

Раздел V. Контроль и управление в технических системах

УДК 519.7

Ю.А. Заргарян, Е.В. Заргарян, И.В. Пушнина

МЕТОД НЕЧЁТКОЙ ПОРОГОВОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

При решении задач управления производственными процессами и объектами применяются гибридные системы управления. Приводится обзор публикаций, отражающих эволюцию гибридных систем управления, начиная с простого теоретико-множественного описания и оканчивая интеллектуальными системами поддержки принятия решений. Рассмотрены особенности проектирования гибридных систем управления как двухуровневой системы обработки и взаимодействия данных. Приведена блок-схема гибридной системы управления, отличающаяся наличием классического и нечёткого регуляторов. Отмечено, что качество управления зависит от адекватности базы правил для нечёткого регулятора, задаваемой экспертами. Многокритериальная оптимизация функционирования гибридных систем управления рассматривается при задании локальных критериев в виде нечётких интервалов. Рассмотрены методы скаляризации, которые применяются при ранжировании критериев. Целевая функция определена локальными критериями. Оптимизация связана с поиском управляющих воздействий, обеспечивающих оптимальные значения многомерной целевой функции. Рассмотрено применение метода пороговой оптимизации для поиска Парето-оптимального решения. Предложен подход к оценке вариантов Парето-оптимальных решений с применением критериев оценки полезности. Разработан алгоритм и программное приложение для оценки Парето-оптимального решения с учётом полезности.

Управление; неопределённость; гибридная система; моделирование; искусственный интеллект; метод пороговой оптимизации.

Yu.A. Zargaryan, E.V. Zargaryan, I.V. Pushnina

OPTIMISATION OF PARAMETERS OF HYBRID ADAPTIVE INTELLECTUAL REGULATORS

Hybrid control systems are applied at the decision of management tasks of productions and objects. The review of the publications reflecting evolution of hybrid control systems are resulted, since the simple theoretic-plural description and end intellectual systems of decision-making support. Features of hybrid control systems designing, as two-level system of handling and interaction of the data were considered. The block diagram of the hybrid control system, differ from availability of classical and indistinct regulators. It is noticed that quality of management depends on adequacy of rules base for the indistinct regulator, set by experts. Multiobjective optimization of functioning the hybrid control systems are considered at the task of local criteria in the form of indistinct intervals. Methods of scalarization which are applied when ranging criteria were considered. Criterion function are specified by local criteria. Optimization is connected with search of the managing influences providing optimum values of multidimensional criterion function. Application

of a threshold optimization method for search the Pareto-optimal decision are considered. The approach to an estimation the variants Pareto-optimal decisions with application criteria of an utility estimation are offered. The algorithm and a program application for an estimation of Pareto-optimal decision taking into account utility are developed.

Control; uncertainty; hybrid system; modeling; artificial intelligence; method of threshold optimization.

Задача разработки гибридных систем управления. Технологические объекты могут обладать разными свойствами в разных ситуациях, могут не иметь адекватных моделей в терминах классических дифференциальных уравнений. Объекты могут иметь непрерывно-дискретное поведение, со стохастическими составляющими в изменяющихся параметрах. Пренебрежение этими фактами как раз и не позволяет получить адекватные аналитические модели объектов и, следовательно, невозможно применить методы управления из классической теории автоматического управления. Для систем этого вида в середине 1960 гг. появился новый подход, направленный на разработку гибридных систем управления [6].

Состояние гибридной системы задают с применением вектора двух переменных – непрерывной переменной и дискретной переменной. Поведение гибридной системы в непрерывном времени или в непрерывном времени, смешанным с дискретным временем, можно описать дифференциальными уравнениями. Поведение гибридной системы в дискретном времени определено с применением теоретико-множественного описания, причём возможно описание поведения как цифровым автоматом, так и передаточной функцией с конечным количеством состояний. Непрерывный и дискретный процессы «соприкасаются» в «особых точках», когда состояние объекта достигает некоторых подмножеств в непрерывном пространстве изменения состояний объекта.

Академик Н.П. Бусленко [10] предложил унифицированные математические модели – гибриды, названные агрегатом и агрегативной системой, для описания динамической системы. Агрегат имеет входные и выходные контакты, через которые с помощью каналов связи может подключаться к другим агрегатам. Он воспринимает входные $x(t)$ сигналы, выдает выходные $y(t)$ сигналы и находится в состоянии $z(t)$. Формально агрегат A_n задается в виде набора:

$$A_n = \langle T, X, Y, Z, Z^Y, H, U, G \rangle, \quad (1)$$

где T – множество моментов времени, X, Y, Z – множества входных, выходных сигналов и состояний соответственно $x(t) \in X, y(t) \in Y, z(t) \in Z$; Z^Y – система подмножеств Z ; H – множество собственных параметров $h(t) \in H$; U, G – операторы переходов и выходов соответственно.

Л. Медскер [14] определил понятие гибридных интеллектуальных систем, а Г.С. Осипов [3] рассмотрел вид гибридных систем с дискретной частью, основанной на знаниях. Динамика гибридной системы определена уравнением

$$S(t+1) = (\cup F_j(t) \cup \phi(S(i), U(i), RD), RS), \quad (2)$$

где \cup – теоретико-множественное объединение по всем $j \leq t+1$ и всем $i \leq t$, $U(i)$ – факт и множество фактов (управление), добавляемые в состояние $S(i)$; RS и RD – компоненты базы правил, содержащие правила замыкания и перехода соответственно; ϕ и ϕ – процедуры управления выполнением правил из множеств RS и RD соответственно.

В.Н. Вагин в работе [2] описал интеллектуальную систему поддержки принятия решений реального времени, рассматриваемую как семиотическая система распределенного интеллекта

$$SS = \langle M, R(M), F(M), F(SS) \rangle, \quad (3)$$

где $M = \{M_i\}$ – множество формальных или логико-лингвистических моделей, реализующих определённые интеллектуальные функции; $R(M)$ – функция выбора необходимой модели или совокупности моделей в текущей ситуации; $F(M) = \{F(M_i)\}$ – множество функций модификации моделей; $F(SS)$ – функция модификации собственно системы SS , её базовых конструкций M , $R(M)$, $F(M)$ и, возможно, самой $F(SS)$.

В работе [7] рассмотрена комбинированная гибридная нейроэкспертная система. Базис системы составляет набор из трёх компонентов с применением нечёткой логики и теории нечётких множеств: нечёткая нейронная сеть, нечёткая экспертная система и модуль принятия и объяснения решения. Нейронная сеть вырабатывает нечёткие знания, которые оформляются в виде модели представления нечётких знаний.

В работе [3] рассматривается гибридная система управления мобильными роботами, с применением семантических сетей для обработки естественного языка и нейронных сетей для распознавания и кластеризации образов. Система управления мобильным роботом, как интеллектуальная система, имеет два уровня обработки и хранения знаний: логический (вербальное мышление) и образный (ассоциативное мышление).

В работе [1] рассмотрена задача энергосберегающего управления электрокамерными печами с применением гибридного регулятора, реализованного на нечёткой логике.

Можно сделать вывод, что в гибридном регуляторе реализуются алгоритмы классической теории автоматического управления и алгоритмы с нечёткой логикой в зависимости от состояний объекта.

Вполне понятно, что при управлении объектами с применением гибридных регуляторов появляется задача многокритериального управления, направленная на оптимизацию параметров объекта, обеспечивающуюся оптимизацией параметров гибридного регулятора.

Особенности проектирования интеллектуальной гибридной системы управления. Интеллектуальная гибридная система управления, как было отмечено выше, представляет собой систему обработки и взаимодействия данных, состоящую из двух уровней. Первый уровень – применение методов классической теории управления. Второй уровень – моделирование с применением нечёткой логики. Двухуровневое представление обеспечивает понимание и учёт механических, электрических и информационных взаимодействий.

При подобном представлении интеллектуальной гибридной системы управления данные классического алгоритма управления применимы для формирования базы правил при синтезе и моделировании нечёткой модели. Качество управления зависит от адекватности базы правил (базы знаний) для нечеткого регулятора, что требует учёта компетентности и профессионализма эксперта в рассматриваемой области [5, 9].

Многокритериальная оптимизация функционирования гибридных систем управления. Пусть качество работы гибридной системы управления определяется многими критериями. В общем случае критерии могут быть заданы на разных базовых множествах. Рассмотрим вариант многокритериальной оптимизации в условиях неопределённости, основанный на ранжировании экспертами локальных критериев. Известны методы скаляризации [13] векторного критерия, которые применяют при ранжировании. Пусть векторный критерий определён множеством локальных, в общем случае нечётких критериев $\tilde{F}_1, \tilde{F}_2, \dots, \tilde{F}_m$. В работе [4] предло-

жено расширение метода скаляризации при нечетком задании локальных критериев. Рассмотрим возможность этого подхода к задаче многокритеральной оптимизации функционирования гибридной системы управления.

На множестве критериев $F = \{ \tilde{F}_1, \tilde{F}_2, \dots, \tilde{F}_m \}$ применение ранжирования приводит к заданию нечеткого отношения $\langle F, \tilde{Q} \rangle$, где \tilde{Q} – график отношения.

Для оценки оптимальности многокритериальных систем применим метод Парето [12]. Оптимизация связана с поиском управляющих воздействий, обеспечивающих оптимальные значения многомерной целевой функции.

Возможно задание элементов множества нечетких критериев $\tilde{F}_1, \tilde{F}_2, \dots, \tilde{F}_m$ либо с применением лингвистической переменной, либо с применением нечетких интервалов [4]. Пусть на вербальном уровне нечеткий критерий \tilde{F}_i задан в виде

$$\langle f_i, T(f_i), X_i, G, M \rangle, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где f_i – наименование i -го критерия; $T(f_i)$ – терм-множество, содержащее нечеткие переменные для описания критерия f_i ; X_i – область определения критерия f_i ; G – синтаксическое правило; M – семантическое правило.

При четком задании критериев $f_i, i = \overline{1, m}$ для поиска Парето-оптимального решения применяют метод пороговой оптимизации [11]. При применении этого метода для каждого критерия f_i задают ряд ограничений d_i . Затем определяют критерий первого ранга и находят его максимум. Максимальные значения остальных критериев определяют с учетом ограничения

$$f_i(x_i) \geq d_i(x_i), \quad i = \overline{1, m}. \quad (5)$$

Метод оптимизации на основе принципа сложности [4] предусматривает принятие решений на расширенных множествах и оценку сложности при предположениях: решение принадлежит области Парето; существует и является единственным Парето-оптимальным решением задачи:

$$f^{(1)}(x_1) \rightarrow \max, \quad f^{(i)}(x_i) \geq d^{(i)}(x_i), \quad i = \overline{2, m}, \quad (6)$$

а также множество критериев $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ на этапе постановки задачи может быть дополнено любым критерием f_{m+1} ; задача с ограничениями (5) порождает m сопряженных задач пороговой оптимизации с тем же ограничением, что позволяет упрощать поиск Парето-оптимального решения за счет процедуры поиска решения с применением принципа минимальной сложности.

Задача с ограничениями (5) порождает m сопряженных задач пороговой оптимизации. Поэтому может оказаться, что будет нужен анализ m вариантов полученных нечетких Парето-оптимальных решений.

На основе известных положений теории принятия решений [11] можно выполнить следующую оценку полученных вариантов Парето-оптимальных нечетких решений.

Пусть W_i есть i -й вариант решения сопряженной задачи пороговой оптимизации. Эксперты на множестве $W = \langle W_1, W_2, \dots, W_m \rangle$ задают оценки эффективности, выбираемые из множества $E = \langle E_1, E_2, \dots, E_n \rangle$. В результате будет сформировано соответствие $\langle W, E, Q \rangle$, Q , график которого представлен в табл. 1.

Экспертами задаётся на пересечении i -й строки и j -го столбца табл. 1 экспертами задана \tilde{z}_{ij} – нечеткая оценка полезности i -го варианта решения сопряженной задачи значению эффективности E_j .

Таблица 1

График соответствия "вариант - оценка"

W	E			
	E ₁	E ₂	...	E _h
W ₁	\tilde{z}_{11}	\tilde{z}_{12}		\tilde{z}_{1h}
W ₂	\tilde{z}_{21}	\tilde{z}_{22}		\tilde{z}_{2h}
...
W _m	\tilde{z}_{m1}	\tilde{z}_{m2}	...	\tilde{z}_{mh}

Окончательный выбор варианта решения W_i экспертами осуществляют из учёта возможного состояния гибридной системы управления, которое представляет собой множество $S = \langle S_1, S_2, \dots, S_d \rangle$. Состояния S_j определены нечётким числом на шкале оценок (0, 1).

Степень принадлежности наилучшего, с точки зрения эксперта, варианта Парето-оптимального решения относительно принимаемого управления определяется в виде нечёткого интервала по формуле

$$\max_{W_i} \left[\sum_{j=1}^h \sum_{l=1}^d \tilde{z}_{ij} \otimes \tilde{p}_j \otimes \tilde{p}_l^s \right] = \max_{W_i \in W} \tilde{E}(W_i(x)), \quad (7)$$

где \otimes – триангулярная норма (Т-норма), которую рассматриваем, как логическое произведение по Заде.

Определение степени принадлежности наилучшего варианта Парето-оптимального нечёткого решения может быть выполнено с применением модификаций критерия Вальда и критерия Сэвиджа [4].

На рис. 1 приведён алгоритм метода оценки Парето-оптимального решения с учётом полезности.

Подпрограмма генерации m вариантов Парето-оптимальных нечётких решений реализует следующие правила оптимизации.

Максимизируется нечёткий критерий $\tilde{f}_1(x_1)$ с учётом ограничения $\tilde{f}_1^{\max}(x_1) \lesssim \tilde{d}_1$. Затем определяется максимум для нечёткого критерия $\tilde{f}_2(x_1)$ с учётом ограничения $\tilde{f}_2^{\max}(x_2) \lesssim \tilde{d}_2$. Если условие ограничения $\tilde{f}_2^{\max}(x_2) \lesssim \tilde{d}_2$ не выполняется, то максимум критерия \tilde{f}_1^{\max} ухудшается на величину уступки $\tilde{\Delta}_{f_1^{(1)}} = \langle \underline{f}^{(1)}, \overline{f}^{(1)}, \alpha_{f_1^{(1)}}, \beta_{f_1^{(1)}} \rangle$. Затем эта процедура выполняется последовательно для остальных критериев $\tilde{f}_3(x_3), \tilde{f}_4(x_4), \dots, \tilde{f}_m(x_m)$. В результате будет получен вариант W_1 Парето-оптимального нечёткого решения относительно управления технологическим объектом.

Вариант W_2 Парето-оптимального нечёткого решения будет получен, если вначале выполняется максимизация нечёткого критерия $\tilde{f}_2(x_2)$ с учётом ограничения $\tilde{f}_2^{\max}(x_2) \lesssim \tilde{d}_2$, а затем выполняется максимизация нечётких критериев $\tilde{f}_1(x_1), \tilde{f}_3(x_3), \dots, \tilde{f}_m(x_m)$. Вариант W_3 нечёткого решения будет получен при начальной максимизации нечёткого критерия и последующей максимизации нечётких критериев $\tilde{f}_1(x_1), \tilde{f}_2(x_2), \tilde{f}_4(x_4), \dots, \tilde{f}_m(x_m)$ и т.д.



Рис. 1. Алгоритм оценки Парето-оптимального решения с учётом полезности

Информационное обеспечение для поиска Парето-оптимального решения. Основное окно программного приложения для поиска Парето-оптимального решения показано на рис. 2.

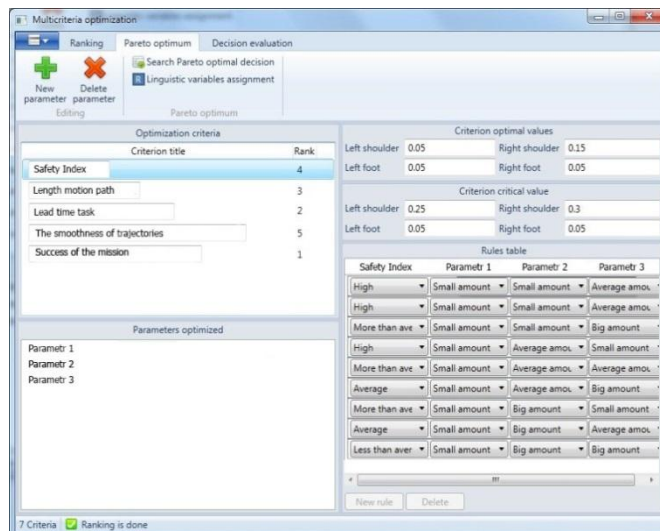


Рис. 2. Основное окно программного приложения

Окно программного приложения разделено на области. Первая область отображает перечень критериев и поля для внесения оптимальных и критических значений в виде нечётких интервалов выбранного критерия. Данная информация используется для поиска оптимального решения. Ниже списка критериев расположен перечень оптимизируемых параметров.

Правую нижнюю часть окна программного приложения занимает таблица соответствия значений параметров значению выбранного критерия. По сути, эту таблицу можно рассматривать как базу нечётких правил, в которой входными переменными являются оптимизируемые параметры, а выходной параметр – выбранный критерий. В эту таблицу правила можно добавлять с применением кнопки «Добавить», расположенной под таблицей. Также можно удалить правило.

В окне "Linguistic variables assignment" можно задавать критерии и параметры в виде лингвистических переменных с терм-множествами. Лингвистические и нечёткие переменные можно редактировать, добавлять или удалять.

После задания параметров, оптимальных и критических интервалов критериев, заполнения базы правил для каждого из критериев программное приложение осуществляет поиск решения. Результат выводится на экран. Пример поиска Парето-оптимального решения показан на рис. 3. В правой части окна приведён список параметров, для которых найдены оптимальные значения, слева – графическое отображение оптимума в виде нечеткого интервала.

На вкладке "Decision evaluation" выводится оценка Парето-оптимального решения с учетом полезности. Окно вкладки "Decision evaluation" показано на рис. 4.

В левой половине окна вкладки "Decision evaluation" приведён список решений и экспертные оценки эффективности этих решений. Кнопка "Сгенерировать решения" позволяет добавлять решения в список, при стремлении максимизировать каждый из критериев.



Рис. 3. Окно результата поиска Парето-оптимального решения

Кнопка "Add current decision" добавляет единственное решение, полученное с целью иметь максимальную выгоду в сочетании значений критериев в соответствии с их приоритетами. Решение можно посмотреть, применив кнопку "View decision" под таблицей. Решение выводится в виде нечетких интервалов значений для параметров и интервалов значений критериев.

Список состояний системы с графическим отображением этих состояний в виде треугольных функций принадлежности находится в правой части окна. Состояния можно добавлять, удалять, а их названия доступны для редактирования.

Вывод о выборе лучшего из решений находится в правой нижней части окна и принимается после оценки всех решений и ввода состояний системы по нажатию кнопки "Wald criterion valuation" или кнопки "Wald criterion valuation".

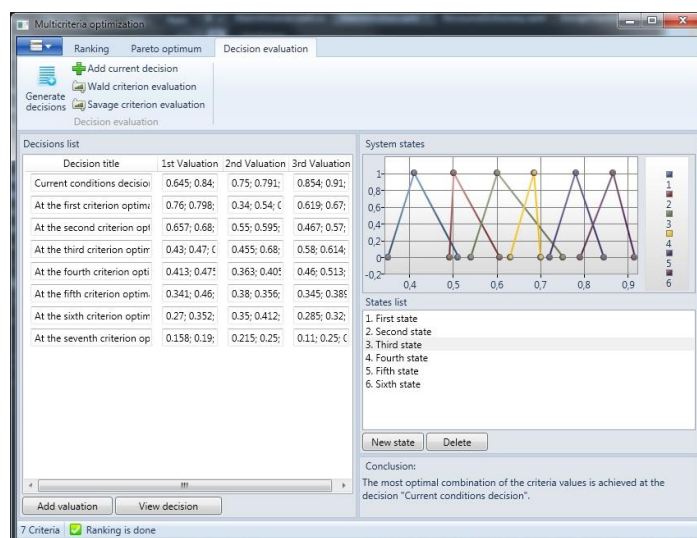


Рис. 4. Вид вкладки "Оценка решения"

Таким образом, модифицированный метод нечеткой пороговой оптимизации при поиске Парето-оптимального решения позволяет после определения нечеткого критерия первого ранга и нахождения его максимума находить максимальные значения остальных критериев с учетом введенных нечетких ограничений.

Вывод. Разработано информационное обеспечение для поиска Парето-оптимального решения [15] и комплексной оценки эффективности функционирования гибридных интеллектуальных систем управления. Применение информационного обеспечения при комплексной оценке эффективности функционирования гибридной системы управления позволяет при вербальном определении основных параметров системы получить заключение о качестве её работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов О.А. Гибридный регулятор для энергосберегающего управления электрокамерными печами // Промышленные контроллеры АСУ. – 2005. – № 7. – С. 29-30.
2. Вагин В.Н. Реализация концепции распределенного ИИ и многоагентности в системах поддержки принятия решений на базе комплекса G2+GDA // Труды Междун. семинара «Распределенный искусственный интеллект и многоагентные системы – DIAMAS 97». – СПб., 1997.
3. Гаврилов А.В. Архитектура гибридной системы управления мобильного робота // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 2.
4. Заргарян Ю.А. Разработка и исследование методов принятия решений в условиях неполноты данных при нечётком описании параметров моделей: Дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012.
5. Игнатьев В.В., Финаев В.И. The Use Hybrid Regulation in Desing of Control System // World Applied Sciences Journal. – 2013. – № 23 (11). – P. 1291-1297.
6. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы: теория и технология разработки. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 600 с.
7. Лаврик С.А. Построение гибридной нейроэкспертной системы определения информативных сейсмических атрибутов // Новые технологии. – 2007. – № 4.
8. Осипов Г.С. Динамика в системах, основанных на знаниях // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1998. – № 5. – С. 24-28.
9. Павленко Е.Н., Финаев В.И., Игнатьев В.В. Моделирование обучаемого нечёткого регулятора // Вестник РГУПС. – 2014. – № 1 (53). – С. 69-75.

10. *Финаев В.И., Павленко Е.Н., Кирильчик С.В.* Решение задач управления с применением интеллектуальных гибридных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 5 (154). – С. 140-147.
11. Altannar Chinchuluun, Panos M. Pardalos, Rentsen Enkhbat, Ider Tseveendorj. Optimization and Optimal Control: Theory and Applications. Publisher: Springer-Verlag New York, LLC. 2010. - P. 524.
12. *Finaev V.I., Zargaryan Yu.* Multicriterion Decision Making in Case of Incomplete Source Data. World Applied Sciences Journal 23 (9): 1253-1261, 2013 ISSN 1818-4952. ©IDOSI Publications, 2013 DOI: 0.5829/idosi.wasj.2013.23.09.13140. [Electronic resource]. – URL: [http://www.idosi.org/wasj/wasj23\(9\)13/19.pdf](http://www.idosi.org/wasj/wasj23(9)13/19.pdf).
13. *Gabriele Eichfelder.* Adaptive Scalarization Methods in Multiobjective Optimization. Publisher: Springer, 2008. - P. 256.
14. *Medsker L.R.* Hybrid Intelligent Systems // International Journal of Computational Intelligence and Organizations. – 1996. – Vol. 1. – P. 10-20.
15. *Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А.* Информационное обеспечение для задач многокритериальной оптимизации по методу Парето // Информатизация и связь. – 2013. – № 2. – С. 114-118.

REFERENCES

1. *Belousov O.A.* Gибридный регулятор для энергосберегающего управления электрокамерными печами [Hybrid controller for the power-saving control electrochemie furnaces], *Promyshlennyye kontrolyery ASU* [Industrial controllers ACS], 2005, No. 7, pp. 29-30.
2. *Vagin V.N.* Realizatsiya kontseptsii raspredelennogo II i mnogoagentnosti v sistemah podderzhki prinyatiya resheniy na baze kompleksa G2 GDA [Implementation of the concept of distributed AI and mnogodelnosti systems decision support on the basis of complex G2+GDA], *Trudy Mezhdun. seminarov «Raspredelennyy iskusstvennyy intellekt i mnogoagentnye sistemy – DIAMAS 97»* [Proceedings Of The International. workshop "Distributed artificial intelligence and multi - agent systems DIAMAS 97"]. St. Petersburg, 1997.
3. *Gavrilov A.V.* Arhitektura gibridnoy sistemy upravleniya mobil'nogo robota [The hybrid control system of mobile robot], *Nauchnyy vestnik NGTU* [Scientific Bulletin of NSTU], 2004, No. 2.
4. *Zargaryan Yu.A.* Razrabotka i issledovanie metodov prinyatiya resheniy v usloviyah nepolnoty dannykh pri nechetkom opisaniy parametrov modeley. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Research and development of methods of decision making with incomplete data when a vague description of model parameters. Cand. eng. sc. diss.]. Taganrog: TTI YuFU, 2012.
5. *Ignatev V.V., Finaev V.I.* The Use Hybrid Regulation in Desing of Control System, *World Applied Sciences Journal*. – 2013, No. 23 (11), pp. 1291-1297.
6. *Kolesnikov A.V.* Gибридные интеллектуальные системы: теория и технология разработки [Hybrid intelligent systems: theory and technology development]. St. Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 2001, 600 p.
7. *Lavrik S.A.* Postroenie gibridnoy neyroekspertnoy sistemy opredeleniya informativnykh seismicheskikh atributov [Building hybrid euroexpert system for identifying informative seismic attributes], *Novye tehnologii* [New technologies], No. 4, 2007.
8. *Osipov G.S.* Dinamika v sistemah, osnovannykh na znaniyah [Speaker systems, knowledge-based], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Theory and systems management], 1998, No. 5, pp. 24-28.
9. *Pavlenko E.N., Finaev V.I., Ignatev V.V.* Modelirovanie obuchaemogo nechetkogo regul'yatora [Simulation of fuzzy controller trainee], *Vestnik RGUPS* [Bulletin of the Rostov State University of Transport], 2014, No. 1 (53), pp. 69-75.
10. *Finaev V.I., Pavlenko E.N., Kirilchik S.V.* Reshenie zadach upravleniya s primeneniem intellektualnykh gibridnykh system [Solving the control problems using the intelligent hybrid systems], *Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 5 (154), pp. 140-147.
11. Altannar Chinchuluun, Panos M. Pardalos, Rentsen Enkhbat, Ider Tseveendorj. Optimization and Optimal Control: Theory and Applications. Publisher: Springer-Verlag New York, LLC. 2010, pp. 524.

12. *Finaev V.I., Zargaryan Yu.* Multicriterion Decision Making in Case of Incomplete Source Data. *World Applied Sciences Journal* 23 (9): 1253-1261, 2013 ISSN 1818-4952. ©IDOSI Publications, 2013 DOI: 0.5829/idosi.wasj.2013.23.09.13140. [Electronic resource]. Available at: [http://www.idosi.org/wasj/wasj23\(9\)13/19.pdf](http://www.idosi.org/wasj/wasj23(9)13/19.pdf).
13. *Gabriele Eichfelder.* Adaptive Scalarization Methods in Multiobjective Optimization. Publisher: Springer, 2008, pp. 256.
14. *Medsker L.R.* Hybrid Intelligent Systems, *International Journal of Computational Intelligence and Organizations*, 1996, Vol. 1, pp. 10-20.
15. *Zargaryan E.V., Zargaryan Yu.A.* Informatsionnoe obespechenie dlya zadach mnogokriterialnoy optimizatsii po metodu Pareto [Information support for the task of multi-objective optimization Pareto method], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and Communication], 2013 No. 2, pp. 114-118.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Заргарян Юрий Артурович – Южный федеральный университет; e-mail: jury.zargaryan@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89604606046; кафедра систем автоматического управления; к.т.н., ассистент.

Заргарян Елена Валерьевна – e-mail: e.zargaryan@gmail.com; тел.: 89064179006; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Пушнина Инна Валерьевна – e-mail: inna.pushnina@gmail.com; тел.: 89034619646; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Zargaryan Yury Artyrovich – Southern Federal University; e-mail: jury.zargaryan@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79604606046; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; assistant professor.

Zargaryan Elena Valerevna – e-mail: e.zargaryan@gmail.com; phone: +79064179006; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Pushnina Inna Valerevna – e-mail: inna.pushnina@gmail.com; phone: +79034619646; the department of automatic control systems; assistant professor.

УДК 629.73.015:533.6:519.711.3

В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, А.Е. Кульченко

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ОДНОВИНТОВЫМ МИНИ-ВЕРТОЛЕТОМ*

Обозначена актуальность синтеза алгоритмов управления автопилота роботизированного вертолетного комплекса. Приведена постановка задачи синтеза алгоритмов управления. Описана процедура синтеза алгоритмов автопилота роботизированного вертолетного комплекса. Приведен обобщенный алгоритм позиционно-траекторного управления подвижными объектами. Для того чтобы применить позиционно-траекторные алгоритмы управления к одновинтовому мини-вертолету, решаются 3 задачи, связанные с особенностями одновинтового мини-вертолета. В задаче 1 рассмотрены нелинейные преобразования для приведения управляющих сил к управлениям. Представлена схема для перехода к аналоговым сигналам исполнительных механизмов вертолета. Решение задачи 2 сводится к определению технических ограничений. В задаче 3 рассмотрена проблема распределения управлений, так как число каналов управления вертолетом меньше числа степеней подвижности вертолета, т.е. за установку углов тангажа и крена одновинтового мини-вертолета отвечают те же устройства управления, которые задают его поступатель-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ № 13-08-00315-а, гранта президента РФ МД-1098.2013.10 и научной школы НШ-3437.2014.10.