

УДК 62-52

doi:10.31799/1684-8853-2019-1-23-31

Безопасное управление SEMS при групповом взаимодействии

А. Е. Городецкий^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-3465-4438

В. Г. Курбанов^{а, б}, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-2450-9341, vugar.kurbanov@gmail.com

И. Л. Тарасова^{а, в}, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-2282-150X

^аИнститут проблем машиноведения РАН, Большой пр. В. О., 61, Санкт-Петербург, 199178, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,

Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

^вСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, РФ

Постановка проблемы: при управлении группой взаимодействующих интеллектуальных электромеханических систем могут возникать ситуации, когда инструкции оператора и (или) система автоматического управления более высокого уровня будут противоречить внутреннему состоянию управляемых интеллектуальных электромеханических систем и (или) окружению выбора. Устранить такие обстоятельства можно с помощью алгоритмов проверки выполнения условий допустимости движений, которые могут опираться на моделирование поведения интеллектуальных электромеханических систем с использованием логико-вероятностных и логико-лингвистических описаний ситуаций и на не скалярные критерии качества при принятии решений. **Цель:** разработка алгоритмов безопасного управления роботами на основе модулей интеллектуальных электромеханических систем с фазовыми ограничениями при неполной определенности окружающей среды. **Результаты:** разработаны алгоритмы безопасного управления тремя роботами с использованием математического описания задачи ситуационного управления группой интеллектуальных электромеханических систем и методологии организации ситуационного управления группой мобильных интеллектуальных электромеханических систем. Суть алгоритмов заключается в перемещении роботов из некоторых текущих позиций в заданные терминальные положения без столкновения между собой. Во избежание столкновений система принятия решений в центральной нервной системе роботов использует приоритеты роботов, основанные на расстоянии между роботами. Предложен подход преодоления неопределенности на пути (траектории) роботов. При этом рассматриваются неопределенности в виде ограничений логико-вероятностного и логико-лингвистического типа. Показано, что эти ограничения можно перевести в логико-интервальный вид. Это позволяет использовать стандартные процедуры математического программирования при поиске оптимального решения. **Практическая значимость:** полученные алгоритмы можно использовать для принятия решений в центральной нервной системе и при управлении роботами.

Ключевые слова — безопасное управление, интеллектуальные роботы, умные электромеханические системы, групповое ситуационное взаимодействие, динамическое пространство конфигураций, центральная нервная система.

Для цитирования: Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Безопасное управление SEMS при групповом взаимодействии. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 1, с. 23–31. doi:10.31799/1684-8853-2019-1-23-31

For citation: Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G., Tarasova I. L. Safe control of SEMS in group interaction. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 1, pp. 23–31 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-1-23-31

Введение

Проблема оптимизации взаимодействия группы роботов при выполнении совместной задачи требует учета сложности и интеллектуальности технических систем управления роботами, обеспечивающими постоянное расширение сферы деятельности подобных робототехнических систем (РТС). В сложных РТС, строящихся на основе умных электромеханических систем (Smart ElectroMechanical Systems — SEMS) [1], необходимо анализировать поведение не только отдельного робота, обладающего благодаря наличию центральной нервной системы (ЦНС) [2] целесообразным поведением, но и поведение взаимодействующей группы роботов, функции которых тесно взаимосвязаны в так называемой «малой группе». Эта группа может быть транспортными

средствами, осуществляющими согласованные движения, группой роботов-сборщиков, выполняющих совместные операции, и т. п. [3–5]. При создании таких групп специалисты сталкиваются с широким кругом проблем, к которым относятся такие, как оценка способности группы к правильному принятию решений в условиях неопределенности, определение оптимального количества членов группы, оценка совместимости членов группы с учетом статических и динамических особенностей каждого робота, учет особенностей принятия решения в ЦНС отдельных роботов и др.

При оценке интеллекта ЦНС робота необходимо провести его компьютерное моделирование с идентификацией и оценкой принимаемых решений в сложных динамических системах в условиях неполной определенности [6]. При этом

используется статистическое моделирование их динамического поведения.

Для создания будущего человечества, которое заполнят роботы и всякие «умные» системы, требуется, чтобы эти роботы и системы искусственного интеллекта имели «инстинкты», позволяющие им избегать столкновений с препятствиями и друг с другом во время движения. Однако если эти инстинкты будут чересчур сильны, роботы будут слишком медлительными, что отрицательно скажется на эффективности их действий. Для решения описанной проблемы надо разработать алгоритм, который будет постоянно стремиться найти оптимальный баланс между скоростью и безопасностью, что позволит роботам всегда действовать с высокой эффективностью.

Предотвращение столкновений — это главный аспект работы систем всех транспортных средств и других робототехнических устройств, способных передвигаться полностью самостоятельно, в автоматическом режиме. Некоторые из разработчиков систем управления для автомобилей-роботов умышленно позволяют им совершать мелкие нарушения правил движения в случае обнаружения опасности столкновения.

Кроме того, задача управления группой роботов обладает дополнительной сложностью из-за необходимости обеспечивать координацию между роботами. В сложных робототехнических системах каждый робот должен удовлетворять своим кинематическим уравнениям, а также существующим фазовым ограничениям, включая динамические ограничения, обеспечивающие отсутствие столкновений между роботами.

Принципы управления живучестью

Безопасное управление тесно связано с управлением живучестью, алгоритмы которой входят в математическое обеспечение интеллектуальных роботов. В этом случае поведение SEMS может корректироваться за счет гибкой реакции входящей в систему автоматического управления (САУ) системы автоматического управления живучестью на резкие изменения во времени внешних условий и внутреннего состояния самой SEMS. Наиболее изученными и часто встречающимися задачами управления живучестью являются адаптация, горячее резервирование, компенсации и заимствования. Менее изучены и реже встречаются задачи стресса и ступора или включения аварийного режима. В процессе развития САУ роботов и их интеллектуализации стали появляться новые режимы их функционирования. В частности, роботы, создаваемые на основе SEMS, способны работать в составе группы роботов под управлением оператора или

САУ более высокого уровня [7]. При этом могут возникать ситуации, когда инструкции оператора и (или) САУ более высокого уровня будут противоречить внутреннему состоянию самой SEMS. Другой, не менее сложной задачей является построение алгоритмов проверки выполнения условий, которые, по всей вероятности, должны опираться на моделирование поведения SEMS при выполнении предлагаемых инструкций оператора и (или) инструкций системы управления верхнего уровня. При этом желательно, чтобы создаваемые алгоритмы могли учитывать возможную быструю деградацию SEMS и заблаговременно включать механизмы управления живучестью с выдачей сообщений на верхний уровень группового управления о нежелательности либо опасности предлагаемых инструкций поведения.

Методы безопасного управления при групповом взаимодействии

Проблема группового управления — это глобальная проблема, актуальная для многих сфер жизни. Везде, где существует некоторая группа живых или технических объектов, которые должны совместными усилиями выполнять некоторую работу или решать некоторую задачу, возникает проблема группового управления или группового взаимодействия. В технической области проблема группового управления наиболее актуальна в робототехнике. Для решения многих практических задач могут эффективно использоваться группы роботов. Как правило, при решении различных задач роботы функционируют в неорганизованной или плохо организованной, недетерминированной среде.

При решении задач управления групповым взаимодействием роботов большое внимание уделяется вопросам их самоорганизации и поддержания динамического равновесия (гомеостазиса) внутри группы. Например, решение задач формирования формаций [8], отработки согласованных движений [9–12], совместного поиска и транспортировки объектов [13] и др. Однако рассматриваемые в этих задачах механизмы не гарантируют полноту инструментария, который необходим для решения всех задач, которые ставятся перед группой. Требуется еще один уровень управления, который являлся бы интерфейсом между группой и оператором, ставящим целевые задачи [14, 15], и который можно отнести к оптимизационным задачам ситуационного управления [16, 17].

Для достижения конкретной цели, стоящей перед группой роботов, в случае детерминированной среды каждый робот может выполнять заранее определенную последовательность дей-

ствий (алгоритм 1). В случае же недетерминированной среды эта последовательность должна быть найдена системой управления группой роботов в процессе достижения цели (алгоритм 2, алгоритм 3).

Среди всех задач взаимодействия роботов можно выделить задачу группового управления роботами, одно из центральных мест в которой занимает исключение столкновений роботов.

Необходимость сопоставления различных траекторий (сценариев развития) между собой, а также ограничения со стороны практической реализуемости алгоритмов обработки данных об объектах и среде приводят к тому, что область определения характеристик состояния тем или иным способом дискретизируется, например переводится в логическую форму за счет фазсификации данных, а затем анализируется с использованием алгебраизации логических выражений [18] и методов математического программирования в порядковых шкалах или обобщенного математического программирования [19].

Сначала надо синтезировать одну систему управления для стабилизации робота относительно некоторой точки пространства состояний с фазовыми ограничениями. Затем надо искать оптимальные траектории движения роботов в виде точек пространства состояний для движения роботов из различных начальных условий в заданные конечные положения.

Создание и развитие систем ситуационного управления требует больших затрат ресурсов на сбор сведений об объектах и среде управления, их динамики, способах управления, а также на систематизацию этих сведений в рамках семиотической модели. Поэтому считается, что метод ситуационного управления целесообразно применять только в случаях, когда другие методы формализации приводят к задаче слишком большой (для практической реализации) размерности.

Следует отметить, что разработанная учеными технология не гарантирует абсолютной безопасности движения роботов, что подтверждается несколькими инцидентами, произошедшими во время испытаний. Существующие технологии управления для автомобилей также не гарантируют этого, лишь стремясь свести к минимуму вероятность столкновения.

«Нам не доводилось еще наблюдать скопления из сотен и тысяч автомобилей-роботов на дорогах. Существующие системы управления такими автомобилями весьма консервативны, они не позволяют автомобилю сдвинуться с места в случае наличия даже малейшей опасности. Все это приведет к тому, что на дорогах, по которым будут передвигаться автомобили-роботы, постоянно будут возникать заторы и пробки, ликвидировать которые не смогут самостоятельно даже самые

высокоинтеллектуальные автоматические системы» [20].

Использование для решения этой задачи известного метода управления на основе поля потенциалов не эффективно, так как он является по существу кинематическим и может оказаться неприемлемым для быстро движущихся SEMS. Поэтому при формировании множества допустимых управлений (инструкций поведения SEMS) вначале необходимо выявить и записать в базу данных САУ SEMS допустимые значения параметров отдельных элементов SEMS, а также их статические и динамические характеристики. Затем надо, исходя из предназначения конкретной SEMS, составить перечень возможных инструкций $U_{ki}(t)$. Далее требуется путем математического и компьютерного моделирования динамического пространства конфигураций выявить множество допустимых инструкций поведения $Y_d(t)$. При этом задача разбивается на два этапа.

На первом этапе, например, с помощью компьютерного моделирования работы SEMS [21], среди возможных инструкций $U_{ki}(t)$ выявляются недопустимые $U_{ki}^*(t)$, приводящие к выходу отдельных параметров и характеристик за допустимые пределы:

$$U_{ki}^*(t) \subseteq U_{ki}(t).$$

Эти инструкции должны быть исключены из возможных:

$$U_{ki}^d(t) = U_{ki}(t) / U_{ki}^*(t).$$

На втором этапе среди инструкций $U_{ki}^d(t)$ выявляются опасные, т. е. те $U_{ki}^o(t)$, чье частое повторение приводит к быстрой деградации SEMS с последующими отказами и поломками. В этом случае требуется логико-вероятностное и логико-лингвистическое моделирование деградации SEMS [22] с анализом времени деградации. Если время деградации t_{di} системы при многократном применении какой-либо инструкции $U_{ki}^d(t)$ оказывается меньше допустимого $t_{доп}$ ($t_{di} < t_{доп}$), то эти инструкции относят к опасным $U_{ki}^o(t)$ и они исключаются из возможных. Поэтому

$$Y_d(t) = (U_{ki}^d(t) / U_{ki}^o(t)).$$

В ряде случаев при реализации систем группового управления роботами некоторые инструкции, выдаваемые САУ верхнего уровня (САУ координатора-планировщика), могут быть непонятны для САУ SEMS, хотя по результатам моделирования они были отнесены к допустимым. Это, например, может быть связано с неполной адекватностью используемых моделей динамического пространства конфигураций. Частично убрать по-

добные инструкции из допустимых можно за счет семантического анализа инструкций на корректность и непротиворечивость и за счет организации диалога между взаимодействующими САУ SEMS.

Пример безопасного движения роботов

Постановка задачи

Требуется перевести трех роботов из заданных точек (площадей) к конечной точке (складскому помещению прямоугольного типа) без столкновения (рисунок). Будем считать, что динамические модели роботов и среды их функционирования построены. В памяти роботов заложены алгоритмы построения текущей динамической модели собственного состояния, в том числе:

— траектория движения первого робота (R_1) (от точки A к точке F)

$$AA_1B_1A_2QA_3A_4F;$$

— траектория движения второго робота (R_2) (от точки B к точке D)

$$BB_1A_2QB_2B_3D;$$

— траектория движения третьего робота (R_3) (от точки C к точке E)

$$CC_1A_2QB_2A_3C_2E.$$

Пусть:

d_{R_1,R_2} — расстояние между роботами R_1 и R_2 ;

d_{R_1,R_3} — расстояние между роботами R_1 и R_3 ;

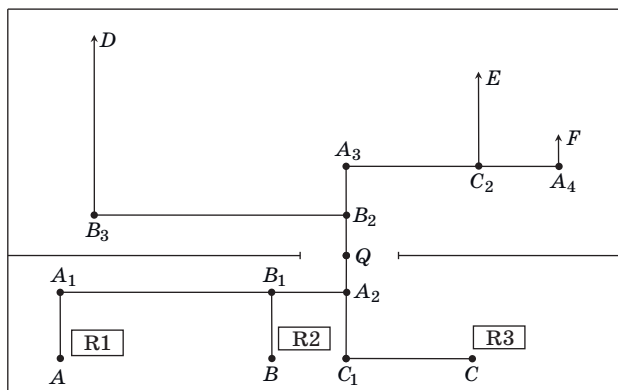
d_{R_2,R_3} — расстояние между роботами R_2 и R_3 .

Начальное состояние роботов: $X_{R_1}(0)$, $Y_{R_1}(0)$, $X_{R_2}(0)$, $Y_{R_2}(0)$, $X_{R_3}(0)$, $Y_{R_3}(0)$.

P_{R_1} — приоритет первого робота R_1 ;

P_{R_2} — приоритет второго робота R_2 ;

P_{R_3} — приоритет третьего робота R_3 .



- Траектории движений роботов R_1 , R_2 и R_3
- The trajectories of the robots R_1 , R_2 and R_3

Вероятные точки столкновения роботов:

- точка $B_1(X_{B_1}, Y_{B_1})$ для роботов R_1 и R_2 ;
- точка $A_2(X_{A_2}, Y_{A_2})$ для роботов R_1 , R_2 и R_3 ;
- точка $B_2(X_{B_2}, Y_{B_2})$ для роботов R_1 , R_2 и R_3 ;
- точка $C_2(X_{C_2}, Y_{C_2})$ для роботов R_1 и R_3 ;
- точка $Q(X_Q, Y_Q)$ (дверь) для роботов R_1 , R_2

и R_3 .

Текущее состояние роботов в момент t_i :

$$R_1(X_{R_1}(t_i), Y_{R_1}(t_i)), R_2(X_{R_2}(t_i), Y_{R_2}(t_i)), \\ R_3(X_{R_3}(t_i), Y_{R_3}(t_i)).$$

Габариты роботов (ширина + длина + высота, или площади, или объемы роботов): D_{R_1} , D_{R_2} , D_{R_3} .

Выполняются следующие ограничения (условия):

- скорости движения роботов одинаковы;
- габариты (площадь) двери D_Q должны быть

$$D_Q > \max\{D_{R_1}, D_{R_2}, D_{R_3}\};$$

— габариты (площадь или объем) складского помещения D_{ws} должны быть

$$D_{ws} > 3(D_{R_1} + D_{R_2} + D_{R_3}).$$

АЛГОРИТМ 1

Решение:

1. Вычислим расстояние между роботами в момент t_i :

$$d_{R_1,R_2} = [(X_{R_1}(t_i) - X_{R_2}(t_i))^2 + (Y_{R_1}(t_i) - Y_{R_2}(t_i))^2]^{1/2};$$

$$d_{R_1,R_3} = [(X_{R_1}(t_i) - X_{R_3}(t_i))^2 + (Y_{R_1}(t_i) - Y_{R_3}(t_i))^2]^{1/2};$$

$$d_{R_2,R_3} = [(X_{R_2}(t_i) - X_{R_3}(t_i))^2 + (Y_{R_2}(t_i) - Y_{R_3}(t_i))^2]^{1/2}.$$

2. Вычислим соответственно расстояние между текущим состоянием роботов R_1 и R_2 с точкой B_1 в момент t_i :

$$d_{R_1,B_1} = [(X_{R_1}(t_i) - X_{B_1})^2 + (Y_{R_1}(t_i) - Y_{B_1})^2]^{1/2};$$

$$d_{R_2,B_1} = [(X_{R_2}(t_i) - X_{B_1})^2 + (Y_{R_2}(t_i) - Y_{B_1})^2]^{1/2}.$$

3. Если $(d_{R_1,B_1} > d_{R_2,B_1}) \wedge (d_{R_1,R_2} \leq n_1)$ ($n_1 = \max\{D_{R_1}, D_{R_2}\}$), то $P_{R_1} = 2$, $P_{R_2} = 1$ (т. е. первым точку B_1 проходит робот R_2 , затем R_1).

4. Если $(d_{R_1,B_1} < d_{R_2,B_1}) \wedge (d_{R_1,R_2} \leq n_1)$ ($n_1 = \max\{D_{R_1}, D_{R_2}\}$), то $P_{R_1} = 1$, $P_{R_2} = 2$ (т. е. первым точку B_1 проходит робот R_1 , затем R_2).

5. Если $(d_{R_1,B_1} = d_{R_2,B_1}) \wedge (d_{R_1,R_2} \leq n_1)$ ($n_1 = \max\{D_{R_1}, D_{R_2}\}$), то $P_{R_1} = 1$, $P_{R_2} = 0$ (т. е. первым точку B_1 проходит робот R_1 , робот R_2 остановится).

6. Если $[(d_{R_1,B_1} \leq d_{R_2,B_1}) \vee (d_{R_1,B_1} \geq d_{R_2,B_1})] \wedge (d_{R_1,R_2} > n_1)$ ($n_1 = \max\{D_{R_1}, D_{R_2}\}$), то роботы R_1 , R_2 двигаются по своей траектории без остановки.

7. Вычислим соответственно расстояние между текущим состоянием роботов R_1 , R_2 и R_3 с точкой A_2 в момент t_i :

$$d_{R1,A2} = [(X_{R1}(t_i) - X_{A2})^2 + (Y_{R1}(t_i) - Y_{A2})^2]^{1/2};$$

$$d_{R2,A2} = [(X_{R2}(t_i) - X_{A2})^2 + (Y_{R2}(t_i) - Y_{A2})^2]^{1/2};$$

$$d_{R3,A2} = [(X_{R3}(t_i) - X_{A2})^2 + (Y_{R3}(t_i) - Y_{A2})^2]^{1/2}.$$

8. Если $(d_{R1,A2} \geq d_{R2,A2}) \wedge (d_{R2,A2} \geq d_{R3,A2}) \wedge (d_{R1,R2} \geq n_1) \wedge (d_{R2,R3} \geq n_2) \wedge (d_{R1,R3} \geq n_3)$ ($n_1 = \max\{D_{R1}, D_{R2}\}$, $n_2 = \max\{D_{R2}, D_{R3}\}$, $n_3 = \max\{D_{R1}, D_{R3}\}$), то $P_{R1} = 3$, $P_{R2} = 2$, $P_{R3} = 1$ (т. е. точку A_2 , не останавливаясь, последовательно проходят роботы R_3, R_2, R_1).

9. Если $(d_{R1,A2} > d_{R2,A2} = d_{R3,A2}) \wedge (d_{R1,R2} < n_1) \wedge (d_{R2,R3} < n_2) \wedge (d_{R1,R3} < n_3) \wedge (n_1 < n_2 < n_3)$ ($n_1 = \max\{D_{R1}, D_{R2}\}$, $n_2 = \max\{D_{R2}, D_{R3}\}$, $n_3 = \max\{D_{R1}, D_{R3}\}$) (ситуация соответствует параллельному или перекрестному движению роботов), то $P_{R1} = 0$, $P_{R2} = 0$, $P_{R3} = 1$.

10. Если $(d_{R1,A2} = d_{R2,A2} < d_{R3,A2}) \wedge (d_{R2,R3} < n_2) \wedge (d_{R1,R3} < n_3) \wedge (n_3 < n_1 < n_2)$ ($n_1 = \max\{D_{R1}, D_{R2}\}$, $n_2 = \max\{D_{R2}, D_{R3}\}$, $n_3 = \max\{D_{R1}, D_{R3}\}$) (ситуация соответствует параллельному или перекрестному движению роботов), то $P_{R1} = 0$, $P_{R2} = 1$, $P_{R3} = 0$.

11. Если $(d_{R1,A2} = d_{R3,A2} < d_{R2,A2}) \wedge (d_{R1,R2} < n_1) \wedge (d_{R2,R3} < n_2) \wedge (d_{R1,R3} < n_3) \wedge (n_3 < n_2 < n_1)$ ($n_1 = \max\{D_{R1}, D_{R2}\}$, $n_2 = \max\{D_{R2}, D_{R3}\}$, $n_3 = \max\{D_{R1}, D_{R3}\}$) (ситуация соответствует параллельному или перекрестному движению роботов), то $P_{R1} = 1$, $P_{R2} = 0$, $P_{R3} = 0$.

12. Для точки $Q(X_Q, Y_Q)$ (дверь) и $B_2(X_{B2}, Y_{B2})$ повторяются пп. 7–11.

13. Для точки $C_2(X_{C2}, Y_{C2})$ для роботов R_1 и R_3 повторяются пп. 2–6.

14. Для точки $F(X_F, Y_F)$ и робота R_1 вычисляем

$$d_{R1,F} = [(X_{R1}(t_i) - X_F)^2 + (Y_{R1}(t_i) - Y_F)^2]^{1/2}.$$

Если $d_{R1,F} \leq n_1$, то $P_{R1} = 0$.

15. Для точки $D(X_D, Y_D)$ и робота R_2 вычисляем

$$d_{R2,D} = [(X_{R2}(t_i) - X_D)^2 + (Y_{R2}(t_i) - Y_D)^2]^{1/2}.$$

Если $d_{R2,D} \leq n_2$, то $P_{R2} = 0$.

16. Для точки $E(X_E, Y_E)$ и робота R_3 вычисляем

$$d_{R3,E} = [(X_{R3}(t_i) - X_E)^2 + (Y_{R3}(t_i) - Y_E)^2]^{1/2}.$$

Если $d_{R3,E} \leq n_3$, то $P_{R3} = 0$.

Пример со случайными препятствиями в заданных траекториях роботов

Допустим, что на пути роботов случайным образом (по нормальному или равномерному закону распределения) имеются препятствия разного вида O_i ($i = 1, 2, 3, 4$). В этом случае задача безопасного управления при взаимодействии роботов превращается в задачу оптимального управления в условиях неполной определенности. Это связано с тем, что появляется ограничение в виде

логики-вероятностного или логики-лингвистического типа, т. е., например:

$$x_i \otimes y_j \rightarrow v_i \otimes w_j, P(x_i = 1), P(y_j = 1), P(v_i = 1), P(w_j = 1), i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m,$$

где x_i, y_j, v_i, w_j — логические переменные; $\rightarrow$ — знак импликации; $\otimes$ — знак конъюнкции; $P(x_i = 1), P(y_j = 1), P(v_i = 1), P(w_j = 1)$ — вероятности логических переменных.

При такого типа ограничениях классические алгоритмы терминальных задач без существенных изменений становятся непригодными, и требуется алгоритм 1 дополнить вычислениями интервальных ограничений (алгоритм 2 или алгоритм 3).

АЛГОРИТМ 2 используется при ограничениях логики-вероятностного типа. В этом случае, зная интервалы, принятые при фаззификации, т. е. при получении логических переменных, и используя теорему 1, приведенную в работе [23], переходят от логики-вероятностных переменных к интервальным, и задачу оптимального управления, соответственно, сводят к классической задаче математического программирования.

При этом введем следующие логические переменные, характеризующие случайные препятствия:

O_1 — логики-вероятностная переменная «маленькое», которая соответствует препятствию длиной от 0,5 до 1,5 м;

O_2 — логики-вероятностная переменная «среднее», которая соответствует препятствию длиной от 1,3 до 2,5 м;

O_3 — логики-вероятностная переменная «большое», которая соответствует препятствию длиной от 2 до 4 м.

Например, если на пути робота R_2 до точки пересечения $B_1(X_{B1}, Y_{B1})$ (для роботов R_1 и R_2) появляется случайным образом препятствие O_1 «маленькое», которое соответствует длине от 0,5 до 1,5 м, то пп. 3, 4 алгоритма 1 будут изменяться, т. е. текущие расстояния между R_2 и точкой B_1 ($d_{R1,B1}$) и между R_1 и R_2 ($d_{R1,R2}$) будут другими.

Пусть $P\{O_1 = 1\} = 0,8$. Преобразуем логики-вероятностную переменную O_1 в логики-интервальную O_1^I . Для этого, как сказано выше, используем следствие 3 теоремы 1 [23], найдем нормальную функцию распределения $\Phi(O_1^*)$ с параметрами $m = (b + a)/2$, $\sigma = (m - a)/3$, $a = 0,5$ м, $b = 1,5$ м. Тогда

$$\Phi(O_1^*) = 0,5(1 + P\{O_1 = 1\}) = 0,5(1 + 0,8) = 0,9.$$

Найдем интервал величины O_1^* . Он находится между $-1,29(-O_1^*)$ и $+1,29(+O_1^*)$. Для нахождения интервалов a^I, b^I логики-интервальной переменной O_1^I используем выражение

$$(-O_1^*) = ((a^I - m)/\sigma), (+O_1^*) = ((b^I - m)/\sigma).$$

Отсюда получаем, что $a^I = 0,78$, $b^I = 1,22$.

Таким образом, получим, что $0,78 < O_1^I < 1,22$.

В дальнейшем к расстояниям $d_{R1,B1}$ и $d_{R1,R2}$ добавляются a^I , b^I в виде «штрафа» и вычисляются средние значения этих расстояний, т. е. получаем

$$d_{R1,B1}^{cp} = ((d_{R1,B1} + a^I) + (d_{R1,B1} + b^I))/2;$$

$$d_{R2,B2}^{cp} = ((d_{R1,R2} + a^I) + (d_{R1,R2} + b^I))/2.$$

АЛГОРИТМ 3

При ограничениях логико-лингвистического типа, например:

$$x_i \otimes y_j \rightarrow v_i \otimes w_j, \mu(x_i), \mu(y_j), \mu(v_i), \mu(w_j),$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m,$$

где $\mu(x_i)$, $\mu(y_j)$, $\mu(v_i)$, $\mu(w_j)$ — функции принадлежности логических переменных, используется алгоритм 3.

В этом случае, зная интервалы, принятые при фаззификации, т. е. при получении логических переменных, и используя теорему 3, приведенную в работе [23], переходят от логико-лингвистических переменных к интервальным, и задачу оптимального управления, соответственно, переводят в классическую задачу математического программирования.

При этом введем следующие логические переменные, характеризующие случайные препятствия:

O_1 — логико-лингвистическая переменная «маленькое», которая соответствует препятствию длиной от 0,5 до 1,5 м;

O_2 — логико-лингвистическая переменная «среднее», которая соответствует препятствию длиной от 1,3 до 2,5 м;

O_3 — логико-лингвистическая переменная «большое», которая соответствует препятствию длиной от 2 до 4 м.

Например, если на пути робота R_2 до точки пересечения $B_1(X_{B1}, Y_{B1})$ (для роботов R_1 и R_2) появляются случайным образом препятствие O_1 «маленькое», которое соответствует длине от 0,5 до 1,5 м, то пп. 3, 4 алгоритма будут изменяться, т. е. текущие расстояния между R_2 и точкой B_1 ($d_{R1,B1}$) и между R_1 и R_2 ($d_{R1,R2}$) будут другие.

Пусть $\mu\{O_1\} = 0,8$. Преобразуем логико-лингвистическую переменную O_1 в логико-интервальную O_1^I . Для этого используем следствие 1 теоремы 3 [23].

Теорема 3. Если лингвистическая переменная v , имеющая значение функции принадлежности $\mu(v)$, была получена путем фаззификации из нечеткой величины x , имеющей на интервале $[x_{\min}; x_{\max}]$ функцию распределения $f(x)$, то $a = x_{\min} + \mu(v) f(x)$, $b = x_{\max} + \mu(v) f(x)$.

Следствие 1. Если задан треугольный вид функции $f(x)$, т. е.

$$f(x) = 0,5(x_{\max} - x_{\min})$$

при $x_{\min} \leq x \leq 0,5(x_{\max} - x_{\min})$;

$$f(x) = -0,5(x_{\max} - x_{\min})$$

при $0,5(x_{\max} - x_{\min}) < x \leq x_{\max}$,

то получим следующие интервалы:

$$a = x_{\min} + \mu(v)0,5(x_{\max} - x_{\min}),$$

$$b = x_{\max} - \mu(v)0,5(x_{\max} - x_{\min}).$$

Для нахождения интервалов a^I , b^I логико-интервальной переменной O_1^I используем выражения

$$a^I = x_{\min} + \mu(O_1)0,5(x_{\max} - x_{\min}),$$

$$b^I = x_{\max} - \mu(O_1)0,5(x_{\max} - x_{\min}),$$

где $x_{\min} = 0,5$; $x_{\max} = 1,5$.

Отсюда $a^I = 0,9$, $b^I = 1,1$.

Таким образом, получим, что $0,9 < O_1^I < 1,1$.

В дальнейшем к расстояниям $d_{R1,B1}$ и $d_{R1,R2}$ добавляются a^I , b^I в виде «штрафа» и вычисляются средние значения этих расстояний, т. е. получаем

$$d_{R1,B1}^{cp} = ((d_{R1,B1} + a^I) + (d_{R1,B1} + b^I))/2;$$

$$d_{R2,B2}^{cp} = ((d_{R1,R2} + a^I) + (d_{R1,R2} + b^I))/2.$$

Разумеется, что таким же способом будут изменены пункты алгоритма безопасного движения роботов в зависимости от разных видов неопределенностей окружающей среды.

Движение роботов по нелинейным траекториям

Пусть часть траекторий (путей) роботов имеет нелинейные формы.

АЛГОРИТМ 4

Роботы действуют в детерминированной среде. Пусть часть пути (например, участок A_1B_1) имеет нелинейные формы. Применяем метод кусочно-линейной аппроксимации, заключающийся в замене сложной кривой ломаной линией. Такая линия состоит из отрезков прямых, по возможности максимально совпадающих с основной кривой. Таких линий может быть несколько. Обозначим такие ломаные линии через $l_i^{(j)}$, где i — число прямых в ломаной линии; j — число ломаных линий. Надо найти среди этих ломаных одну (оптимальную), по которой должен двигаться робот. Критерий оптимальности

$$d = \min_j d^{(j)},$$

где d — длина оптимальной ломаной линии; $d^{(j)}$ — длина j -й ломаной линии;

$$d^{(j)} = \sum_{i=1}^n l_i^{(j)}.$$

После решения задачи, например переборным методом, получаем оптимальную ломаную линию $l^{(k)}$. Далее действуем по алгоритму 1.

АГОРИТМ 5 и АЛГОРИТМ 6

Пусть часть пути (например, участок A_1B_1) можно пройти по трем маршрутам (по трем ломаными линиям) и присутствуют ограничения в виде логико-вероятностного (алгоритм 5) или логико-лингвистического (алгоритм 6) типа. Требуется найти маршрут проезда робота из точки $A_1(x_{A1}, y_{A1})$ в точку $B_1(x_{B1}, y_{B1})$ за минимальное время J :

$$J(M_v) \rightarrow \min,$$

где $v = 1, 2, 3$. Функционал $J(M_v)$ характеризуется длинами прямых линий, углами между прямыми линиями и временем задержки на пересечениях прямых линий ломаной траектории.

1. Имеются вычисленные по алгоритму 4 следующие варианты маршрутов (оптимальные ломаные линии) для роботов, например для R_1 : M_1, M_2, M_3 .

2. Вычисляются интервалы логических переменных, характеризующих окружающую среду (см. алгоритм 2 и алгоритм 3). При этом осуществляется переход от логико-вероятностных (алгоритм 5) и логико-лингвистических (алгоритм 6) ограничений к логико-интервальным, и данная задача сводится к классической задаче математического программирования.

3. В любом текущем динамическом пространстве конфигураций, соответствующем выделенному фрагменту A_1B_1 , будут присутствовать несколько ограничений, для каждого из которых вычисляются функционалы $J(M_v)$ для всех вариантов движения.

4. В качестве оптимального выбирается тот маршрут M_v , которому будет соответствовать минимум среднего значения функционала $J(M_v)$.

5. Далее действуем по алгоритму 1.

Заключение

Анализ примеров безопасного движения роботов показал, что группы роботов в зависимости от условий функционирования могут эффективно использовать различные алгоритмы оптимального управления. В частности, при управлении согласованным движением группы роботов в условиях полной определенности могут использоваться классические алгоритмы терминальных задач. Один из примеров (алгоритм 1) приведен для движения трех роботов.

В случае если на пути движения роботов случайным образом появляются препятствия разного вида, задача безопасного управления роботами превращается в задачу оптимального управления в условиях неполной определенности. Тогда ограничения можно описать в виде логико-вероятностных или логико-лингвистических выражений и использовать, например, алгоритм 2 или алгоритм 3.

В случае если траектории движения роботов имеют нелинейные формы, можно применить метод кусочно-линейной аппроксимации и использовать, например, алгоритм 3, если роботы действуют в детерминированной среде, либо алгоритм 4, если имеются ограничения логико-вероятностного типа, или алгоритм 5, если имеются ограничения логико-лингвистического типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-29-04424, 18-01-00076, 19-08-00079).

Литература

1. *Smart electromechanical systems/Studies in systems, decision and control*. Vol. 49. Ed. Andrey E. Gorodetskiy. Springer International Publishing, 2016. 277 p. doi:10.1007/978-3-319-27547-5
2. *Smart electromechanical systems: The central nervous system / Studies in systems, decision and control*. Vol. 95. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. 270 p. doi:10.1007/978-3-319-53327-8
3. Сахаров В. В., Чертков А. А., Тормашев Д. С. Алгоритм оптимального планирования группового взаимодействия роботов. *Морской вестник*, 2014, № 4(52), с. 119–122.
4. Васильев И. А., Половко С. А., Смирнова Е. Ю. Организация группового управления мобильными роботами для задач специальной робототехники. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*, 2013, № 1, с. 119–123.
5. Архипкин А. В., Комченков В. И., Корольков Д. Н., Петров В. Ф., Симонов С. Б., Терентьев А. И. Задачи группового управления роботами в робототехническом комплексе пожаротушения. *Тр. СПИИРАН*, 2016, № 45, с. 116–129.
6. Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Принятие решений в центральной нервной системе робота. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 1, с. 21–30. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.21
7. Fridman A. Ya. *SEMS-based control in locally organized hierarchical structures of robots collectives*. In: *Smart electromechanical systems: The central nervous system / Studies in systems, decision and control*.

- Vol. 95. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. P. 31–47. doi:10.1007/978-3-319-53327-8
8. Rubenstein M., Ahler C., Nagpal R. Kilobot: a low cost scalable robot system for collective behaviors. *Proc. of IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (IRCA 2012)*, Saint Paul, Minnesota, May 14–18, 2012, pp. 3293–3298. doi:10.1109/ICRA.2012.6224638
 9. Mondada F., Gambardella L. M., Floreano D., Dorigo M. The cooperation of swarm-bots: Physical interactions in collective robotics. *IEEE Robot. Autom. Mag.*, 2005, vol. 12, no. 2, pp. 21–28. doi:10.1109/MRA.2005.1458313
 10. Мартынова Л. А., Розенгауз М. Б. Определение эффективного поведения группы АНПА в сетцентрической системе освещения подводной обстановки. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 3, с. 47–57. doi:org/10.15217/issn1684-8853.2017.3.47
 11. Моторин Д. Е., Попов С. Г. Алгоритм многокритериального поиска траекторий движения робота на многослойной карте. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 3, с. 45–53. doi:org/10.15217/issn1684-8853.2018.3.45
 12. Andreychuk A., Yakovlev K. Path finding for the coalition of co-operative agents acting in the environment with destructible obstacles. *Proc. of Third Intern. Conf. "Interactive collaborative robotics", ICR 2018*, Leipzig, Germany, Sept. 18–22, 2018, pp. 13–22.
 13. Dorigo M., Floreano D., Gambardella L. M., Mondada F., Nolffi S., Baaboura T., Birattari M., et al. Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms. *IEEE Robot. Autom. Mag.*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 60–71.
 14. Воробьев В. В. Логический вывод и элементы планирования действий в группах роботов. *Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту КИИ-2018*: тр. конф., Москва, 24–27 сентября 2018 г., т. 1, М., 2018, с. 88–96.
 15. Иванов Д. Я., Шабанов И. Б. Модель применения коалиций интеллектуальных мобильных роботов при ограниченных коммуникациях. *Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту КИИ-2018*: тр. конф., Москва, 24–27 сентября 2018 г., т. 1, М., 2018, с. 97–105.
 16. Поспелов Д. А. *Ситуационное управление: Теория и практика*. М., Наука, 1986. 286 с.
 17. Кунц Г., О’Доннел С. *Управление: системный и ситуационный анализ управленческих функций*. М., Прогресс, 2002. 588 с.
 18. Kulik B. A., Fridman A. Ya. *Logical analysis of data and knowledge with uncertainties in SEMS*. In: *Smart electromechanical systems: The central nervous system / Studies in systems, decision and control*. Vol. 95. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. P. 45–59. doi:10.1007/978-3-319-53327-8
 19. Юдин Д. Б. *Вычислительные методы теории принятия решений*. М., Наука, 1989. 320 с.
 20. Sing G. Lee, Yancy Diaz-Mercado, Magnus Egerstedt. Multirobot control using time-varying density functions. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, vol. 31, iss. 2, pp. 489–493. doi:10.1109/TRO.2015.2397771
 21. Фридман А. Я. *Ситуационное управление структурой промышленно-природных систем. Методы и модели*. Saarbrücken, Germany, LAP, 2015. 503 с.
 22. Tarasova I. L., Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G. *Mathematical models of the automatic control systems SEMS modules*. In: *Smart electromechanical systems: The central nervous system / Studies in systems, decision and control*. Vol. 95. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. P. 149–158. doi:10.1007/978-3-319-27547-5
 23. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova, Vugar G. Kurbanov. *Reduction of logical-probabilistic and logical-linguistic constraints to interval constraints in the synthesis of optimal SEMS*. In: *Smart electromechanical systems: Group interaction / Studies in systems, decision and control*. Vol. 174. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Springer International Publishing, 2019. P. 77–90. doi:10.1007/978-3-319-99759-9-7

UDC 62-52

doi:10.31799/1684-8853-2019-1-23-31

Safe control of SEMS in group interactionA. E. Gorodetskiy^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-3465-4438V. G. Kurbanov^{a,b}, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-2450-9341, vugar.kurbanov@gmail.comI. L. Tarasova^{a,c}, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-2282-150X^aInstitute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bol'shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^cPeter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhicheskaya St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation**Introduction:** In control over a group of interacting smart electromechanical systems (SEMS), situations may arise when the operator's instructions and/or the automatic control system at a higher level contradict the internal state of the controlled SEMS

and/or the environment of choice. Such situations can be prevented by algorithms which check the fulfillment of conditions for the admissibility of movements. These algorithms can be based on modeling the SEMS behavior using logical-probabilistic or logical-linguistic descriptions of situations, and on non-scalar quality criteria when making decisions. **Purpose:** The development of algorithms for safe control over robots based on SEMS modules with phase constraints, under incomplete certainty of the environment. **Results:** Algorithms have been developed for safe control over three robots, using a mathematical description of situational control over a group of SEMS and the methodology of organizing the situational control over a group of mobile SEMS. The algorithms move the robots from certain current positions to specified terminal positions, avoiding their collisions with each other. In order to avoid collisions, the decision-making system in a robot's central nervous system uses robot's priorities based on the distance between the robots. An approach has been proposed to overcome uncertainty on the way (trajectory) of the robots. Uncertainties in the form of logical-probabilistic and logical-linguistic type constraints are considered. It is shown that these restrictions can be translated into a logical-interval form. This allows you to use standard mathematical programming procedures when searching for the optimal solution. **Practical relevance:** The obtained algorithms can be used for decision-making in the central nervous system and when controlling robots.

Keywords — safe control, intelligent robots, smart electromechanical systems, group situational interaction, dynamic configuration space, central nervous system.

For citation: Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G., Tarasova I. L. Safe control of SEMS in group interaction. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 1, pp. 23–31 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-1-23-31

References

1. *Smart electromechanical systems*/Studies in systems, decision and control. Vol. 49. Ed. Andrey E. Gorodetskiy. Springer International Publishing, 2016. 277 p. doi:10.1007/978-3-319-27547-5
2. *Smart electromechanical systems: The central nervous system* / Studies in systems, decision and control. Vol. 95. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. 270 p. doi:10.1007/978-3-319-53327-8
3. Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G., Tarasova I. L. Decision-making in central nervous system of a robot. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 1, pp. 21–30 (In Russian). doi:org/10.15217/issn1684-8853.2018.1.21
4. Sakharov V. V., Chertkov A. A., Tormashev D. S. Algorithm for optimal planning of group interaction of robots. *Morskoy vestnik*, 2014, no. 4(52), pp. 119–122 (In Russian).
5. Vasilyev I. A., Polovko S. A., Smirnova E. Yu. Organization of group control of mobile robots for the tasks of special robotics. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2013, no. 1, pp. 119–123 (In Russian).
6. Arkhipkin A. V., Komchenkov V. I., Korolkov D. N., Petrov V. F., Simonov S. B., Terentev A. I. Problems of group control of robots in the robotic complex of fire extinguishing. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2016, no. 45, pp. 116–129 (In Russian).
7. Fridman A. Ya. *SEMS-based control in locally organized hierarchical structures of robots collectives*. In: *Smart electromechanical systems: The central nervous system* / Studies in systems, decision and control. Vol. 95. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. P. 31–47.
8. Rubenstein M., Ahler C., Nagpal R. Kilobot: a low cost scalable robot system for collective behaviors. *Proc. of IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (IRCA 2012)*, Saint Paul, Minnesota, May 14–18, 2012, pp. 3293–3298. doi:10.1109/ICRA.2012.6224638
9. Mondada F., Gambardella L. M., Floreano D., Dorigo M. The cooperation of swarm-bots: Physical interactions in collective robotics. *IEEE Robot. Autom. Mag.*, 2005, vol. 12, no. 2, pp. 21–28. doi:10.1109/MRA.2005.1458313
10. Martynova L. A., Rozengauz M. B. Efficient operation of a group of standalone unmanned submersibles in a network-centric system of underwater illumination. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 3, pp. 47–57 (In Russian). doi:org/10.15217/issn1684-8853.2017.3.47
11. Motorin D. E., Popov S. G. Multi-criteria path planning algorithm for a robot on a multilayer map. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 45–53 (In Russian). doi:org/10.15217/issn1684-8853.2018.3.45
12. Andreychuk A., Yakovlev K. Path finding for the coalition of co-operative agents acting in the environment with destructible obstacles. *Proc. of Third Intern. Conf. "Interactive collaborative robotics"*, ICR 2018, Leipzig, Germany, Sept. 18–22, 2018, pp. 13–22.
13. Dorigo M., Floreano D., Gambardella L. M., Mondada F., Nolfi S., Baaboura T., Birattari M., et al. Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms. *IEEE Robot. Autom. Mag.*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 60–71.
14. Vorobev V. V. Logical inference and action planning elements in robot groups. *Proc. 16th National Conf. on Artificial Intelligence KII-2018*, Moscow, 2018, vol. 1, pp. 88–96 (In Russian).
15. Ivanov D. YA., Shabanov I. B. Model of application of coalitions of intelligent mobile robots with limited communications. *Proc. 16th National Conf. on Artificial Intelligence KII-2018*, Moscow, 2018, vol. 1, pp. 97–105 (In Russian).
16. Pospelov D. A. *Situatsionnoye upravlenie: Teoriya i praktika* [Situation management: Theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 286 p. (In Russian).
17. Kunc G., O Donnel S. *Upravlenie: sistemnyy i situatsionnyy analiz upravlencheskih funktsiy* [Management: system and situation analysis of management functions]. Moscow, Progress Publ., 2002. 588 p. (In Russian).
18. Kulik B. A., Fridman A. Ya. *Logical analysis of data and knowledge with uncertainties in SEMS*. In: *Smart electromechanical systems: The central nervous system* / Studies in systems, decision and control. Vol. 95. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. P. 45–59. doi:10.1007/978-3-319-53327-8
19. Yudin D. B. *Vychislitel'nyye metody teorii prinyatiya resheniy* [Computational methods of decision theory]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 320 p. (In Russian).
20. Sing G. Lee, Yancy Diaz-Mercado, Magnus Egerstedt. Multi-robot control using time-varying density functions. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, vol. 31, iss. 2, pp. 489–493. doi:10.1109/TRO.2015.2397771
21. Fridman A. Ya. *Situatsionnoye upravleniye strukturoy promyshlennno-prirodnkh sistem. Metody i modeli* [Situational control of the structure of industrial natural systems. Methods and models]. Saarbrücken, Germany, LAP, 2015. 503 p. (In Russian).
22. Tarasova I. L., Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G. *Mathematical models of the automatic control systems SEMS modules*. In: *Smart electromechanical systems: The central nervous system* / Studies in systems, decision and control. Vol. 95. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. P. 149–158. doi:10.1007/978-3-319-27547-5
23. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova, Vugar G. Kurbanov. *Reduction of logical-probabilistic and logical-linguistic constraints to interval constraints in the synthesis of optimal SEMS*. In: *Smart electromechanical systems: Group interaction* / Studies in systems, decision and control. Vol. 174. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Springer International Publishing, 2019. P. 77–90. doi:10.1007/978-3-319-99759-9-7