатной неопределенности вектора фазовых координат X .

Результаты (Results)

Рассмотрим возможности оценки точности прогнозирования состояния технической части СЧМ для элементарной операции на основе интервальных методов. Математические модели построим на примере объекта, электрическая схема которого показана на рис. 2, а.

Источник электрической энергии создает электродвижущую силу E . По электрической цепи с индуктивностью L и активным сопротивлением R протекает электрический ток i при замыкании контакта S в некоторый момент времени $t = t_{r-1}$. На рассматриваемом интервале времени $[t_{r-1}, t_r]$ параметры L , R и E не изменяют свои значения. Замыкание контакта отождествляется с дискретным сигналом управления в СЧМ совместного управления.

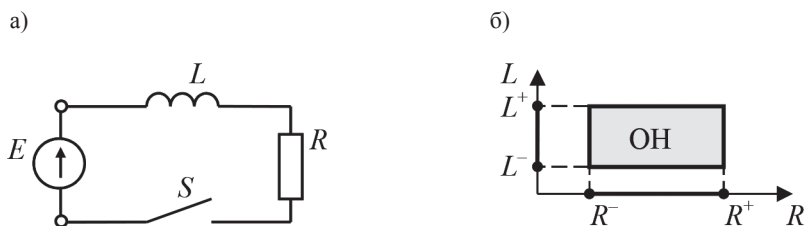


Рис. 2. Электрическая схема объекта СЧМ (а)
и область неопределенности ОН значений параметров (б)

Неполное представление (2) в явном виде при $X = i$ получаем, используя для расчета схемы (рис. 2, а) законы электротехники. Имеем:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}E. \quad (4)$$

Разные причины появления координатной интервальной неопределенности (КИН):

$$[i(t)] = \{i(t) : i^-(t) \leq i(t) \leq i^+(t)\} \quad (5)$$

при $t \in [t_{r-1}, t_r]$ представлены на рис. 3 на основе интегрирования дифференциального уравнения (4).

В первом сегменте рис. 3 с помощью графика показано, что при наличии параметрической интервальной неопределенности (ПИН) $[L] = \{L : L^- \leq L \leq L^+\}$ (рис. 2, б) параметра (индуктивности) L величина $\delta i(t) = |i^+(t) - i^-(t)|$ КИН (5) координаты $i(t)$ сначала увеличивается, а затем уменьшается, стремясь к нулю при $t_r \rightarrow \infty$. На больших интервалах времени $[t_{r-1}, t_r]$ ПИН $[L]$ оказывает незначительное влияние на результат элементарной операции, что оправдывает применение уравнения (4) по варианту «четкий аргумент – четкая функция» (см. рис. 1). В этом случае, если $t_r \gg t_{r-1}$, то

$$i(t_{r-1}) \rightarrow i(t_r) \cong \frac{1}{R}E$$

при любом значении параметра $L \in [L^-, L^+]$.

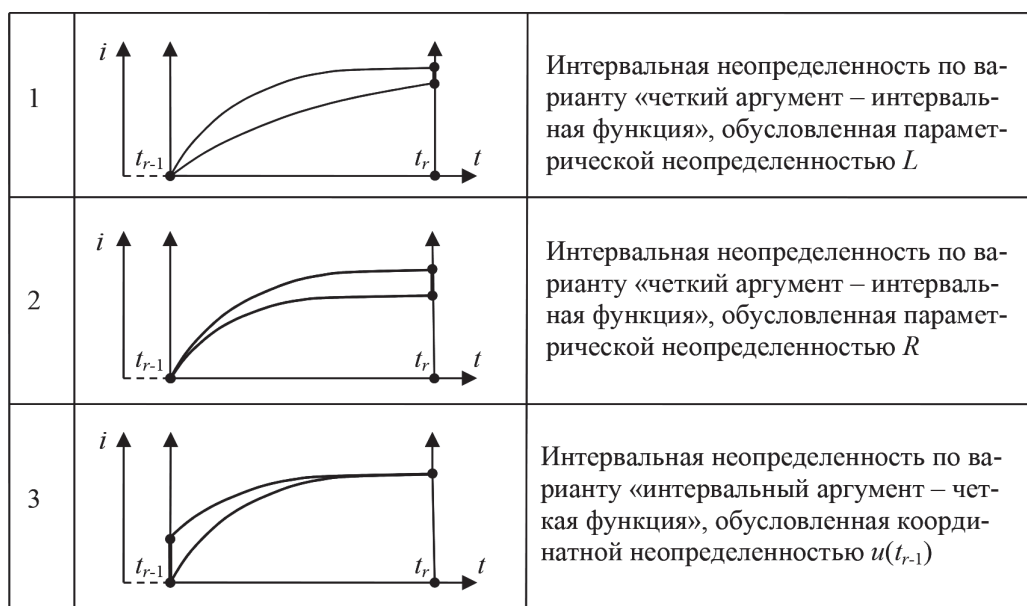


Рис. 3. Интервальные неопределенности элементарной операции

Во втором сегменте рис. 3 график показывает, что при наличии ПИН $[R] = \{R : R^- \leq R \leq R^+\}$ (см рис. 2, б) величина $\delta i(t)$ монотонно увеличивается при $t_r \rightarrow \infty$ до некоторого постоянного значе-

ния, отличного от нуля. В этом случае для большого интервала времени $[t_{r-1}, t_r]$ ПИН $[R]$ оказывает влияние на прогнозируемый результат элементарной операции, что означает оправданность применения уравнения (4) по варианту «четкий аргумент – интервальная функция» согласно рис. 1:

$$i(t_{r-1}) \rightarrow [i(t_r)] = \left\{ i(t_r) : \frac{1}{R^+} E \leq i(t_r) \leq \frac{1}{R^-} E \right\},$$

если $t_r \gg t_{r-1}$ и $R \in [R^-, R^+]$.

В третьем сегменте рис. 3 график показывает, что величина $\delta i(t)$ координатной интервальной неопределенности (КИН) $[i(t_{r-1})]$ начального состояния координаты $i = i(t_{r-1})$ при $t > t_{r-1}$ монотонно убывает до нуля, когда $t_r \rightarrow \infty$. На больших интервалах времени $[t_{r-1}, t_r]$ координатная неопределенность $[i(t_{r-1})]$ оказывает незначительное влияние на прогнозируемый результат элементарной (терминальной) операции, что означает оправданность применения уравнения (4) по варианту «интервальный аргумент – четкая функция»:

$$[i(t_{r-1})] = \{ i(t_{r-1}) : i^-(t_{r-1}) \leq i(t_{r-1}) \leq i^+(t_{r-1}) \} \rightarrow i(t_r) \cong \frac{1}{R} E$$

при $t_r \gg t_{r-1}$.

В работе [12] Н. В. Скибицким и Н. В. Севальевым на примере линейной модели системы второго порядка с кусочно-постоянной функцией управления (модель может быть сведена к множеству типа (1) в линейной форме) показано, что если система имеет произвольный порядок N и линейна, а область начальных состояний описывается N -мерным прямоугольным параллелепипедом, то область прогноза состояний на множестве возможных начальных состояний представляет собой N -мерный параллелепипед и не существует единственного управления, гарантирующего точный перевод системы при любых возможных начальных состояниях из заданной области в точно заданное конечное состояние. При этом для построения указанной области прогноза достаточно определить значения состояний системы как функцию только начальных состояний, расположенных в вершинах N -мерного прямоугольного параллелепипеда, задающего множество возможных начальных состояний системы.

Резюмируя ранее изложенное, будем полагать, что элементарной операции поставлено в соответствие неполное представление движения (2), в котором выделено множество A^r параметров $a_1^r, a_2^r, \dots, a_{M(r)}^r$, ПИН $[a_1^r], [a_2^r], \dots, [a_{M(r)}^r]$ которых учитывается при прогнозе терминального состояния, характеризуемого координатной неопределенностью вектора X :

$$[X(t_r)] = \begin{bmatrix} [x_1(t_r)] \\ [x_2(t_r)] \\ \vdots \\ [x_N(t_r)] \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $M(r)$ — количество параметров с интервальными неопределенностями в r -м неполном представлении из множества (1).

Будем также считать, что используются такие представления элементарных движений (2), у которых:

- вектор-функция $F^r(X)$ в уравнении (2) дифференцируема по X при любом $r \in \overline{1, R}$;
- вектор $X(t_r)$ дифференцируем по параметрам множества A^r ;
- интервал неопределенности каждого параметра a_j^r ($j \in \overline{1, M(r)}$) множества A^r определяется абсолютной погрешностью Δa_j^r (является метрологической характеристикой), поэтому

$$[a_j^r] = \{ a_j^r : \bar{a}_j^r - \Delta a_j^r \leq a_j^r \leq \bar{a}_j^r + \Delta a_j^r \}, \quad (7)$$

где $\bar{a}_j^r$ — номинальное (например, измеренное) значение параметра a_j^r , используемого в вектор-функции $F^r(X)$ (детерминированной модели) для прогноза номинального состояния системы $X(t_r)$ в момент t_r . Такой прогноз осуществляется в соответствии с «гипотезой полной определенности»

по Н. Н. Моисееву [13] путем интегрирования уравнения (2) при номинальных значениях параметров и фазовых координат. Оценка точности прогноза производится по величине ИН $[x_i(t_r)]$ каждой фазовой координаты $x_i(t_r)$ ($i \in \overline{1, N}$) в момент t_r окончания r -й элементарной операции. Эти ИН координат представляются как ребра N -мерного прямоугольного параллелепипеда неопределенности, определяющего область неопределенности (ОН) $V_X(t_r)$ прогнозирования состояния СЧМ на момент t_r .

Таким образом, если учитываются интервальные неопределенности значений параметров и фазовых координат, то в процесс прогнозирования изменения состояния СЧМ в каждой элементарной операции вводятся две составляющие, требующие выполнения вычислений по варианту «четкий аргумент – четкая функция» (см. рис. 1), возлагаемых на УА, а именно:

- интегрирование уравнения (2) на соответствующем интервале $[t_{r-1}, t_r]$ при номинальных значениях параметров $a_1^r, a_2^r, \dots, a_{M(r)}^r$ и начальных значениях координат вектора $X(t_{r-1})$, полученных на правом конце интервала времени предыдущей элементарной операции; результатом является построение программной траектории в пространстве состояний $\{t \times X\}$ на интервале времени $[t_{r-1}, t_r]$ и получение четкого (программного) значения $X(t_r)$ на ее правом конце $t = t_r$ в элементарной операции;
- интегрирование уравнений (2) в количестве $2^{N+M(r)}$ на интервале $[t_{r-1}, t_r]$ при различных комбинациях граничных значений параметров (7), соответствующих вершинам области неопределенности (ОН) этих параметров, выполняемое для каждого начального значения $X(t_{r-1})$ на множестве начальных значений, соответствующих вершинам N -мерного прямоугольного параллелепипеда неопределенности вектора $X(t_{r-1})$, построенного для момента времени $t \rightarrow t_{r-1}$ окончания предыдущей элементарной операции; результатом является множество множеств ИН фазовых координат, объединение которых по осям фазовых координат по правилам интервальной математики:

$$[x_i] = [a_i] \cup [b_i] = \left[x_i : x_i^- = \min(a_i^-, b_i^-) \leq x_i \leq x_i^+ = \max(a_i^+, b_i^+) \right], i \in \overline{1, N},$$

приводит к интервалам, определяющим ребра N -мерного прямоугольного параллелепипеда неопределенности вектора $X(t_r)$.

Примеры выделенных составляющих процесса расчета прогнозируемого результата выполнения элементарной операции приводятся на рис. 4 в трехмерном пространстве состояний $\{t \times x_1 \times x_2\}$ при $N = 2$.

Фрагмент программы на рис. 4 отображен программной траекторией $X(t)$ на интервале времени $[t_{r-1}, t_r]$, а также отрезками траектории слева (при $t < t_{r-1}$) и справа (при $t > t_r$) от этого интервала. Угловые точки программной траектории показаны для концов интервала, длина которого τ_r характеризует глубину прогноза элементарной операции по представлению (2). Через $V_X(t_{r-1})$ и $V_X(t_r)$ обозначены области начальной и конечной неопределенности фазовых координат, которые в рассматриваемом случае имеют форму прямоугольника (тоновые участки на рис. 4). Показаны также проекции программной траектории (так называемый *фазовый портрет*) и проекции областей неопределенности и концов траекторий на плоскость с осями координат $0x_1x_2$. Стрелками на пунктирных линиях показаны направления, по которым выполнено построение интервалов и областей неопределенности. Большой пунктирной стрелкой на рис. 4, в заменено множество траекторий от $V_X(t_{r-1})$ к $V_X(t_r)$ ($4 \cdot 2 = 8$ траекторий), получаемых при интегрировании уравнения (2) с начальными условиями в вершинах $V_X(t_{r-1})$ и значениями a_r^- и a_r^+ некоторого параметра a_r с интервальной неопределенностью $[a_r]$, оказывающей влияние на область $V_X(t_r)$ в соответствии с рис. 4, а. Из каждой вершины области $V_X(t_{r-1})$ на рис. 4, в исходят две траектории: одна при $a_r = a_r^-$, другая при $a_r = a_r^+$. Построение области неопределенности $V_X(t_r)$ на рис. 4, б выполнено при условии $M(r) = 0$.

Области неопределенности $V_X(t_r)$ на рис. 4, а–в построены по краевым точкам интервалов на осях $0x_1$ и $0x_2$, полученным в результате объединения интервалов ПИН и КИН в виде проекций на соответствующие оси. В этом примере прогнозирование состояния СЧМ в конце элементарной операции, учитывающее ПИН и КИН, основано на интегрировании $1 + 8 = 9$ уравнений вида (2). Результатом является получение информации о программном (номинальном) состоянии СЧМ $\{x_1(t_r) = \bar{x}_1(t_r), x_2(t_r) = \bar{x}_2(t_r)\}$ в конце элементарной операции и точности прогнозирования этого состояния в форме интервальных значений фазовых координат $[x_1(t_r)], [x_2(t_r)]$.

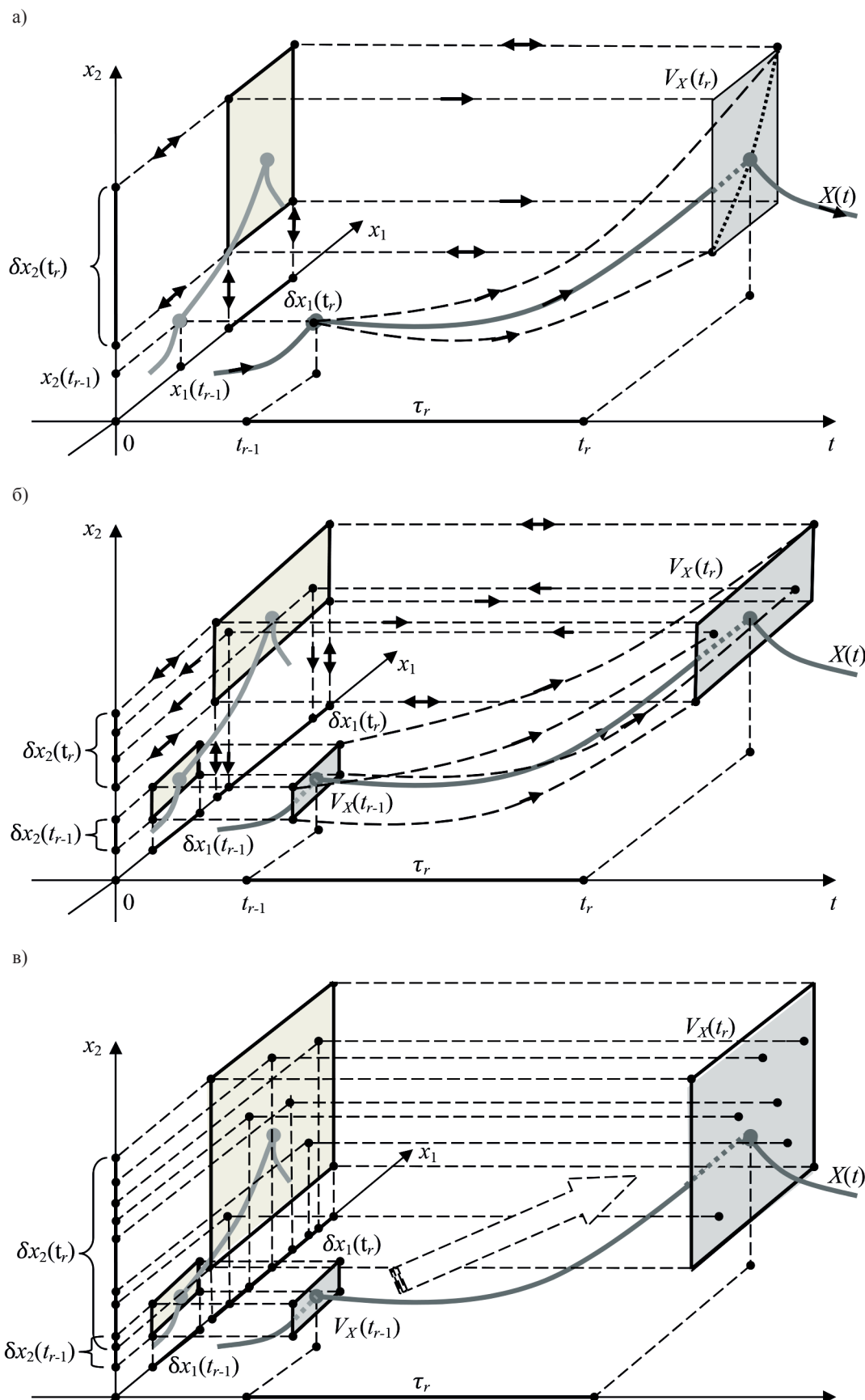


Рис. 4. Примеры расчетов результата выполнения элементарной операции в условиях:
а — параметрической интервальной неопределенности при $M(r) = 1$;
б — координатной интервальной неопределенности при $M(r) = 0$;
в — параметрической и координатной неопределенностей при $M(r) = 1$

Полное количество $P(r)$ интегрируемых на интервале $[t_{r-1}, t_r]$ дифференциальных уравнений вида (2) при произвольных значениях N и $M(r)$ составляет

$$P(r) = 1 + 2^{N+M(r)}. \quad (8)$$

Обсуждение (Discussion)

А. С. Ющенко в статье [1] подробно описал способы организации взаимодействия ЧО и робота через человеко-машинный интерфейс при реализации ситуационного управления [14]. Поэтому не повторяя сделанных в работе выводов и предложений, отметим значимую особенность подхода к конструированию управления в СЧМ по множеству (1) на всех уровнях управления, подкрепив его заключением из статьи [1, с. 8]: «робототехнические и мехатронные системы, в которых используются естественные представления человека о внешнем мире и естественные для оператора описания выполняемых в нем действий, могли бы найти широкое применение». В этой связи диалог ЧО с УА, основанный на принципе СУ, моделируемого множеством (1), в максимальной степени адаптирован для ЧО, так как УА предлагает действия, выражаемые через органы управления, за перемещениями которых стоят «естественные» для ЧО цели управления. Эта особенность отличает постановку и решение задач планирования и исполнения совместного управления от классических задач программного управления и синтеза управления [13]. Она заключается в том, что вариационная задача расчета оптимального программного управления, решение которой (если удастся его получить для нелинейной модели) непосредственно трудно технически реализуемо, заменяется на более простую задачу параметрической оптимизации моментов времени смены элементарных операций, за которыми стоят ясные цели антропоморфного управления в форме дискретных технически реализуемых сигналов управления.

Давно известны трактовки задач оптимального управления, которые позволяют рассматривать их как задачи параметрической оптимизации моментов смены элементарных движений в определенной сообразно «здоровому смыслу» последовательности. Например, оптимальное управление скоростью движения тепловоза по перегону выражается последовательностью из пяти элементарных движений: разгон с ограничением ускорения, движение с ускорением на максимальной мощности двигателя, движение с заданной скоростью, свободный выбег, торможение механическим тормозом [15]. В примере с «оптимальным решением таксиста» [16] движение автомобиля между перекрестками с остановкой у светофора представлено последовательностью из трех составляющих: разгон с максимальным ускорением, движение с ограниченной скоростью, торможение. Похожая задача терминального управления движением судна рассмотрена в [5].

В экспериментах ускоренного ввода судна в камеру шлюза была испытана реализация последовательности из четырех элементарных движений [5]. Однако попытка управляемого ввода судна в камеру шлюза и остановки в заданном месте по последовательности из четырех элементарных движений в экспериментах не увенчалась успехом из-за «человеческого фактора». Эксперименты и проведенные исследования показали, что при программировании и реализации управления в СЧМ «человеческий фактор» необходимо учесть в последовательности неполных представлений элементарных движений по множеству (1), в ограничениях, накладываемых на элементарные движения, в оценках точности выполнения программных движений. Построение временной последовательности таких операций является результатом диалога ЧО с УА. В ходе диалога с УА оператор корректирует расчетные значения моментов времени подачи дискретных сигналов управления, например, на основе решения уравнений чувствительности. Для такой процедуры получены необходимые условия оптимальности моментов действия дискретных сигналов управления и предложены математические модели для коррекции дискретных сигналов управления [17], которые используются для пошагового продвижения к оптимуму в расчетах, как это предложено в работе [8] «итеративным путем» с применением градиентного метода вычислений, например, в соответствии с [18].

Программное управление не предусматривает использования информации об измененных значениях фазовых координат (по определению). Рассчитанная УА программа изменения состояния СЧМ может быть точно реализована в редких случаях, когда отмеченные ранее неопределенности настолько малы, что ими можно пренебречь. В условиях существенных неопределенностей программное управление должно быть построено с учетом неопределенностей так, чтобы повысить реалистичность программы. Таким образом, при конструировании программного управления в СЧМ с учетом параметрической и координатной неопределенностей требуется расширение множества (1) неполных представлений элементарных операций без структурного изменения каждого представления (2). Параметрическая неопределенность по $M(r)$ параметрам будет раскрыта при прогнозировании терминального состояния СЧМ, если помимо уравнения (2) с номинальными значениями параметров используются для интегрирования еще $P_A(r) = 2^{M(r)}$ дифференциальных уравнений, записанных для различных комбинаций граничных значений интервалов неопределенностей, выраженных в соответствии с (7).

Информация о неопределенности прогнозируемого изменения состояния СЧМ для каждой угловой точки траектории может быть использована и ЧО и УА для коррекции программы до ее исполнения. К тому же в случае недопустимого возрастания неопределенности программной траектории на стадии исполнения могут быть определены моменты или интервалы времени для проведения апостериорного формирования программы в соответствии с предложением, изложенным в [8]. Для этого имеются две возможности: 1) сдвигаются моменты времени подачи дискретных сигналов управления относительно рассчитанных ранее значений с сохранением априорной последовательности действий ЧО или / и УА; 2) производится изменение спланированной последовательности действий, а значит, последовательности неполных представлений (2) и элементарных движений, и выполняются расчеты значений моментов времени подачи дискретных сигналов управления на исполнительную часть СЧМ для реализации апостериорной программы.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование показывает, что повышению качества совместного управления электромеханическим объектом с сосредоточенными параметрами в СЧМ на уровнях планирования и исполнения способствует получение и использование информации о параметрической и координатной неопределенностях описания элементарных движений объекта, представленных моделью в форме (1) и (2). Обмен информацией между ЧО и УА с учетом неопределенностей приобретает свойство «естественности» благодаря антропоморфизму совместного управления, при котором цели управления отдельными элементарными движениями объекта СЧМ связываются с перемещениями органов управления человеко-машинного интерфейса системы.

Предложены и проиллюстрированы в графическом виде способы представления и построения координатной неопределенности в форме многомерного прямоугольного параллелепипеда как терминального неопределенного состояния СЧМ в пространстве фазовых координат. Построение осуществлено с привлечением методов интервальной математики, что позволило учесть помимо координатной неопределенности также параметрическую неопределенность неполного представления управляемого движения сложного электромеханического объекта и органов управления СЧМ.

Показано, что в зависимости от конкретного вида неполного представления элементарного движения (2) координатная неопределенность, по мере увеличения времени прогнозирования состояния СЧМ, может увеличиваться неограниченно, может стремиться к некоторому постоянно (интервальному) значению, а также может стремиться к нулю. В любом случае для повышения точности прогнозирования состояния СЧМ в результате уменьшения неопределенности на конечном интервале времени важно располагать и использовать решение задачи оценки координат состояния системы в соответствии с [8].

Взаимодействие ЧО и УА и совместное управление электромеханическим объектом СЧМ на основе предложенных моделей технически реализуемо и допускает применение математических и вычислительных методов оптимизации для совершенствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ющенко А. С. Человек и робот — совместимость и взаимодействие / А. С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика. — 2014. — № 1 (2). — С. 4–9.
2. Купер А. Алан Купер об интерфейсе. Основы проектирования взаимодействия / А. Купер, Р. Рейман, Д. Кронин; Пер. с англ. — СПб.: СимволПлюс, 2009. — 688 с.
3. Ющенко А.С. Ситуационное управление и робототехника // Материалы III Пospelovских чтений «Искусственный интеллект сегодня. Проблемы и перспективы». — М., 2007. [Электронный ресурс] / А. С. Ющенко. — Режим доступа: <http://www.posp.raai.org/?arch> (дата обращения: 28.10.2019).
4. Saushev A. Joint control actions on electromechanical devices in ergatic systems / A. Saushev, V. Tyryva, L. Kovtun // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2019. — Vol. 135. — Pp. 01006. DOI: 10.1051/e3s-conf/201913501006/.
5. 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.
6. Tyryva V.O. Automation Elements of Mental Activity and Actions of Human Operator in Ergatic System “Man-Machine” / V.O. Tyryva, A.V. Saushev, O.V. Shergina // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501665.
7. 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 им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 22–29.
8. 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.
9. Воробьев А. В. Концепция построения эргатического интерфейса многофункционального авиационного комплекса с интегрированной модульной авионикой / А. В. Воробьев, М. М. Сильвестров, Ю. И. Бегичев, Л. О. Котицын, Д. Н. Левин // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2019. — Т. 20. — № 1. — С. 59–64. DOI: 10.17587/mau.20.59-64.
10. Саушев А. В. Параметрический синтез электромеханических систем / А.В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2013. — 315 с.
11. Борисов В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федюлов. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 284 с.
12. Скибицкий Н. В. Интервальные модели в задачах оптимального управления с дифференциальными связями / Н. В. Скибицкий, Н. В. Севальнев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2015. — Т. 81. — № 11. — С. 66–72.
13. Моисеев Н. Н. Элементы теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры), 1975. — 527 с.
14. Терехин Д. Э. Системы ситуационного управления на основе технологий SemanticWeb / Д. Э. Терехин, А. Ф. Тузовский // Знания – Онтологии – Теории (ЗОНТ-2015): Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Российская АН, Сиб. отд.; Ин-т математики им. С. Л. Соболева. — Новосибирск: ООО «Технотрейд», 2015. — Т. 2. — С. 151–155.
15. Баранов Л. А. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь. — М.: МИИТ, 2011. — 164 с.
16. Растринин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами / Л. А. Растринин. — М.: Сов. радио, 1980. — 232 с.
17. Тырва В. О. Применение математических моделей для коррекции дискретных сигналов управления объектом эргатической системы / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 171–178.
18. Allen-Zhu Z. The lingering of gradients: how to reuse gradients over time / Z. Allen-Zhu, D. Simchi-Levi, X. Wang // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2018. — Pp. 1244–1253.

REFERENCES

1. Yuschenko, A.S. “Human-robot: compatibility and cooperation.” *Robotics and technical cybernetics* 1(2) (2014): 4–9.

2. Cooper, Alan, Robert Reimann, and Dave Cronin. *About Face 3. The Essentials of Interaction Design*. Wiley, 2007. 648 p.
3. Yushchenko, A. S. "Situatsionnoe upravleniye i robototekhnika." *Materialy III Pospelovskikh chtenii «Iskusstvennyi intellekt segodnya. Problemy i perspektivy»*. M., 2007. Web. 28 Oct. 2019 <<http://www.posp.raai.org/?arch>>.
4. Saushev, Alexandr, Vladimir Tyrva, and Lev Kovtun. "Joint control actions on electromechanical devices in ergatic systems." *E3S Web of Conferences*. Vol. 135. EDP Sciences, 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201913501006/
5. 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.
6. Tyrva, Vladimir O., Aleksander V. Saushev, and Olga V. Shergina. "Automation Elements of Mental Activity and Actions of Human Operator in Ergatic System "Man-Machine"." *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501665
7. Tyrva, V. O. "Optimizatsiya upravleniya dvizheniem sudna v tekhnologicheskoy protsesse shlyuzovaniya." *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy razvitiya transportnoi infrastruktury severnykh territorii»*. Kotlas: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2014. 22–29.
8. Petrov, B. N., A. Ya. Andrienko, V. P. Ivanov, and Yu. P. Portnov-Sokolov. "Problemy gibkosti i nadezhnosti upravleniya v teorii bortovykh terminal'nykh sistem." *Avtomatika i telemekhanika* 2 (1981): 15–24.
9. Vorobyov, A. V., M. M. Silvestrov, Y. I. Begichev, L. O. Kotitsyn, and D. N. Levin. "Concept of Construction of Ergatic Interface of Multifunctional Aviation Complex with Integrated Modular Avionics." *Mechatronics, automation, control* 20.1 (2019): 59–64. DOI: 10.17587/mau.20.59-64
10. Saushev, A. V. *Parametricheskii sintez elektromekhanicheskikh sistem*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2013.
11. Borisov, V. V., V. V. Kruglov, and A. S. Fedulov. *Nechetkie modeli i seti*. M.: Goryachayaliniya-Telekom, 2007.
12. Skibitskiy, N. V., and N. V. Sevalnev. "Interval models in optimal control problems." *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials* 81.11 (2015): 66–72.
13. Moiseev, N. N. *Elementy teorii optimal'nykh sistem*. M.: «Nauka» Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1975.
14. Terekhin, D. E., and A. F. Tuzovskii. "Sistemy situatsionnogo upravleniya na osnove tekhnologii Semantic Web." *Znaniya - Ontologii - Teorii (ZONT-2015): Materialy Vserossiiskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Rossiiskay akademiya nauk, Sibirskoe otdelenie; Institut matematiki im. S. L. Soboleva*. Vol. 2. Novosibirsk: OOO «Tekhnoreid», 2015. 151–155.
15. Baranov, L. A., E. V. Erofeev, I. S. Meleshin, and L. M. Chin'. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov*. M.: MIIT, 2011.
16. Rastrigin, L. A. *Sovremennye printsipy upravleniya slozhnyimi ob'ektami*. M.: Sov.radio, 1980.
17. Tyrva, V. O. "Application of mathematical models for correction of discrete signals of management by object of ergatic system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 171–178.
18. Allen-Zhu, Zeyuan, David Simchi-Levi, and Xinshang Wang. "The lingering of gradients: how to reuse gradients over time." *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2018. 1244–1253.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2019 г.
Received: December 16, 2019.