

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 20

2019

№ 11

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:  
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:  
БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.  
ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.  
ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:  
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:  
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН  
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН  
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН  
ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН  
КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН  
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН  
КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН  
МИКРИН Е. А., акад. РАН  
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН  
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН  
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН  
СИГОВ А. С., акад. РАН  
СОЙФЕР В. А., акад. РАН  
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН  
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН  
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН  
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН  
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН  
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:  
DANIELE Z., PhD, Италия  
DORANTES D. J., PhD, Турция  
GROUMPOS P. P., PhD, Греция  
ISIDORI A., PhD, Италия  
KATALINIC B., PhD, Австрия  
LIN CH.-Y., PhD, Тайвань  
MASON O. J., PhD, Ирландия  
ORTEGA R. S., PhD, Франция  
SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США  
STRZELECKI R. M., PhD, Польша  
SUBUDHI B. D., PhD, Индия  
АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан  
ГАРАШЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина  
ТРОФИМЕНКО Е. Е., д.т.н., Беларусь  
БОБЦОВ А. А., д.т.н.  
БУКОВ В. Н., д.т.н.  
ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.  
ЖУКОВ И. А., д.т.н.  
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.  
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.  
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.  
ЛОХИН В. М., д.т.н.  
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д.ф.-м.н.  
ПУТОВ В. В., д.т.н.  
ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.  
РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.  
СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.  
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.  
ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.  
ФУРСОВ В. А., д.т.н.  
ЮРЕВИЧ Е. И., д.т.н.

Редакция:  
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:  
АНТОНОВ Б. И.

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Каменецкий В. А.** Линейные матричные неравенства в задачах устойчивости: ретро-спектива и теоретические аспекты ..... 643
- Феофилов С. В., Козырь А. В.** Оценка устойчивости периодических движений и особенности синтеза регуляторов в релейных системах с цифровым управлением ... 655
- Колесников А. А., Якименко О. И., Радионов И. А., Калий Д. С.** Сравнение методов классической и синергетической теорий управления движением автономного подводного аппарата ..... 663

### РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Ali Ben Fathallah M., Ben Othman A., Besbes M.** Stabilizing a DC Motor Speed of Photovoltaic Pumping System Using a Super Capacitor and Fuzzy Logic Controller ..... 669
- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения ..... 677
- Инь Шуай, Ющенко А. С.** Диалоговая система управления роботом на базе теории конечных автоматов ..... 686
- Либерзон М. Р.** Технология ГЕОНОД: состояние и перспективы автоматизации и управления ..... 696

*Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в БД RSCI на платформе Web of Science.*

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:  
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: [mech@novtex.ru](mailto:mech@novtex.ru)

# MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



## MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

**Editor-in-Chief**

FILIMONOV N. B.

**Deputy Editors-in-Chief:**

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

**Responsible Secretary:**

BEZMENOVA M. Yu.

**Editorial Board:**

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

MIKRIN E. A.

PESHEKHONOV V. G.

REZCHIKOV A. F.

SCHERBATYUK A. F.

SEBRYAKOV G. G.

SIGOV A. S.

SOJFER V. A.

SOLOMENTSEV Yu. M.

VASSILYEV S. N.

YUSUPOV R. M.

ZHELTOV S. Yu.

**Editorial Council:**

ALIEV T. A., Azerbaijan

DANIELE Z., PhD, Italy

DORANTES D. J., PhD, Turkey

GARASCHENKO F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

TROFIMENKO Ye. Ye., Belarus

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V.M.

PAVLOVSKY V. E.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEEV S. F.

YUREVICH E. I.

ZHUKOV I. A.

**Editorial Staff:**

BEZMENOVA M. Yu.

**Director of the Publishing House:**

ANTONOV B. I.

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and prospective development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

## CONTENTS

### SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

- Kamenetskiy V. A.** Linear Matrix Inequalities in Stability Problems: Retrospective and Theoretical Aspects ..... 643
- Feofilov S. V., Kozyr A. V.** Stability of Periodic Motions and Synthesis of Relay Sampled Data Control Systems ..... 655
- Kolesnikov A. A., Yakimenko O. I., Radionov I. A., Kaliy D. S.** Comparison of the Methods of Classical and Synergetic Theories of Control of the Movement Autonomous Underwater Machine ..... 665

### ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Ali Ben Fathallah M., Ben Othman A., Besbes M.** Stabilizing a DC Motor Speed of Photovoltaic Pumping System Using a Super Capacitor and Fuzzy Logic Controller ..... 669
- Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Issues of Motion Control of Mobile Robots Based on the Potential Guidance Method ..... 677
- Yin Shuai, Yuschenko A. S.** Dialogue System of Controlling Robot Based on the Theory of Finite-State Automata ..... 686
- Liberzon M. R.** Technology GEONOD: Status and Prospects of Automation and Control . . . . 696

Information about the journal is available online at:  
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: [mech@novtex.ru](mailto:mech@novtex.ru)

В. А. Каменецкий, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., vlakam@ipu.ru,  
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

## Линейные матричные неравенства в задачах устойчивости: ретроспектива и теоретические аспекты<sup>1</sup>

*Работа представляет собой расширенную и переработанную версию доклада, сделанного на конференции имени Е. С. Пятницкого в 2016 г.*

*Рассматриваются некоторые аспекты развития теории линейных матричных неравенств. Освещается ряд результатов, полученных на начальном этапе развития этой теории как при разработке численных методов, так и при получении аналитических условий их разрешимости. Основное внимание сосредоточено на системе линейных матричных неравенств, возникающей при решении задачи абсолютной устойчивости. Е. С. Пятницким и его учениками показано, что разрешимость этой системы является критерием существования квадратичной функции Ляпунова и достаточным условием абсолютной устойчивости. Рассматриваются предпосылки, приведшие к данному результату. Показывается использование рассматриваемой системы неравенств для исследования устойчивости гибридных систем, описываемых дифференциальными включениями и системами с переключениями. Приводится анализ цитирования некоторых работ школы Пятницкого по теории устойчивости и теории систем линейных матричных неравенств, из которого следует востребованность результатов этих работ в настоящее время.*

*При разработке численных методов Е. С. Пятницким впервые показано, что вопрос о разрешимости системы линейных матричных неравенств сводится к задаче выпуклого программирования. Приводится интересный градиентный алгоритм поиска решений такой системы.*

*При анализе аналитических условий разрешимости отмечается полученный автором совместно с Е. С. Пятницким критерий неразрешимости интересующей системы. В современных терминах этот результат можно рассматривать как описание допустимого множества в двойственной задаче полуопределенного программирования. Похожий результат приводится в известной книге С. Бойда с соавторами. В работе показывается, что результат Бойда и др. является простым следствием критерия неразрешимости. Здесь критерий неразрешимости обобщается и уточняется.*

**Ключевые слова:** квадратичные функции Ляпунова, линейные матричные неравенства, абсолютная устойчивость, системы с переключениями

### Введение

В настоящее время латинская аббревиатура LMI (Linear Matrix Inequality) и ее русский эквивалент ЛМН (линейное матричное неравенство) знакомы всем специалистам по теории управления и устойчивости. Роль ЛМН в теории устойчивости и управления в большинстве случаев обусловлена использованием квадратичных функций Ляпунова. Наличие эффективных методов численного решения

ЛМН делает метод функций Ляпунова полностью конструктивным, что ведет к чрезвычайно широкому использованию техники ЛМН. На русском языке использованию техники ЛМН посвящены монографии [1–3], вопросы применения ЛМН затрагиваются в книге [4], в учебнике [5] и огромном числе журнальных публикаций. Во введении книги [3] говорится, что роль линейных матричных неравенств "в теории управления стала ясна после появления книги С. Бойда с соавторами [6], а вычислительные средства для их решения появились после создания метода внутренних точек Нестерова и Немировского." К настоящему времени с момента выхода работы [6] прошло ровно 25 лет. Безусловно, работа [6] сыграла

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым Президиумом Российской академии наук, № 7 "Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники".

огромную роль в продвижении техники ЛМН в теорию управления. Говоря о роли книги [6], подчеркнем, что в библиографию включены 27 работ Е. С. Пятницкого и его учеников, из которых в 11 непосредственно рассматриваются вопросы теории ЛМН и методы их численного решения. В данной статье рассматривается развитие теории ЛМН до появления работы [6]. Истории развития теории ЛМН посвящены разделы в книгах [5, 6], докладе [7]. В этих публикациях высоко оценен вклад школы Пятницкого в теорию ЛМН. В настоящей работе, со своей точки зрения и опираясь на исторические очерки [5–7], освещается ряд результатов Е. С. Пятницкого и его соавторов, которые, в известной степени, создавали предпосылки к тому, чтобы теория ЛМН стала теперь столь популярной. Особое внимание будет уделено работе [8] и одному результату из этой работы, который стал широко известным после выхода работы [6].

Предлагаемый ниже материал представляет собой расширенную и переработанную версию доклада [9], сделанного на конференции имени Пятницкого в 2016 г.

### Рассматриваемый класс линейных матричных неравенств

Отметим, что речь пойдет не об одном ЛМН ляпуновского типа, известного со времен А. М. Ляпунова, и не о ЛМН с ограничениями, которое было с блеском исследовано В. А. Якубовичем и его сотрудниками с помощью  $S$ -процедуры и частотной теоремы [10], а о следующей системе ЛМН относительно симметрической матрицы  $L$  ( $L = L^T$ )

$$A_s^T L + L A_s < 0, s = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Неравенство  $W < 0$  ( $> 0$ ) для матрицы  $W = W^T$  означает, что квадратичная форма  $x^T W x$  является отрицательно (положительно) определенной, т. е.  $x^T W x < 0$  ( $> 0$ ) при  $x \neq 0$ . В работе [11] говорится, что система (1) появилась в статье [12] и подразумевается в работе [13] как необходимое и достаточное условие существования квадратичной функции Ляпунова в задаче абсолютной устойчивости системы с несколькими нелинейностями. К оговоркам, касающимся заявленного приоритета и приведенным в начале этого раздела, ниже еще

будут добавлены разъяснения относительно результатов работы [14]. В свою очередь, в [12] система (1) приводится со ссылкой на работу [15] и, следовательно, своим появлением для задачи абсолютной устойчивости она обязана Е. С. Пятницкому, что логично вытекает из ранее проведенных им исследований.

### Абсолютная устойчивость и линейные матричные неравенства

В своей докторской диссертации и работе [16] Е. С. Пятницкий использовал для решения задачи абсолютной устойчивости чрезвычайно популярную в то время теорию оптимального управления. Для этого им было показано, что задача абсолютной устойчивости в стандартной постановке эквивалентна устойчивости линейной нестационарной системы

$$\dot{x} = Ax + \sum_{j=1}^m b_j u_j \langle c_j, x \rangle \quad (2)$$

при произвольных измеримых функциях  $u(t) = \|u_j(t)\|_{j=1}^m$ , удовлетворяющих ограничениям  $0 \leq u_j(t) \leq k_j, j = \overline{1, m}$ . Здесь  $A, b_j, c_j$  — числовые матрица и векторы объекта;  $\langle \cdot \rangle$  — скалярное произведение векторов. Если в качестве функции Ляпунова используется квадратичная форма  $v(x) = x^T L x$ , то говорят, что  $v(x)$  — квадратичная функция Ляпунова (КФЛ). Производная такой  $v(x)$  в силу системы (2) имеет вид

$$\dot{v}(x, u) = x^T (A^T L + L A) x + \sum_{j=1}^m u_j \langle L b_j, x \rangle \langle c_j, x \rangle, \quad (3)$$

т. е. линейно зависит от  $u_j$ . Таким образом, неравенство  $\dot{v}(x, u) < 0, x \neq 0$ , достаточно проверить лишь в крайних точках области изменения функции  $u(t)$ , т. е. в вершинах  $m$ -мерного параллелепипеда. Вершинами этого параллелепипеда  $H$  будут служить точки  $h_s = \|h_{sj}\|_{j=1}^m, s = \overline{1, N}$  ( $N = 2^m$ ), где величина  $h_{sj}$  принимает одно из двух значений: 0 или  $k_j$ . Поэтому требование отрицательной определенности квадратичной формы (3) при всех допустимых  $u$  эквивалентно выполнению системы (1), в которой матрицы  $A_s$  имеют специальный вид:  $A_s = A + \sum_{j=1}^m h_{js} b_j c_j^T$ . Стоит отметить, что использование системы (2) для исследования задачи абсолютной устойчи-

ности делает получение системы максимально простым и наглядным, однако не является непременным условием для этого. В стандартной постановке задачи абсолютной устойчивости требуется, чтобы система

$$\dot{x} = Ax + \sum_{j=1}^m b_j \varphi_j(t, \sigma_j), \quad \sigma_j = \langle c_j, x \rangle \quad (4)$$

была асимптотически устойчива в целом при любых нелинейностях  $\varphi = \|\varphi_j\|_{j=1}^m$ , удовлетворяющих секторным ограничениям  $0 \leq \varphi_j \sigma_j \leq k_j \sigma_j^2$ ,  $j = \overline{1, m}$ . Производная КФЛ  $v(x)$  в силу системы (4) имеет вид (аналог (3))

$$\dot{v}(x, \varphi) = x^T (A^T L + LA)x + 2 \sum_{j=1}^m \varphi_j \langle Lb_j, x \rangle, \quad (5)$$

т. е. снова линейно зависит теперь от  $\varphi_j$ . Секторные ограничения эквивалентны требованиям  $\varphi_j \in [0, k_j \sigma_j]$  (или  $\varphi_j \in [k_j \sigma_j, 0]$ ),  $j = \overline{1, m}$ , поэтому неравенство  $\dot{v}(x, u) < 0$ ,  $x \neq 0$ , достаточно проверять лишь в крайних точках области изменения функций  $\varphi_j$ , т. е. при  $\varphi_j = 0$  и  $\varphi_j = k_j \sigma_j$ , что приводит в точности к системе (1) с матрицами  $A_s$  указанного выше вида.

### Численные методы решения линейных матричных неравенств

Работа [17] посвящена созданию численного метода построения КФЛ для задачи абсолютной устойчивости. В статье [8] аналогичная задача решается для специальных дифференциальных включений, которые будут описаны ниже. Поскольку в обоих случаях вопрос о существовании КФЛ сводится к вопросу о разрешимости системы ЛМН (1), то, по существу, и работа [8], и работа [17] посвящены созданию численных методов решения системы неравенств (1). Подчеркнем, что Е. С. Пятницкий был активным сторонником и в определенном смысле первопроходцем во внедрении численных методов в процесс нахождения функций Ляпунова. По мнению авторов работы [7], Е. С. Пятницкий и В. И. Скородинский были первыми [13, 15], кто сформулировал задачу поиска функции Ляпунова как задачу выпуклого программирования и затем применили алгоритм, гарантирующий решение этой задачи.

Кратко изложим численный метод решения системы (1) из работы [8]. Систему (1) можно заменить одним ЛМН, если матрицы, стоящие в левых частях неравенств в (1), разместить в качестве диагональных блоков большой матрицы и потребовать ее отрицательной определенности. Квадратичная форма, соответствующая этой большой матрице, имеет вид

$$F(L, X) = \sum_{s=1}^N (x_s)^T (A_s^T L + LA_s) x_s, \quad (6)$$

где вектор  $X$  является объединением  $N$  векторов  $x_s \in R^n$ . Теорема 2 из работы [8] устанавливает связь между множеством седловых точек функции  $F(L, X)$  и множеством  $C$  всех решений системы (1): если  $C \neq \emptyset$ , то множество  $D = \{(\tilde{L}; \tilde{X}) : \tilde{L} \in \tilde{C}, \tilde{X} = 0\}$  является множеством всех седловых точек функции  $F(L, X)$  из (6). Здесь и далее верхняя черта над множеством означает его замыкание.

Для поиска седловых точек функции (6) в работе [8] используется градиентный алгоритм вида

$$\dot{X} = \partial F(L, X) / \partial X, \quad \dot{L} = -\partial F(L, X) / \partial L, \quad (7)$$

для которого при  $C \neq \emptyset$  устанавливается поточечная сходимость решений (7) при любых начальных условиях к точкам вида  $(\tilde{L}; \tilde{X})$ ,  $\tilde{X} = 0$ . С этой целью метод функций Ляпунова используется уже для дифференциальных уравнений поискового алгоритма (7), причем в весьма интересной форме: используется набор функций Ляпунова, которые монотонно изменяются вдоль решений (7), но не являются положительно определенными.

В работе [11] теорема 2 [8] и результат о сходимости решений (7) цитируются весьма подробно (им посвящен отдельный раздел: "7.4. Kamenetskii-Pyatnitskii saddle point method") и даже эмоционально. В [11] говорится, что В. А. Каменецкий и Е. С. Пятницкий доказали "the remarkable fact" о сходимости решений системы (7) при любых начальных условиях к седловым точкам функции (6) в случае, если  $C \neq \emptyset$ , и несмотря на то что (6) не является вогнутой по  $X$  при всех  $L$ . На самом деле в работе [8] показано, что предельные точки  $(\tilde{L}; \tilde{X}) \in D$ , кроме случаев сходимости решений (7) к неустойчивым стационарным точкам.

## Устойчивость гибридных систем и линейные матричные неравенства

Поскольку специфика матриц  $A_s$  при разработке численных методов не играет той роли, как при получении частотных критериев [12], то естественно перейти от задачи абсолютной устойчивости систем (2) и (4) к задаче устойчивости дифференциального включения [8]

$$\dot{x} \in F(x), F(x) = \{y: y = Ax, A \in \bar{A}\}, \quad (8)$$

где  $\bar{A}$  — выпуклый многогранник в линейном пространстве  $R^{n \times n}$  матриц порядка  $n$ . Считаем, что многогранник  $\bar{A}$  задается своими вершинами  $A_s, s = \overline{1, N}$ , т. е.  $\bar{A} = \text{conv}\{A_1, \dots, A_N\}$ . Матрицы  $A_s$  теперь произвольного вида. Требования к производной функции Ляпунова  $v(x)$  для анализа устойчивости включения (8) с компактным  $F(x)$  сводятся к неравенству [18]

$$\max_{y \in F(x)} \langle \partial v / \partial x, y \rangle < 0, x \neq 0. \quad (9)$$

В случае КФЛ  $v(x) = x^T Lx$  функция под знаком  $\max$  в (9) имеет вид  $\langle 2Lx, y \rangle$  и линейно зависит от  $y$ . Поскольку максимум линейной функции на многограннике достигается в крайних точках (вершинах), т. е. при  $y = A_s x$ , то существование КФЛ  $v(x) = x^T Lx$ , удовлетворяющей (9), эквивалентно разрешимости (1) при произвольных  $A_s$ , которые определяют (8).

В настоящее время весьма популярно изучение устойчивости гибридных систем, особенно систем с переключениями [19–21]. Наиболее простым классом таких систем являются си-

стемы с переключениями линейных автономных правых частей (линейные системы с переключениями). Множество решений линейных систем с переключениями является подмножеством решений соответствующего включения (8), если в нем ограничиться кусочно-постоянными и односторонне непрерывными в точках разрыва селекторами. Как отмечено в работе [20], замыкание множества решений линейной системы с переключениями совпадает с множеством решений включения (8), что вполне понятно, если принять во внимание некоторые свойства дифференциальных включений и то, как соотносятся кусочно-постоянные и измеримые функции. Таким образом, устойчивость линейных систем с переключениями при произвольных переключениях эквивалентна устойчивости дифференциального включения (8). Результаты А. П. Молчанова и Е. С. Пятницкого [22, 23], Е. С. Пятницкого и Л. Б. Рапопорта [24] по устойчивости включения (8) остаются основополагающими применительно к задаче устойчивости систем с переключениями и широко цитируются (см., например, [20, 21] и таблицу).

Перечисленные в таблице работы Е. С. Пятницкого и его учеников приведены также в работах [25], [8], [23], [24] в томе I, [15] в томе II. Среди перечисленных работ, конечно, выделяется статья [23] как по масштабу приведенных в ней результатов, так и по значению этих результатов для теории устойчивости, в том числе и систем с переключениями. К сожалению, пик цитирований этой работы приходится на те годы, когда оба автора уже не могли порадоваться своему заслуженному успеху.

Число цитирований по годам работ школы Пятницкого (по данным Scopus)

*The number of citations by the years of publications of school of Pyatnitskiy (according to Scopus)*

Год	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	87-02
PS [15]	1	0	0	0	0	1	0	1	0	2	5	0	2	0	1	2	15
КР [8]	—	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3
МР [23]	—	—	—	—	—	—	—	1	0	2	3	4	4	10	7	9	40
РР [24]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0	0	0	1	1	1	4
Год	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	03-18
PS [15]	1	1	0	4	0	0	0	1	0	0	1	1	2	0	0	0	11
КР [8]	1	4	1	5	2	1	5	3	1	4	1	0	1	3	6	5	43
МР [23]	8	12	14	14	17	14	21	17	16	8	26	17	13	19	14	6	236
РР [24]	3	5	4	8	11	3	3	4	8	2	5	4	4	1	2	0	67

В работах по линейным системам с переключениями для КФЛ, доставляющих решение системе (1), используется термин — общая квадратичная функция Ляпунова (ОКФЛ, Common Lyapunov function). Термин удачный, действительно, из (1) видно, что  $v(x) = x^T L x$  является КФЛ для каждой линейной стационарной системы  $\dot{x} = A_s x$  (Linear Time-Invariant, LTI). Вместе с тем, в соответствии с (9) эта КФЛ является функцией Ляпунова для включения (8) (обратите внимание на год выхода работы [18]). Здесь уместно отметить, что термины "система с переключениями" и "общая функция Ляпунова" используются (по-видимому, впервые) в работе [26] для систем второго порядка с переключениями между однородными системами.

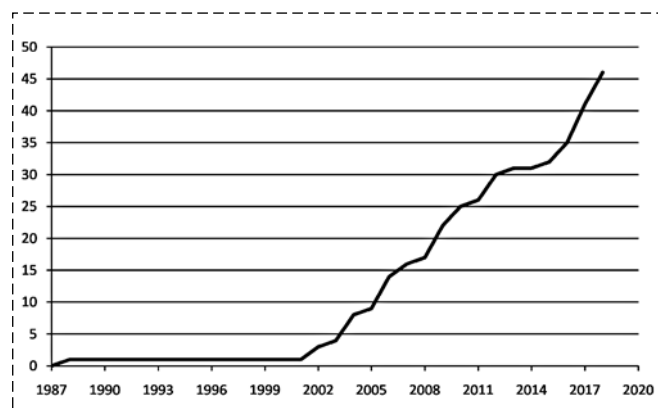
### Критерий неразрешимости системы линейных матричных неравенств

Наконец, обратимся к следующему результату, приведенному в работе [8] в виде вспомогательного.

**Лемма 1 [8].** Система матричных неравенств (1) не имеет решения если и только если существуют такие, не равные нулю одновременно, матрицы  $N_s \geq 0$ , что

$$\sum_{s=1}^N (A_s N_s + N_s A_s^T) = 0. \quad (10)$$

Решение каждого неравенства в системе (1) представляет собой открытый выпуклый конус, а наличие общего решения означает не пустое пересечение этих конусов. Из теории



Увеличение цитирований [8] по годам  
Increasing of citations of [8] by the years

выпуклого анализа следует, что пустое пересечение таких конусов эквивалентно наличию в сопряженных конусах элементов, не равных одновременно нулю, чья сумма равна нулю. Именно это и отражает соотношение (10).

Непосредственно лемма 1 используется в работах [27, 28]. Во многом благодаря лемме 1 цитирование работы [8] за последние 10 лет увеличилось на порядок (см. таблицу, рисунок).

В работе [6, с. 9] приводится следующий результат, который для удобства сформулируем в виде утверждения.

**Утверждение 1.** У системы

$$L > 0, A_s^T L + L A_s < 0, s = 1, \dots, N, \quad (11)$$

отсутствует решение тогда и только тогда, когда существуют  $N_s \geq 0$ , не равные одновременно 0, такие что

$$\sum_{s=1}^N (A_s N_s + N_s A_s^T) = N_0. \quad (12)$$

В библиографических комментариях к разделу по поводу утверждения 1 в работе [6, с. 29] говорится, что в случае системы неравенств ляпуновского типа "эти" условия неразрешимости даются в работах [14] и [8, 17]. Отметим сразу, что в статье [17] результат, аналогичный лемме 1, отсутствует. В работе [14] рассматриваются линейные алгебраические неравенства, аргументами которых являются эрмитовы матрицы. Рассматривается чрезвычайно общая формулировка задачи о разрешимости таких неравенств. Одним из результатов является известная теорема о разрешимости Беллмана—Фаня. Попытки вывести в готовом виде лемму 1 (утверждение 1) из результатов [14] не привели к успеху. Кроме этого, в работе [14] соотношение рассматриваемой там задачи с вопросами устойчивости исчерпывается констатацией того факта, что в самом тривиальном случае эта задача мало отличается от матричного уравнения Ляпунова с  $-E$  в правой части.

Другое дело — это используемая в работе [14] методика. Стоит выделить три момента. Во-первых, используется техника выпуклых конусов. Во-вторых, исследование разрешимости системы матричных неравенств сводится к применению теоремы отделимости (см., например, [29, с. 124]). Наконец, система матричных неравенств сводится к одному "большому"

матричному неравенству, матрица которого сформирована из диагональных блоков, которыми служат матрицы отдельных неравенств исходной системы.

В литературе в основном цитируется соотношение (12) со ссылкой на работу [6], что естественно, учитывая популярность монографии [6] (см., например, [19, с. 28]), тем приятнее находить работы более шепетильных авторов [20, 27, 30]. В [20] приводится (10) со ссылкой на [8] и (12) со ссылкой на [6] и отмечается, что второе легко следует из первого. В работе [27] приводится вариант леммы 1 для комплексных матриц (теорема 5 в [27]) и говорится, что задача нахождения ОКФЛ может быть переформулирована как задача полуопределенного программирования. Затем переход к двойственной задаче приводит к теореме 5 [27]. Там же отмечается, что трактовка этих идей дается в работе [31], а доказательство можно найти в статье [8].

Обсуждение результата леммы 1 было бы неполным, если не уделить внимание работе [31], которая в статье [27] названа "expository paper". В этой работе показывается, как широкий круг задач теории управления может быть решен с использованием тех моментов из методики [14], о которых говорилось выше. Применительно к интересующей нас системе (1) в работе [31] рассматривается ее комплексный вариант из двух неравенств, дополненный требованием  $L > 0$ , ссылка на [8] отсутствует.

Отметим, что несмотря на приведенную цитату и название работы [31] лемма 1 не имеет прямого отношения к задаче полуопределенного программирования [32], так как задача полуопределенного программирования — это в первую очередь экстремальная задача, а лемма 1 всего лишь дает двойственное описание множества, являющегося допустимым в этой задаче.

### Сопоставления, обоснования, пояснения

Покажем, что приведенное утверждение 1 [6] является тривиальным следствием леммы 1 [8]. Система (11) отличается от системы (1) наличием дополнительного неравенства  $L > 0$ . Представим это неравенство в виде  $A_0^T L + L A_0 < 0$  при  $A_0 = -(1/2)E_n$ , где  $E_n$  — единичная матрица порядка  $n$ . Следовательно, система (11) представлена в виде (1), и по лемме 1 [8] у этой системы отсутствует решение тогда и только тог-

да, когда существуют  $N_s \geq 0$ , не равные одновременно 0, такие что

$$\begin{aligned} A_0 N_0 + N_0 A_0^T + \sum_{s=1}^N (A_s N_s + N_s A_s^T) = \\ = -N_0 + \sum_{s=1}^N (A_s N_s + N_s A_s^T) = 0. \end{aligned}$$

Последнее соотношение в точности совпадает с (12).

Обоснование утверждения 1, которое дано в работе [6], фактически используется в статье [31] в качестве теоретического фундамента (теорема 1 [31]). Остановимся на этом поподробнее. Пусть  $S^n$  — пространство симметрических  $n \times n$  матриц ( $S^n \subset R^{n \times n}$ ). В работах [6, 31] ЛМН рассматривается в канонической форме

$$R[x] = \sum_{i=1}^m x_i A_i < 0, \quad (14)$$

где  $x_i \in R^m$ ,  $A_i \in S^n$ . В [6, 31] в выражении для  $R[x]$  еще присутствовал свободный член  $A_0$ , который в (14) отброшен, чтобы неравенство было действительно линейным по  $x$ , а не аффинным.

Пусть сначала система (1) состоит из одного неравенства

$$A^T L + L A < 0. \quad (15)$$

О том, как неравенство (15) представить в канонической форме (14), можно посмотреть, например, в работе [3, с. 124]. В этом случае размерность вектора  $x$  совпадает с размерностью пространства  $S^n$ , т. е.  $m = n(n + 1)/2$ . Вектор  $x$  этом случае отождествляется с симметрической матрицей  $X \in S^n$ . Неравенство (14) можно еще представить как уравнение на конусе  $R[X] = Y$ ,  $Y \in -K^+$ , как это делается в работе [33]. Здесь  $K^+$  — конус положительно определенных матриц. Конус  $K^+$ , как известно [33, 34], является открытым конусом, причем его замыкание  $K^+$  (конус неотрицательных матриц) есть самосопряженный конус, т. е.  $(K^+)^* = K^+$ . Напомним, что конус  $K^*$ , сопряженный конусу  $K$  по отношению к стандартному скалярному произведению  $\langle W, V \rangle = \text{tr}(WV)$  в пространстве  $S^n$ , определяется соотношением  $K^* = \{W : \langle W, V \rangle \geq 0, V \in K\}$ .

Отсутствие решений у ЛМН (14) означает, что  $R[S^n] \cap K^- = \emptyset$  ( $K^- = -K^+$ ). Тогда по тео-



реме отделимости [29, с. 124] существует  $N \in S^n$ ,  $N \neq 0$ , такой что  $\langle N, Y \rangle \geq \langle N, W \rangle$  для любых  $Y \in R[S^n]$  и  $W \in K^-$ , или  $\langle N, R[X] \rangle \geq \langle N, W \rangle$  для любых  $X \in S^n$  и  $W \in K^-$ . Последнее соотношение можно переписать следующим образом:

$$\langle R^*[N], X \rangle \geq \langle N, W \rangle, X \in S^n, W \in K^-, \quad (16)$$

где оператор  $R^*[\cdot]$ , сопряженный оператору  $R[\cdot]$  по отношению к стандартному скалярному произведению в пространстве  $S^n$ , определяется соотношением  $\langle W, R[V] \rangle = \langle R^*[W], V \rangle$ , которое должно выполняться для любых  $W, V \in S^n$ . Выполнение условия (16) при некотором  $\tilde{W}$  и любых  $X \in S^n$  возможно, если и только если  $R^*[N] = 0$ . Таким образом, (16) приобретает вид:  $\langle N, W \rangle \geq 0$  для любых  $W \in K^+$ , откуда следует, что  $N \in (K^+)^* = K^+$  или  $N \geq 0$ .

Оператор  $R^*[\cdot]$ , сопряженный оператору из (15), определяется соотношением

$$\begin{aligned} \langle R[L], W \rangle &= \langle A^T L + LA, W \rangle = \\ &= \text{tr}(A^T L W + LA W) = \text{tr}(L(WA^T + AW)) = \\ &= \langle L, WA^T + AW \rangle = \langle L, R^*[W] \rangle. \end{aligned} \quad (17)$$

Таким образом,  $R^*[W] = WA^T + AW$ . В результате пришли к выводу, что у неравенства (16) отсутствует решение тогда и только тогда, когда существует матрица  $N \geq 0$ ,  $N \neq 0$ , такая что  $NA^T + AN = 0$ .

Исходя из этого результата в работе [31] доказывается известный результат [27, 35]: неравенство (15) разрешимо, если и только если матрица  $A$  обладает регулярной инерцией (доказательство приводится для комплексного случая, но результат верен и для действительного). Напомним, что инерцией матрицы  $A$  называется [27, 35] упорядоченная тройка чисел:

$$\text{In}(A) = (i_+(A), i_-(A), i_0(A)),$$

где  $i_+(A)$ ,  $i_-(A)$ ,  $i_0(A)$  — число собственных чисел матрицы  $A$  с положительной, отрицательной и нулевой действительными частями соответственно. Если  $i_0(A) = 0$ , то матрица  $A$  обладает регулярной инерцией.

От одного неравенства вернемся к системе (1). В доказательстве леммы 1 [8] говорится, что из гурвицевости матриц  $A_s$  следует невырожденность (обратимость) линейных опера-

торов  $R_s[L] = A_s^T L + LA_s$ . Ключевые слова здесь не гурвицевость матриц, а невырожденность линейных операторов. Гурвицевость матриц  $A_s$ , очевидно, предполагается в утверждении из работы [6], так как это является необходимым условием совместности системы (11). На самом деле лемма 1 [8] справедлива при условии невырожденности операторов Ляпунова  $R_s[L] = A_s^T L + LA_s$ , т. е. при  $\lambda_i(A_s) + \lambda_j(A_s) \neq 0$ ,  $i, j = 1, n$ ,  $s = 1, N$  (при таких условиях лемма 1 приведена в кандидатской диссертации автора, 1984 г.). Таким образом, лемма 1 применима для исследования разрешимости (1) в задачах абсолютной неустойчивости систем (2) и (4) и неустойчивости включения (8). В работе [8] рассматриваются как задача устойчивости, так и задача неустойчивости, поэтому отсутствие соответствующих разъяснений в доказательстве леммы 1 [8] теперь можно объяснить только стремлением к краткости изложения.

В работах [8, 17, 36] все результаты обобщаются на системы матричных неравенств общего вида

$$R_s[L] < 0, s = 1, \dots, N, \quad (18)$$

где  $R_s[\cdot]$  — линейные операторы в пространстве  $S^n$ . В случае  $R_s[L] = A_s^T L + LA_s$  система (18) совпадает с (1). Приведем полную версию леммы 1 для системы (18) из упомянутой диссертации.

**Лемма 2.** Пусть в (18)  $R_s[\cdot]$  являются невырожденными и имеют обратные операторы  $R_s^{-1}[\cdot]$ . Тогда система матричных неравенств (18) не имеет решения в том и только в том случае, если существуют такие не равные нулю одновременно матрицы  $N_s \geq 0$ , что

$$\sum_{s=1}^N R_s^*[N_s] = 0, \quad (19)$$

где  $R_s^*[\cdot]$  — оператор, сопряженный оператору  $R_s[\cdot]$ .

Доказательство леммы 2. Пусть множество  $C_s$  представляет собой совокупность всех решений  $s$ -го неравенства  $R_s[L] < 0$  из системы (18). Следовательно, множество  $C$  всех решений системы (18) является пересечением конусов  $C_s$ , т. е.  $C = \bigcap_{s=1}^N C_s$ . В соответствии с теоремой Дубовицкого—Милютина [37] пересечение выпуклых открытых конусов  $C_s$  пусто в том и только в том случае, если существуют такие не равные одновременно нулю матрицы  $M_s$ , что

$$\sum_{s=1}^N M_s = 0, M_s \in C_s^*, s = 1, \dots, N, \quad (20)$$

где  $C_s^*$  — конус, сопряженный конусу  $C_s$ . Очевидно, что  $C_s$  является образом конуса  $K^-$  при линейном отображении  $R_s^{-1}[\cdot]$ , т.е.  $C_s = R_s^{-1}[K^-]$ . Матрицы  $N_s$  определим через матрицы  $M_s$  с помощью соотношений

$$N_s = -(R_s^{-1})^*[M_s], s = 1, \dots, N, \quad (21)$$

где  $(R_s^{-1})^*[\cdot]$  — оператор, сопряженный оператору  $R_s^{-1}[\cdot]$ . Из невырожденности операторов получим

$$M_s = ((R_s^{-1})^*)^{-1}[-N_s] = -R_s^*[N_s], s = 1, \dots, N. \quad (22)$$

Последнее соотношение вместе с (20) дает (19).

Осталось показать, что для матриц  $N_s$  из (21) справедливы соотношения  $N_s \geq 0$ . Для скалярного произведения матрицы  $N_s$  и произвольной матрицы  $W \in K^+$  имеем соотношение

$$\begin{aligned} \langle N_s, W \rangle &= \langle -(R_s^{-1})^*[M_s], W \rangle = \\ &= \langle M_s, R_s^{-1}[-W] \rangle \geq 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Поясним последнее неравенство.  $M_s \in C_s^*$  означает, что  $\langle M_s, L \rangle \geq 0$  при всех  $L \in C_s$ , а  $R_s^{-1}[-W] \in C_s$ . Таким образом, из соотношения (23) следует, что  $N_s \in (K^+)^* = K^+$ ,  $s = 1, \dots, N$ . Лемма 2 доказана.

Разумеется, в случае одного неравенства подход, основанный на теореме Дубовицкого—Милютина, требует изменений. Как сказано выше, отсутствие решений у ЛМН (14) означает, что  $R[S^n] \cap K^- = \emptyset$ . Множества  $R[S^n]$  и  $K^-$  — выпуклые конусы, причем  $K^-$  — открытый. Поэтому по теореме Дубовицкого—Милютина [37] пересечение этих конусов пусто тогда и только тогда, когда существуют такие не равные одновременно нулю матрицы  $N_1 \in (R[S^n])^*$  и  $N_2 \in (K^-)^*$ , что  $N_1 + N_2 = 0$ .  $N_1 \in (R[S^n])^*$  означает, что  $\langle N_1, P \rangle \geq 0$  при всех  $P \in R[S^n]$  или

$$\langle N_1, A^T X + XA \rangle = \langle N_1 A^T + AN_1, X \rangle \geq 0 \quad (24)$$

при всех  $X_1 \in S^n$ , что возможно только если  $N_1 A^T + AN_1 = 0$ . Вместе с тем  $N_2 \in (K^-)^*$  означает, что  $\langle N_2, W \rangle \geq 0$  при всех  $W \in K^-$  или  $N_1 = -N_2 \in K^+$  — искомые соотношения получены.

В теореме 5 [27] и преамбуле к ней гурвицевость матриц  $A_s$  (равно как и невырожден-

ность соответствующих операторов) не оговаривается. Тем не менее лемма 1 в работе [27] используется для исследования системы (1), в которой матрицы  $A_s$  всего лишь обладают регулярной инерцией. В связи с этим возникает вопрос о справедливости леммы 1 для таких матриц. Требование регулярной инерции матриц  $A_s$  в (1) применительно к системе (18) эквивалентно требованию разрешимости каждого из неравенств этой системы по отдельности. Требование это ограничительным не является. Если в системе (18)  $i$ -е неравенство неразрешимо, то, принимая во внимание приведенное выше условие неразрешимости одного неравенства, для выполнения соотношения (19) в нем достаточно положить все  $N_s = 0$  при  $s \neq i$ . Исходя из этого сделаем необходимые поправки в лемме 2.

В доказательстве леммы 2 до формулы (20) все остается по-прежнему, а дальше появляются обратные операторы, которых теперь нет. Поэтому рассмотрим множества  $D_s = R_s^*[\overline{K^+}]$  — образы  $K^+$  при действии операторов  $R_s^*[\cdot]$ . Каждое  $D_s$  — конус, сопряженный к нему множество  $D_s^*$  определяется соотношением

$$\begin{aligned} D_s^* &= \{M : \langle M, P \rangle \geq 0, P \in D_s\} = \\ &= \{M : \langle M, WA_s^T + A_s W \rangle \geq 0, W \in \overline{K^+}\} = \quad (25) \\ &= \{M : \langle A_s^T M + MA_s, W \rangle \geq 0, W \in \overline{K^+}\}. \end{aligned}$$

Таким образом,  $(-D_s^*) = \overline{C_s}$ . Так как  $(\overline{K})^* = (K)^*$  (см., например, [38, с. 25]), то  $(-D_s^*)^* = (\overline{C_s})^* = (C_s)^*$ . Так как  $D_s = \overline{D_s}$ , то  $(-D_s^*)^* = -D_s = (C_s)^*$  (см. там же, с. 26). Теперь понятно, что матрицы  $M_s \in C_s^*$  из (20) можно определить соотношением  $-M_s = R_s^*[N_s]$ ,  $N_s \in \overline{K^+}$ ,  $s = 1, \dots, N$ . В результате получена следующая модификация (расширение) леммы 2.

**Лемма 2\*.** Система матричных неравенств (18) не имеет решения в том и только в том случае, если существуют такие не равные нулю одновременно матрицы  $N_s \geq 0$ , что выполнено соотношение (19).

Для полноты картины приведем доказательство леммы 2\*, используя методику работ [6, 14, 31]. В соответствии с этой методикой система матричных неравенств (18) сводится к одному "большому" матричному неравенству, матрица  $R[L]$  которого сформирована из  $N$  диагональных блоков, которыми служат матрицы  $R_s[L]$  отдельных неравенств исходной систе-

мы, т. е.  $R[L] = \text{diag}(R_1[L], \dots, R_N[L])$ . Таким образом, определен оператор  $R[L]: S^n \rightarrow S$ , где  $S = S^n \times \dots \times S^n \subset S^{nN}$ . Скалярное произведение в пространстве  $S$  определяется соотношением  $\langle W, V \rangle_S = \sum_{s=1}^N \langle W_s, V_s \rangle = \sum_{s=1}^N \text{tr}(W_s V_s)$ ,  $W = \text{diag}(W_1, \dots, W_N)$ ,  $V = \text{diag}(V_1, \dots, V_N)$ ,  $W_s, V_s \in S^n$ . Аналогом конуса  $K^+$  в пространстве  $S$  служит множество (конус)  $K^+ = K^+ \times \dots \times K^+$ .

Отсутствие решений у системы (18) означает, что  $R[S^n] \cap K^- = \emptyset$  ( $K^- = -K^+$ ). Тогда по теореме отделимости [29, с. 124] существует  $N = \text{diag}(N_1, \dots, N_N) \in S$ ,  $N \neq 0$ , такой что  $\langle N, Y \rangle_S \geq \langle N, W \rangle_S$  для любых  $Y \in R[S^n]$  и  $W \in K^-$ , или  $\langle N, R[X] \rangle_S \geq \langle N, W \rangle_S$  для любых  $X \in S^n$  и  $W \in K^-$ . Последнее неравенство можно переписать следующим образом:

$$\langle R^*[N], X \rangle \geq \langle N, W \rangle_S, X \in S^n, W \in K^-, \quad (26)$$

где оператор  $R^*[\cdot]$ , сопряженный оператору  $R[\cdot]$  по отношению к скалярному произведению в пространстве  $S$ , определяется соотношением

$$\begin{aligned} \langle W, R[V] \rangle_S &= \sum_{s=1}^N \langle W_s, R_s[V] \rangle = \sum_{s=1}^N \langle R_s^*[W_s], V \rangle = \\ &= \left\langle \sum_{s=1}^N R_s^*[W_s], V \right\rangle = \langle R^*[W], V \rangle, \end{aligned}$$

которое должно выполняться для любых  $W \in S$  и  $V \in S^n$ , т. е.  $R^*[W] = \sum_{s=1}^N R_s^*[W_s]$ . Выполнение (26) при некотором  $\tilde{W}$  и любых  $X \in S^n$  возможно если и только если  $R^*[N] = \sum_{s=1}^N R_s^*[N_s] = 0$ . Таким образом, (26) приобретает вид:  $\langle N, W \rangle_S \geq 0$  для любых  $W \in K^+$ , откуда следует, что  $N \in (K^+)^*$ . Действительно,

$$(K^+)^* = \left\{ N : \langle N, W \rangle_S = \sum_{s=1}^N \langle N_s, W_s \rangle \geq 0, W_s \in K^+ \right\}.$$

Другими словами,  $(K^+)^* = \overline{K^+} \times \dots \times \overline{K^+} = \overline{K^+}$  и  $N = \text{diag}(N_1, \dots, N_N) \in (K^+)^*$  означает, что  $N_s \in K^+$  и  $N_s \geq 0$ . "Другое" доказательство леммы 2\* завершено.

Вопрос о наличии ОКФЛ для дискретной системы с переключениями (дискретного включения) сводится [8] к вопросу о разрешимости системы

$$A_s^T L A_s - L < 0, s = 1, \dots, N. \quad (27)$$

В работе [31] для исследования системы (27) предлагается с помощью дробно-линейного преобразования перейти к исследованию эквивалентной системы (1). Этого можно не делать. Оператор  $R^*[\cdot]$ , сопряженный дискретному оператору Ляпунова  $R[L] = A^T L A - L$ , определяется соотношением

$$\begin{aligned} \langle R[L], W \rangle &= \langle A^T L A - L, W \rangle = \\ &= \text{tr}(A^T L A W - L W) = \text{tr}(L(A W A^T - W)) = \quad (28) \\ &= \langle L, A W A^T - W \rangle = \langle L, R^*[W] \rangle. \end{aligned}$$

Таким образом,  $R^*[W] = A W A^T - W$ . Система (27) совпадает с системой (18) при  $R_s[L] = A_s^T L A_s - L$ , ее разрешимость определяется леммой 2\*, в которой сопряженные операторы имеют вид  $R_s^*[W] = A_s W A_s^T - W$ .

Приведенный в следующем разделе пример является, с одной стороны, искусственным и экзотическим, с другой стороны, показывает, как можно использовать лемму 2\* для получения условий локализации собственных чисел матриц.

### Пример

Приведем пример следующей системы из двух матричных неравенств:

$$\begin{aligned} R_1[L] &= A^T L + L A < 0; \\ R_2[L] &= A^T L A - L < 0. \end{aligned} \quad (29)$$

Операторы  $R_s^*[W]$ , сопряженные операторам из (29), определяются соотношениями (17) и (28), т. е. имеют вид

$$R_1^*[W] = W A^T + A W, R_2^*[W] = A W A^T - W.$$

В соответствии с леммой 2\* соотношение, определяющее совместность системы (29), имеет вид

$$N_1 A^T + A N_1 + A N_2 A^T - N_2 = 0. \quad (30)$$

Если из соотношения (30) и  $N_s \geq 0$  следует  $N_1 = N_2 = 0$ , то система (29) разрешима. Однако из этого не следует, что решения положительно определены ( $L > 0$ ), или матрица  $A$  гурвицева ( $\max_i \text{Re } \lambda_i(A) < 0$ ) или шурова ( $\max_i |\lambda_i(A)| < 1$ ) ( $L \neq 0$  — случай неустойчивости). Если в системе (29) дополнительно потребовать гурви-

цевость матрицы  $A$ , то из ее совместности будет автоматически следовать  $L > 0$  и шуровость матрицы  $A$ , если потребовать шуровость матрицы  $A$ , то автоматически получим  $L > 0$  и гурвицевость  $A$  ( $L > 0$  — случай устойчивости). Если в системе (29) дополнительно потребовать  $L > 0$ , то к системе (29) добавится третье неравенство  $R_0[L] = -L < 0$ ,  $R_0^*[W] = -W$ . В соответствии с леммой 2\* совместность расширенной системы из трех неравенств определяется соотношением

$$-N_0 + N_1 A^T + A N_1 + A N_2 A^T - N_2 = 0. \quad (31)$$

Если из соотношения (31) и  $N_s \geq 0$  следует  $N_s = 0$ , то расширенная система совместна (аналог утверждения 1), а из ее совместности автоматически следует и гурвицевость, и шуровость матрицы  $A$ . В этом случае все собственные числа матрицы  $A$  расположены в левом открытом единичном полукруге комплексной плоскости.

### Заключение

В работе дается краткий обзор результатов, полученных на начальном этапе развития теории ЛМН. В работе [11] говорится, что система (1) впервые рассмотрена в работах школы Е. С. Пятницкого. Вместе с тем в работе [14] рассматривается система матричных неравенств гораздо более общего вида, чем система (1). Выбирая индексы в системе из работы [14], можно получить систему (1). В [14] практически отсутствует соотнесение рассматриваемой там задачи с вопросами устойчивости. В работах Е. С. Пятницкого и его учеников система (1) появляется как необходимое и достаточное условие, говоря современным языком, существования ОКФЛ. Таким образом, приходим к выводу: в работе [14] система (1) присутствует в качестве алгебраического объекта, а в работах [12, 15] — как критерий существования ОКФЛ в задаче устойчивости.

В работе показано, что утверждение 1 [6] является простым следствием леммы 1, но дело не только в этом. Дополнительное условие  $L > 0$  в утверждении 1 с необходимостью влечет требование гурвицевости матриц  $A_s$ , что означает невырожденность соответствующих операторов. Требование невырожденности снимается в полученной здесь лемме 2\*, которая обобщает и уточняет лемму 1. Доказательство леммы 2\*

дается как с помощью теоремы Дубовицкого—Милютина (методика [8]), так и с помощью методики из работы [14]. Востребованность и цитируемость (что, к сожалению, не всегда одно и то же) работы [8] (см. таблицу) имеет огромную задержку по времени, которая скорее означает не тот факт, что работа слабая, а то, что работа опередила свое время.

### Список литературы

1. Чайковский М. М., Курдюков А. П. Алгебраические уравнения Риккати и линейные матричные неравенства для систем дискретного времени. М.: ИПУ РАН, 2005.
2. Баландин Д. В., Коган М. М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
3. Поляк Б. Т., Хлебников М. В., Щербаков П. С. Управление линейными системами: Техника линейных матричных неравенств. М.: ЛЕНАНД, 2014.
4. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
5. Емельянова Ю. П., Пакшин П. В., Пакшина Н. А. Матричные уравнения и неравенства второго порядка: учеб. пособие. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. П. Е. Алексеева, 2013.
6. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. SIAM. Philadelphia. 1994.
7. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. History of Linear Matrix Inequalities in Control Theory // Proceeding of the American Control Conference, Baltimore, Maryland, 1994. P. 31—34.
8. Kamenetskiy V. A., Pyatnitskiy Ye. S. An iterative method of Lyapunov function construction for differential inclusions // Systems and Control Letters. 1987. Vol. 8. P. 445—451.
9. Горбунов А. В., Каменецкий В. А. LMI, абсолютная устойчивость и гибридные системы // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Матер. XIII Международной конференции (1—3 июня 2016 г., Москва). М.: ИПУ РАН, 2016. С. 86—87.
10. Гелиг А. Х., Леонов Г. А., Якубович В. А. Устойчивость нелинейных систем с неединственным состоянием равновесия. М.: Наука, 1978.
11. Boyd S., Yang Q. Structured and simultaneous Lyapunov functions for system stability problems // Internat. J. Control 1989. Vol. 49, N. 6. P. 2215—2240.
12. Каменецкий В. А. Абсолютная устойчивость и абсолютная неустойчивость систем управления с несколькими нелинейными нестационарными элементами // Автоматика и телемеханика. 1983. № 12. С. 20—30.
13. Пятницкий Е. С., Скородинский В. И. Численные методы построения функций Ляпунова и критерии абсолютной устойчивости в форме численных процедур // Автоматика и телемеханика. 1983. № 11. С. 52—63.
14. Bellman R., Fan K. On systems of linear inequalities in Hermitian matrix variables // Proc. of Simposia in Pure Mathematics. American Math. Society. 1963. Vol. 7. P. 1—11.
15. Pyatnitskiy Ye. S., Skorodinskiy V. I. Numerical methods of Liapunov function construction and their application to the absolute stability problem // Systems and Control Letters. 1982. Vol. 2. P. 130—135.
16. Пятницкий Е. С. Абсолютная устойчивость нестационарных нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. 1970. № 1. С. 5—15.
17. Каменецкий В. А., Пятницкий Е. С. Градиентный метод построения функций Ляпунова в задачах абсолют-

ной устойчивости // Автоматика и телемеханика. 1987. № 1. С. 3—12.

18. **Алимов Ю. И.** О применении прямого метода Ляпунова к дифференциальным уравнениям с неоднозначными правыми частями // Автоматика и телемеханика. 1961. Т. XXII. № 7. С. 817—830.

19. **Liberzon D.** Switching in Systems and Control. Boston, MA: Birkhäuser, 2003.

20. **Shorten R., Wirth F., Mason O., Wulf K., King C.** Stability Criteria for Switched and Hybrid Systems // SIAM Rev. 2007. N. 4. P. 545—592.

21. **Lin H., Antsaklis P. J.** Stability and Stabilizability of Switched Linear Systems: a Survey of Recent Results // IEEE Trans. Automat. Contr. 2009. N. 2. P. 308—322.

22. **Молчанов А. П., Пятницкий Е. С.** Функции Ляпунова, определяющие необходимые и достаточные условия абсолютной устойчивости нелинейных нестационарных систем управления. I, II, III // Автоматика и телемеханика. 1986, № 3. С. 63—73; № 4. С. 5—15; № 5. С. 38—49.

23. **Molchanov A. P., Pyatnitskiy E. S.** Criteria of asymptotic stability of differential and difference inclusions encountered in control theory // Systems Control Lett. 1989. Vol. 13. P. 59—64.

24. **Pyatnitskiy E. S., Rapoport L. B.** Criteria of asymptotic stability of differential inclusions and periodic motions of time-varying nonlinear control systems // IEEE Trans. Circuits Syst. I. 1996. Vol. 43, N. 3. P. 219—229.

25. **Пятницкий Е. С.** Избранные труды: в 3 т. М.: Физматлит, 2005.

26. **Филиппов А. Ф.** Условия устойчивости однородных систем с произвольными переключениями режимов // Автоматика и телемеханика. 1980. № 8. С. 48—55.

27. **Laffey T. J., Smigoc H.** Common Lyapunov solutions for two matrices whose difference has rank one // Linear Algebra and its Applications. 2009. Vol. 431. P. 228—240.

28. **Поздьяев В. В.** Об аналитическом решении систем матричных неравенств, двойственных к системам неравенств Ляпунова // Управление большими системами. Вып. 28. М.: ИПУ РАН, 2010. С. 58—74.

29. **Алексеев В. М., Тихомиров И. М., Фомин С. И.** Оптимальное управление. М.: Наука, 1979.

30. **Griggs W. M., King C. K., Shorten R. N., Mason O., Wulff K.** Quadratic Lyapunov functions for systems with state-dependent switching // Linear Algebra and its Applications. 2010. Vol. 433. P. 52—63.

31. **Balakrishnan V., Vandenberghe L.** Semidefinite programming duality and linear time-invariant systems // IEEE Trans. Automat. Control. 2003. Vol. 48, N. 1. P. 30—41.

32. **Vandenberghe L., Boyd S.** Semidefinite programming // SIAM Rev. 1996. Vol. 38, N. 1. P. 49—95.

33. **Berman A., Ben-Israel A.** More on linear inequalities with applications to matrix theory // Journal of Mathematical Analysis and Applications. 1971. Vol. 33. P. 482—496.

34. **Фрадков А. Л.** Теоремы двойственности в некоторых невыпуклых экстремальных задачах // Сибирский математический журнал. 1973. Т. 14, № 2. С. 357—383.

35. **Ostrowski A., Schneider M.** Some theorems on the inertia of general matrices // J. Math. Anal. Appl. 1962. Vol. 4. P. 72—84.

36. **Каменецкий В. А.** Градиентный метод построения функций Ляпунова для нелинейных динамических систем / Оптимизация в сложных системах. Сер. "Вопросы кибернетики" / Под ред. П. П. Пархоменко. М.: Академия наук СССР, 1988. С. 55—72.

37. **Дубовицкий А. Я., Милютин А. А.** Задача на экстремум при наличии ограничений // ЖВМиМФ. 1965. Т. 5, № 3. С. 395—453.

38. **Пшеничный Б. Н.** Выпуклый анализ и экстремальные задачи. М.: Наука, 1980.

## Linear Matrix Inequalities in Stability Problems: Retrospective and Theoretical Aspects

V. A. Kamenetskiy, vlakam@ipu.ru,

Trapeznikov Institute of Control Sciences Russian Academy of Sciences, Moscow, 347900, Russian Federation

Corresponding author: **Kamenetskiy Vladimir A.**, PhD, Leading Researcher, Trapeznikov Institute of Control Sciences Russian Academy of Sciences, Moscow, 347900, Russian Federation, e-mail: vlakam@ipu.ru

Accepted on August 15, 2019

### Abstract

*Some aspects of the development of the theory of linear matrix inequalities are considered. A number of results obtained at the initial stage of the development of this theory, both in the development of numerical methods and in obtaining analytical conditions for their solvability, are highlighted. The main attention is focused on the system of linear matrix inequalities arising in solving the absolute stability problem. E. S. Pyatnitskiy and his followers showed that the solvability of this system is a criterion for the existence of a quadratic Lyapunov function and a sufficient condition for absolute stability. The prerequisites leading to this result are considered here. The use of the considered system of inequalities for studying the stability of hybrid systems described by differential inclusions and switching systems is shown. An analysis is given of citing some works of Pyatnitskiy's school on the theory of stability and the theory of systems of linear matrix inequalities, from which the relevance of the results of these works at the present time follows.*

*In developing numerical methods, it was first shown in the work of Pyatnitskiy and Skorodinskiy that the solvability problem for a system of linear matrix inequalities reduces to a convex programming problem. An interesting gradient algorithm for finding solutions to such a system is also presented. In analyzing analytical conditions of solvability, an unsolvability criterion for the system of our interest obtained by Kamenetskiy and Pyatnitskiy is noted. In modern terms, this result can be considered as a description of an admissible set in the dual semidefinite programming problem. A similar result is given in the famous book by S. Boyd et al. The paper shows that the result of Boyd et al. is a simple corollary of the unsolvability criterion. Here the unsolvability criterion is generalized and refined.*

**Keywords:** quadratic Lyapunov functions, linear matrix inequalities, absolute stability, switched systems

**Acknowledgements:** This work was supported by the Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, project no. I. 29.

For citation:

**Kamenetskiy V. A.** Linear Matrix Inequalities in Stability Problems: Retrospective and Theoretical Aspects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol.20, no.11, pp. 643–654.

DOI: 10.17587/mau.20.643-654

## References

1. **Chaikovskii M. M., Kurdyukov A. P.** Algebraic Riccati Equations and Linear Matrix Inequalities for Discrete-Time Systems, Moscow, Inst. Probl. Upravlen. RAN, 2005 (in Russian).
2. **Balandin D. V., Kogan M. M.** Synthesis of Control Laws Based on Linear Matrix Inequalities, Moscow, Fizmatlit, 2007 (in Russian).
3. **Polyak B. T., Shcherbakov P. S.** Robust Stability and Control, Moscow, Nauka, 2002 (in Russian).
4. **Polyak B. T., Khlebnikov M. V., Shcherbakov P. S.** Control of Linear Systems: Technique of linear matrix inequalities, Moscow, LENAND, 2014 (in Russian).
5. **Emel'janova Ju. P., Pakshin P. V., Pakshina N. A.** Matrix Equations and Inequalities of Second Order: Study Guide, Nizhny Novgorod, Publishing house of Nizhny Novgorod State Techn. Univ., 2013.
6. **Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V.** Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. SIAM. Philadelphia, 1994.
7. **Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V.** History of Linear Matrix Inequalities in Control Theory, *Proceeding of the American Control Conference*, Baltimore, Maryland, 1994, pp. 31–34.
8. **Kamenetskiy V. A., Pyatnitskiy Ye. S.** An Iterative Method of Lyapunov Function Construction for Differential Inclusions, *Systems and Control Letters*, 1987, vol. 8, pp. 445–451.
9. **Gorbunov A. V., Kamenetskiy V. A.** LMI, Absolute Stability and Hybrid Systems, *Stability and oscillations of nonlinear control systems: Proceedings of the XIII International Conference*, Moscow, Publishing house of IPU RAS, 2016, pp. 86–87 (in Russian).
10. **Gelig A. Kh., Leonov G. A., Yakubovich V. A.** Stability of Nonlinear Systems with a Nonunique Equilibrium State, Moscow, Nauka, 1978 (in Russian).
11. **Boyd S., Yang Q.** Structured and Simultaneous Lyapunov Functions for System Stability Problems, *Internat. J. Control*, 1989, vol. 49, no. 6, pp. 2215–2240.
12. **Kamenetskiy V. A.** Absolute Stability and Absolute Instability of Control Systems with Several Nonlinear Nonstationary Elements, *Autom. Remote Control*, 1983, vol. 44, no. 12, pp. 1543–1552 (in Russian).
13. **Pyatnitskiy E. S., Skorodinskii V. I.** Numerical Method of Construction of Lyapunov Functions and Absolute Stability Criteria in the Form of Numerical Procedures, *Autom. Remote Control*, 1983, vol. 44, no. 11, pp. 1427–1437 (in Russian).
14. **Bellman R., Fan K.** On Systems of Linear Inequalities in Hermitian Matrix Variables, In V. L. Klee, editor, *Convexity, volume 7 of Proceedings of Simposia in Pure Mathematics*, pp. 1–11, American Math. Society, 1963.
15. **Pyatnitskiy Ye. S., Skorodinskii V. I.** Numerical methods of Liapunov function construction and their application to the absolute stability problem, *Systems and Control Letters*, 1982, vol. 2, pp. 130–135.
16. **Pyatnitskiy E. S.** Absolute Stability of Nonstationary Nonlinear Systems, *Autom. and Remote Control*, 1970, vol. 31, no. 1, pp. 1–9 (in Russian).
17. **Kamenetskiy V. A., Pyatnitskiy E. S.** Gradient Method of Constructing Lyapunov Functions in Problems of Absolute Stability, *Autom. Remote Control*, 1987, vol. 48, no. 1, pp. 1–9 (in Russian).
18. **Alimov Yu. I.** On the Application of Lyapunov's Direct Method to Differential Equations with Ambiguous Right Sides, *Autom. Remote Control*, 1961, vol. 22, no. 7, pp. 713–725 (in Russian).
19. **Liberzon D.** Switching in Systems and Control, Birkhäuser, Boston, MA, 2003.
20. **Shorten R., Wirth F., Mason O., Wulf K., King C.** Stability Criteria for Switched and Hybrid Systems, *SIAM Rev*, 2007, no. 4, pp. 545–592.
21. **Lin H., Antsaklis P. J.** Stability and Stabilizability of Switched Linear Systems: a Survey of Recent Results, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2009, no. 2, pp. 308–322.
22. **Molchanov A. P., Pyatnitskiy E. S.** Lyapunov Functions that Specify Necessary and Sufficient Conditions of Absolute Stability of Nonlinear Nonstationary Control Systems. I, II, III, *Autom. Remote Control*, 1986, vol. 47, no. 3, pp. 344–354; no. 4, pp. 443–451; no. 5, pp. 620–630 (in Russian).
23. **Molchanov A. P., Pyatnitskiy E. S.** Criteria of Asymptotic Stability of Differential and Difference Inclusions Encountered in Control Theory, *Systems and Control Letters*, 1989, vol. 13, pp. 59–64.
24. **Pyatnitskiy E. S., Rapoport L. B.** Criteria of Asymptotic Stability of Differential Inclusions and Periodic Motions of Time-varying Nonlinear Control Systems, *IEEE Trans. Circuits Syst., I*, 1996, vol. 43, no. 3, pp. 219–229.
25. **Pyatnitskiy E. S.** Selected Works: in 3 vol., Moscow, Fizmatlit, 2005 (in Russian).
26. **Filippov A. F.** Stability Conditions in Homogeneous Systems with Arbitrary Regime Switching, *Autom. Remote Control*, 1980, vol. 41, no. 8, pp. 1078–1085.
27. **Laffey T. J., Smigoc H.** Common Lyapunov Solutions for Two Matrices whose Difference has Rank One, *Linear Algebra and its Applications*, 2009, vol. 431, pp. 228–240.
28. **Pozdyaev V. V.** On an Analytical Solution of Systems of Matrix Inequalities Dual to Lyapunov Inequality Systems, *UBS*, 2010, vol.28, pp. 58–74 (in Russian).
29. **Alekseev V. M., Tikhomirov I. M., Fomin S. I.** Optimal Control, Moscow, Nauka, 1979 (in Russian).
30. **Griggs W. M., King C. K., Shorten R. N., Mason O., Wulf K.** Quadratic Lyapunov Functions for Systems with State-dependent Switching, *Linear Algebra and its Applications*, 2010, vol. 433, pp. 52–63.
31. **Balakrishnan V., Vandenberghe L.** Semidefinite Programming Duality and Linear time-invariant systems, *IEEE Trans. Automat. Control*, 2003, vol. 48, no. 1, pp. 30–41.
32. **Vandenberghe L., Boyd S.** Semidefinite programming, *SIAM Rev.*, 1996, vol. 38, no. 1, pp. 49–95.
33. **Berman A., Ben-Israel A.** More on Linear Inequalities with Applications to Matrix Theory, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 1971, vol. 33, pp. 482–496.
34. **Fradkov A. L.** Duality Theorems in Some Nonconvex Extremal Problems, *Siberian Math. J.*, 1973, vol. 14, no. 2, pp. 357–383 (in Russian).
35. **Ostrowski A., Schneider M.** Some Theorems on the Inertia of General Matrices, *J. Math. Anal. Appl.*, 1962, vol. 4, pp. 72–84.
36. **Kamenetskiy V. A.** Gradient Method for Constructing Lyapunov Functions for Nonlinear Dynamical Systems / *Optimization in complex systems. Ser. "Questions of Cybernetics"*. Ed. by P. P. Parkhomenko, Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1988, pp. 55–72 (in Russian).
37. **Dubovitskiy A. Ya., Milyutin A. A.** Extremum Problems in the Presence of Restrictions, *U. S. S. R. Comput. Math. Math. Phys.*, 1965, vol. 5, no. 3, pp. 1–80 (in Russian).
38. **Pshenichny B. N.** Convex Analysis and Extremal Problems, Moscow, Nauka, 1980 (in Russian).

С. В. Феофилов, д-р техн. наук, доц., svfeofilov@mail.ru, А. В. Козырь, аспирант, Kozyr\_A\_V@mail.ru, Тульский государственный университет, г. Тула

## Оценка устойчивости периодических движений и особенности синтеза регуляторов в релейных системах с цифровым управлением<sup>1</sup>

*Рассматриваются вопросы проектирования следящих релейных систем с цифровым управлением (PCY). Предложены методы определения возможных автоколебательных режимов в релейных системах с цифровым управлением и линейными, кусочно-линейными объектами управления (ОУ). Предлагаемый подход к исследованию периодических движений основан на методе фазового годографа релейной системы. Показано, что в рассматриваемых системах дискретизация по времени приводит к дроблению предельных циклов и возникновению множества возможных периодических движений. Предлагаются методы исследования устойчивости данных процессов. Разработаны два подхода для оценки устойчивости автоколебаний. В первом случае рассматривается дискретное представление ОУ. Получены условия устойчивости предельных циклов в виде системы матричных неравенств, которые определяют области притяжения для каждого возможного симметричного периодического движения. Показано, что такие области являются несвязанными и имеют различные размеры для каждого предельного цикла. Второй подход предполагает замену релейной системы с дискретизацией по времени эквивалентной непрерывной системой с запаздыванием. Указанное запаздывание определяется с помощью метода фазового годографа. Далее предлагается оценивать асимптотическую орбитальную устойчивость автоколебаний в эквивалентной системе и на этой основе делать вывод об устойчивости движений в исходной PCY с цифровым регулятором. Также показано, что при линейризации релейного элемента в цифровой PCY по полезному сигналу коэффициент передачи реле является переменным и принадлежит определенному диапазону значений. Рассматривается синтез корректирующих устройств PCY с учетом цифровой реализации. Предлагается методика синтеза цифровой PCY, учитывающая дискретную реализацию корректирующих устройств на этапе оптимизации параметров регулятора. В качестве модельного примера рассматривается синтез релейной цифровой системы управления следящим автоколебательным приводом. Показаны преимущества синтеза цифровых PCY с применением разработанного подхода. Основным достоинством является то, что при оптимизации параметров регулятора с учетом дискретизации по времени удается обеспечить стабильность желаемой частоты автоколебаний, а это, в свою очередь, позволяет повысить точность режима слежения.*

**Ключевые слова:** автоколебания, релейное управление, дискретные системы, предельный цикл, метод фазового годографа, релейно-импульсные системы

### Введение

В настоящее время подавляющее большинство систем управления реализуется в цифровом виде. Широкое распространение получили также автоколебательные релейные системы управления (PCY) [1–8]. Релейные системы имеют простую техническую реализацию и обладают высокими динамическими характеристиками. Исследованию PCY, работающих в непрерывном времени, посвящено большое число работ [1–3]. В ранних работах рассматривались вопросы анализа периодических движений и оценка их устойчивости. Для анализа и синтеза PCY, работающих в режиме слежения, в работах [1–5] разработан метод фазового годографа (ФГ) релейной системы. Подход позволяет исследовать параметры возможных автоколебаний в PCY на этапе, когда еще не определена структура регулятора. В рамках такого подхода разработаны

методы, позволяющие выделить все возможные симметричные периодические движения и оценить их устойчивость в PCY с кусочно-линейными и нелинейными объектами управления (ОУ) [4]. Предложены методы линейризации релейных систем [5] и анализа параметрической чувствительности. На основе указанных методов сформулирован алгоритм синтеза систем с релейным управлением. Однако в рассмотренных работах исследовались PCY, работающие только в непрерывном времени.

Традиционный подход к проектированию цифровых PCY основан на синтезе регулятора по непрерывной модели и последующем переходе к цифровой системе [6]. Синтез релейной системы без учета дискретизации управления может ухудшить точность режима слежения при цифровой реализации регулятора, либо привести к завышенным требованиям к цифровому вычислителю. Дискретизация по времени в таких системах может существенно изменить параметры периодического режима, в том числе привести к срыву автоколебательного процесса [7, 8].

<sup>1</sup>Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-08-01141).

Исследованию РСУ с цифровым управлением посвящены работы [6–11]. В них предложены точные методы анализа возможных движений в цифровых РСУ. Показано, что дискретизация РСУ может приводить к возникновению множества устойчивых периодических движений [7, 8]. В случае если ОУ является неустойчивым, в РСУ устанавливаются микрохаотические колебания [7, 14]. Однако в указанных работах недостаточное внимание уделено оценке устойчивости периодических движений. При этом традиционный подход к рассмотрению устойчивости в малом не может быть применен в релейных системах с дискретизацией по времени. Дело в том, что малое возмущение траектории в этом случае не приводит к изменению моментов переключения релейного элемента в периодическом движении. Это значит, что необходимо выделять области притяжения каждого предельного цикла в фазовом пространстве системы. Далее эта идея развивается применительно к РСУ с линейными и кусочно-линейными ОУ.

В настоящей работе на основе разработанных точных методов анализа периодических движений [7] в РСУ с цифровым управлением предлагаются подходы, позволяющие анализировать симметричные периодические процессы в случае, если ОУ является кусочно-линейным. Разрабатываются методы оценки устойчивости периодических движений в цифровых РСУ. Рассматривается влияние дискретизации на точность режима слежения РСУ. Предлагается алгоритм синтеза, учитывающий дискретную реализацию РСУ на этапе оптимизации параметров корректирующих устройств.

### 1. Математическое описание исследуемых систем

В работе рассматриваются системы управления с симметричным двухпозиционным реле и линейным (кусочно-линейным) ОУ. Динамика объекта представлена в пространстве состояний системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \mathbf{A}_i \mathbf{x} + \mathbf{B}_i U, & \text{если } \mathbf{x} \in \mathbf{S}_i(\mathbf{x}); \\ y = \mathbf{C}^T \mathbf{x}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$  —  $n$ -мерный вектор состояний (фазовый вектор системы);  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  — постоянная матрица;  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  — вектор коэффициентов;  $U$  — выход двухпозиционного релейно-

го элемента (РЭ);  $\mathbf{S}_i(\mathbf{x})$  определяет область фазового пространства, которой соответствуют матрицы  $\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_i$ .

В реальных технических системах, как правило, присутствуют различного рода ограничители. При наличии таких звеньев в ОУ движение системы определяется разрывной кусочно-линейной динамикой [4], определяемой двумя дифференциальными уравнениями с матрицами  $\mathbf{A}_1$  (движение в свободной области) и  $\mathbf{A}_2$  (движение на ограничителе). Состояние системы в момент достижения ограничителя задается следующим равенством:

$$\mathbf{x}(t^* + 0) = \mathbf{E}_m \mathbf{x}(t^* - 0). \quad (2)$$

Матрица  $\mathbf{E}_m$  размерностью  $n \times n$  отличается от единичной матрицы  $m$ -й строкой, состоящей из нулей  $\mathbf{E}_m = \text{eye}(1, \dots, 0_m, \dots, 1_n)$ . Момент времени  $t^*$  соответствует переключению уравнений движения.

Далее предполагается, что релейный закон управления реализован в дискретном виде. Структурная схема замкнутой системы управления приведена на рис. 1.

На вход РЭ (рис. 2) подается последовательность

$$e[kT_s] = f[kT_s] - y[kT_s], k = 0, 1, 2, \dots,$$

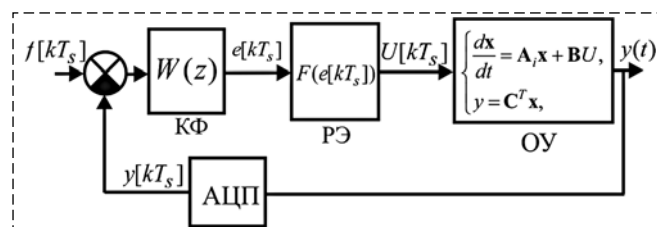


Рис. 1 Автоколебательная РСУ с цифровым управлением  
Fig. 1. Block diagram of the relay servo system

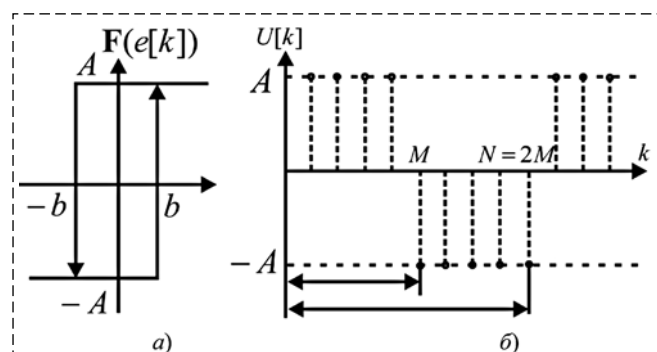


Рис. 2. Релейный элемент (а), управляющий сигнал (б)  
Fig. 2. Hysteresis relay (a), periodic input sequence (b)



где  $f[kT_s]$  — дискретный входной сигнал. Сигнал обратной связи формируется путем цифровой выборки непрерывного выходного сигнала  $y(t)$  аналоговым цифровым преобразователем (АЦП) с постоянным шагом квантования  $T_s$ ;  $W(z)$  — дискретный корректирующий фильтр. На ОУ в каждый интервал времени поступает сигнал (рис. 2)

$$U[kT_s] = \begin{cases} +A, & \text{если } e[kT_s] \geq b \vee e[kT_s] > -b, \\ U[(k-1)T_s] = +A; \\ -A, & \text{если } e[kT_s] \leq -b \vee e[kT_s] < -b, \\ U[(k-1)T_s] = -A. \end{cases} \quad (2)$$

Математическая модель замкнутой дискретной системы в случае линейного ОУ может быть представлена в пространстве состояний:

$$\begin{cases} \mathbf{x}[(k+1)T_s] = \Phi_i \mathbf{x}[kT_s] + \Psi_i U[kT_s], & i = 1, 2; \\ y[kT_s] = \mathbf{C}^T \mathbf{x}[kT_s]; \\ U[kT_s] = F(e[kT_s]); \\ e[kT_s] = f[kT_s] - y[kT_s], & k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (3)$$

Матрицы дискретной системы определяются известными соотношениями

$$\Phi_i = e^{A_i T_s}; \quad \Psi_i = \int_0^{T_s} e^{A_i t} dt. \quad (4)$$

## 2. Симметричные периодические движения в РСУ с цифровым управлением

Как было показано, дискретизация по времени в таких системах приводит к возникновению множества возможных симметричных периодических движений по сравнению с непрерывным случаем [11, 12], что значительно усложняет анализ. В автономной РСУ, работающей в дискретном времени, симметричный периодический процесс определяется числом тактов дискретизации на полупериод повторения  $M$ , причем  $MT_s = (N - M)T_s$ , где  $N, M \in \mathbb{Z}^+$ , причем  $N > M \geq 1$ . Периодическая последовательность с выхода РЭ показана на рис. 2, б. В случае линейного ОУ все возможные симметричные периодические движения можно определить, используя дискретный фазовый годограф (ФГ) [7]. Выходная компонента дискретного ФГ ( $R$ -характеристика) определяет значение с выхода ОУ  $y[kT_s]$  в момент переключе-

ния РЭ с  $-A$  на  $+A$  и задается в следующем виде:

$$y[M] = \frac{-1}{M} \sum_{n=1}^M \frac{(1 - (-1)^n)}{\sin\left(\frac{\pi n}{2M}\right)} \times \times \text{Im}(W_{\text{ОУ}}(e^{i\pi n/M}) e^{-i\pi n(M-0,5)/M}). \quad (5)$$

Условие переключения РЭ в дискретной системе

$$\begin{cases} y[M-1] > -b; \\ y[M] \leq -b. \end{cases} \quad (6)$$

Для того чтобы найти все возможные симметричные периодические движения, такие что  $y[kT_s] = -y[(k+M)T_s]$ , необходимо задать значение полупериода  $M = [1, 2, \dots]$  и вычислить компоненту  $y[M]$  (5). Все значения  $M$ , для которых справедливо неравенство (6), соответствуют возможным значениям автоколебаний с периодом  $N = 2M$ .

Дискретизация по времени приводит к возникновению некоторого запаздывания переключения РЭ  $\tau \in [0, T_s]$  относительно непрерывного случая.

Условие переключения РЭ в непрерывном и дискретном случаях показано на рис. 3. Из рис. 3 видно, что РЭ переключается в некоторой  $\delta$ -окрестности плоскости переключения  $S_{-b} = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : \mathbf{C}\mathbf{x} = -b\}$ . В работе [10] было показано, что, используя подход эквивалентного запаздывания, можно определить диапазон частот возможных периодических движений, используя модель непрерывной РСУ. Данное обстоятельство позволяет применить хорошо разработанный аппарат теории непрерывных РСУ. В случае кусочно-линейного ОУ определять периодические движения в цифровой

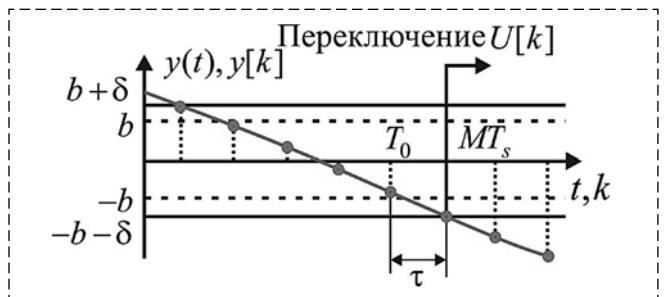


Рис. 3. Переключение РЭ в цифровой и непрерывной РСУ  
Fig. 3. Conditions for a switch in the continuous-time configuration and in the sampled-data system

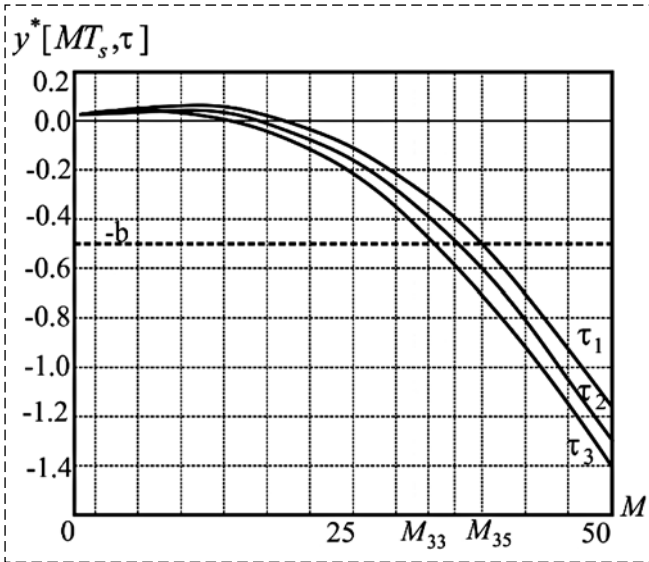


Рис. 4. Определение периодических движений в дискретной РСУ  
 Fig. 4. Definition of periodic movements in a sampled data relay feedback systems

РСУ возможно численно, решая уравнение ФГ с задержкой  $\tau$ :

$$\mathbf{x}^*(MT_s) + \mathbf{F}(\mathbf{x}^*(MT_s), A, MT_s, \tau) = 0. \quad (7)$$

Для определения всех возможных периодических движений в РСУ необходимо построить семейство ФГ по зависимости (7), изменяя  $\tau \in [0, T_s]$ . Далее необходимо найти все точки пересечения с прямой  $-b$ , принадлежащие сетке дискретизации  $kT_s$ , как показано на рис. 4. Точки пересечения будут соответствовать возможным значениям полупериода  $M$  автоколебаний.

В случае кусочно-линейного ОУ в фазовом годографе возможны области неоднозначности, когда одному значению полупериода  $MT_s$  соответствуют несколько возможных периодических движений с различной формой. Предлагается выделять такие области, используя сферический метод решения нелинейных уравнений [13]. При таком подходе решение ФГ ищется на некоторой сфере радиусом  $r$ , каждое последующее решение является центром новой сферы. При этом ФГ определяется решением системы уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{x}(MT_s) + \mathbf{F}(\mathbf{x}(MT_s), A, MT_s) = 0; \\ (x_1 - C_1)^2 + (x_2 - C_2)^2 + \dots \\ \dots + (x_n - C_1)^2 + (MT_s - C_{n+1})^2 - r = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Такой подход позволяет выделить области неоднозначности.

### 3. Устойчивость периодических движений в дискретной РСУ

Дискретизация по времени в РСУ приводит к возникновению множества возможных симметричных периодических движений, причем период соседних автоколебаний отличается на  $2T_s k$ ,  $k = 1, 2, \dots$ . Рассмотрим устойчивость каждого предельного цикла для случая системы с дискретизацией и линейным ОУ. Очевидно, если матрица ОУ  $\mathbf{A}$  является матрицей Гурвица, т. е. все собственные числа  $\text{eig}(\mathbf{A}) \leq 0$ , то каждый предельный цикл в цифровой РСУ является устойчивым в малом. Таким образом, каждой точке с предельного цикла в цифровой РСУ соответствует некоторая область возмущений  $\Delta$ . Начальные условия, принадлежащие этой области, не приводят к изменению момента переключения РЭ, а траектория  $\mathbf{x}_N^* = \mathbf{x}_N + \Delta$  будет стремиться к предельному циклу с периодом  $N$ . Локальную область устойчивости каждого предельного цикла  $\Delta \in \mathbf{D}$  можно определить численно, решив систему матричных неравенств, полученных из условий переключения РЭ (6):

$$\mathbf{D} = \begin{cases} (-1)^i \mathbf{C}^T \Phi^M \Phi_M^i \Delta + b - \mathbf{C}^T \mathbf{x}_M^* \leq 0; \\ \mathbf{C}^T (\mathbf{x}_N^* + \Delta) \geq b, \text{ если } U = A; \\ (-1)^{i+1} \mathbf{C}^T \Phi^{(M+1)} \Phi_M^i \Delta - \Phi^{-1} (\mathbf{x}_M^* - \Psi \mathbf{C}) < 0; \\ \mathbf{C}^T (\mathbf{x}_N^* + \Delta) > -b, \text{ если } U = -A. \end{cases}$$

На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) для примера приведен фазовый портрет цифровой РСУ с линейным ОУ, показано, что в системе возможны три предельных цикла с периодом повторения  $N_i$ ;  $\mathbf{x}_1(N_1 = 6)$ ,  $\mathbf{x}_2(N_2 = 8)$ ,  $\mathbf{x}_3(N_3 = 10)$ .

Для каждого предельного цикла существует область притяжения  $\mathbf{D}$ . Фазовые траектории с началом в этой области будут сходиться к определенному периодическому движению. Как видно из рис. 5, такие области являются несвязанными и для каждого цикла имеют различные размеры.

Дискретизация в РСУ приводит к возникновению различных симметричных периодических движений, причем, какое именно периодическое движение установится в системе, определяется начальными условиями. Дискретную РСУ можно представить в виде непрерывной РСУ с запаздыванием  $\tau$ , причем задержка принадлежит некоторому диапазону  $\tau \in [\tau_1, \tau_N]$ , где  $N$  определяется числом предель-

ных циклов в цифровой РСУ. Значение задержки, соответствующее каждому предельному циклу, можно определить, используя дискретный ФГ (5), (7). С практической точки зрения удобно оценивать устойчивость периодических движений в цифровой РСУ по непрерывной модели с эквивалентным фазовым запаздыванием  $\tau^*$ , соответствующим максимальному предельному циклу в дискретной системе. Это позволит гарантировать схождение фазовой траектории к локальной совокупности предельных циклов. Оценим устойчивость симметричных периодических движений в непрерывной РСУ с запаздыванием и кусочно-линейным ОУ. Структурная схема приведена на рис. 6.

Положим для определенности, что в периодическом движении выходной сигнал с ОУ, который содержит звено с ограничителем, имеет вид, представленный на рис. 7.

Движение системы на интервале времени  $t \in [0, t_1]$  определяется линейным уравнением (1) с матрицей  $A_1$  (движение системы в свободной области). Движение на ограничителе  $t \in [t_1, t_2]$  задается матрицей  $A_2 = A_1 E_m$ . По аналогии с работами [2–5] в случае симметричных периодических автоколебаний матрица устойчивости будет определяться в виде произведения

$$W = Q_\tau Q_1 Q_2 Q_3, \quad (9)$$

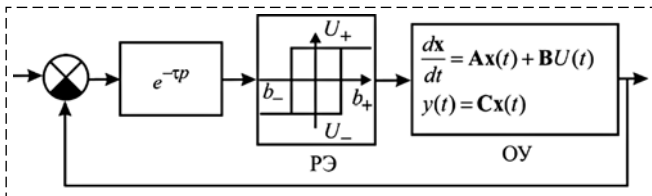


Рис. 6. РСУ с эквивалентным запаздыванием и кусочно-линейным ОУ по времени

Fig. 6. Time delay relay feedback systems with piecewise linear plant

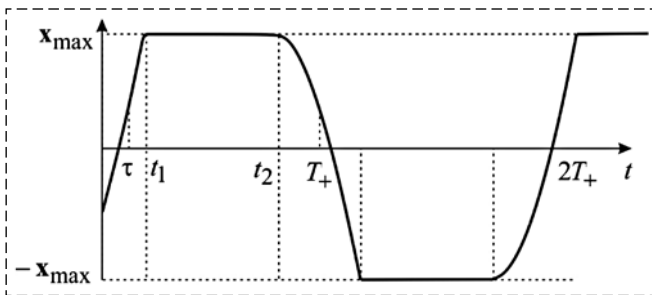


Рис. 7. Периодические движения в РСУ с запаздыванием и ограничителем

Fig. 7. Periodic motions in a time delay relay feedback system

где

$$Q_\tau = \left( I - \frac{A(Ax(MT_s) + BU_+)C}{CA(Ax(MT_s) + BU_+)} \right) e^{A\tau}; \quad (10)$$

$$Q_1 = \left( E - \frac{E(\dot{x}^-(T_+) - \dot{x}^+(T_+))L^T}{\dot{x}^-(T_+)} \right) e^{A_1(T_+ - t_2)}; \quad (11)$$

$$Q_2 = \left( I - \frac{E(\dot{x}^-(t_2) - \dot{x}^+(t_2))L^T}{\dot{x}^-(t_2)} \right) e^{A_2(t_2 - t_1)} = e^{A_2(t_2 - t_1)}; \quad (12)$$

$$Q_3 = \left( I - \frac{E(\dot{x}^-(t_1) - \dot{x}^+(t_1))C}{\dot{x}^-(t_1)} \right) e^{A_1(t_1 - \tau)}. \quad (13)$$

Здесь  $L^T = [0, 0, 1, 0, \dots]^T$  — вектор, выделяющий координату звена с ограничителем,  $x^-$  и  $x^+$  — пределы слева и справа в момент изменения структуры кусочно-линейного объекта.

Тогда можно сформулировать критерий устойчивости. *Периодическое движение  $x^*(t)$  в замкнутой релейной системе с запаздыванием будет асимптотически орбитально устойчивым, если все собственные числа матрицы  $W$  находятся внутри окружности единичного радиуса*

$$|\text{eig}(W)| \leq 1.$$

Таким образом, устойчивость периодических движений в цифровой РСУ с дискретизацией  $T_s$  определяется устойчивостью РСУ с эквивалентным запаздыванием  $\tau$ . При этом периодическая траектория будет сходиться к какому-либо из возможных предельных циклов с периодами повторения  $N_i$ .

#### 4. Синтез релейной автоколебательной следящей системы с цифровым управлением

Предлагаемый алгоритм синтеза цифровой автоколебательной РСУ состоит из нескольких основных этапов. Сначала задаются параметры цифрового контроллера, частота дискретизации  $f_s = 1/T_s$ , разрядность  $\Delta_s$ . На следующем этапе исходя из анализа дискретного ФГ выбирается структура корректирующих устройств. Желаемая частота автоколебаний  $f_{авт} = 1/MT_s$  в РСУ контролируется с помощью линейного корректирующего элемента, в обратной связи, охватывающей РЭ (рис. 8).

Коррекцию фазовой частотной характеристики предлагается обеспечивать последова-

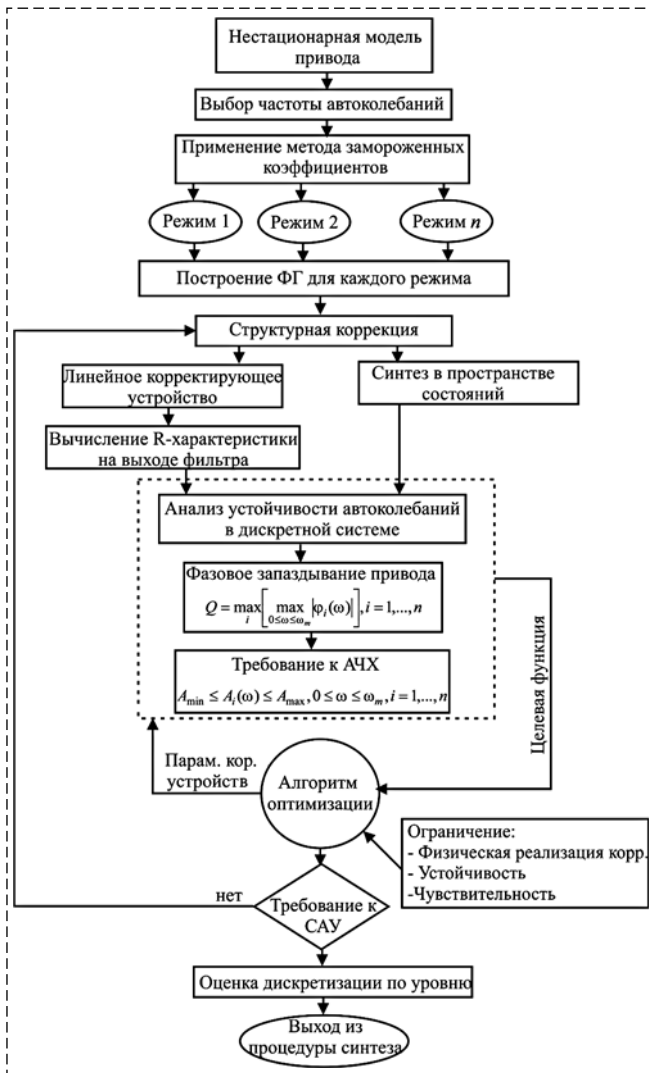


Рис. 8. Блок-схема алгоритма синтеза РСУ  
Fig. 8. Flowchart synthesis algorithm

тельным линейным интегро-дифференцирующим фильтром.

Основным показателем качества для многих следящих РСУ является фазовое запаздывание, поэтому в качестве критерия оптимизации

далее будем использовать значение максимального фазового сдвига, вычисляемого на диапазоне частот входного сигнала

$$Q = \max_{0 \leq \omega \leq \omega_{\max}} |\arg \varphi(j\omega)|. \quad (14)$$

В общем случае критерий оптимизации может быть любым.

Вычисление критерия удобно проводить по линеаризованной модели. Известно несколько подходов к линеаризации РСУ, работающих в непрерывном времени [5]. В случае цифровой реализации РСУ необходимо учитывать, что коэффициент линеаризации РЭ принадлежит некоторому диапазону значений. При этом исследование РСУ с цифровым управлением сводится к линейной системе с переменным коэффициентом усиления, зависящим от запаздывания

$$K_{РЭ}(\tau) = \frac{2\pi}{N} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \operatorname{Re} \left( W_{ОУ} \left( \frac{j\pi}{MT_s} k, \tau \right) \right). \quad (15)$$

Следующий этап синтеза состоит в параметрической оптимизации корректирующих устройств. На значения параметров наложены ограничения, такие как устойчивость периодических движений в цифровой РСУ, которая может быть оценена с помощью условия (9), физическая реализуемость фильтра, частота автоколебаний, параметрическая чувствительность. Тогда общий алгоритм синтеза может быть представлен в виде блок-схемы рис. 8.

На примере проведено сравнение синтеза РСУ по непрерывной модели без учета дискретной реализации корректирующих устройств на этапе параметрической оптимизации и с учетом дискретизации по времени. Структурная схема рассматриваемой системы показана на рис. 9.

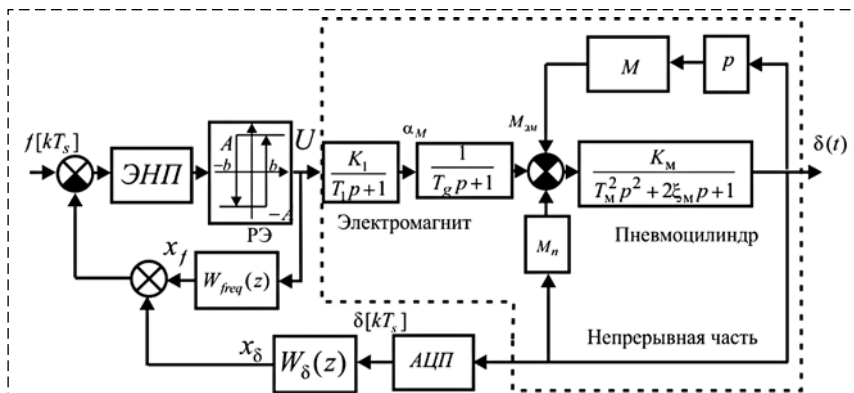


Рис. 9. Структурная схема релейного пневмопривода  
Fig. 9. Block diagram of the Electro-pneumatic servomechanism

На рис. 9  $W_{\delta}(z)$  — дискретный корректирующий фильтр, обеспечивающий коррекцию фазово-частотной характеристики системы. Фильтр  $W_{freq}(z)$  обеспечивает желаемую частоту автоколебаний. Параметры РЭ:  $A = 27$ ,  $b = 0,01$ . Период дискретизации  $T_s = 0,01(c)$ ; параметры ОУ:  $K_1 = 7$ ;  $T_1 = 0,001$ ;  $K_m = 1,0$ ;  $T_m = 0,001$ ;  $\xi_m = 0,001$ ;  $T_g = 0,025$ .

Желаемая частота автоколебаний составляет  $f_{авт} = 110$  Гц. Данную частоту будем поддерживать с помощью колебательного звена

в обратной связи РЭ. Коэффициент усиления указанного звена будем рассчитывать исходя из частоты  $f_{авт}$ :

$$K_{кр}(f_{авт}) = \frac{(-b - x_{\delta})T_{кр}^2}{P(1,2)}, \quad (14)$$

где  $P(1,2) = (e^{A_{\phi}MT_s} + \mathbf{I})^{-1}(e^{A_{\phi}MT_s} - \mathbf{I})\mathbf{A}_{\phi}^{-1}\mathbf{B}_{\phi}A$ ;

$$\mathbf{A}_{\phi} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_{кр}^2} & -\frac{2\xi}{T_{кр}} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B}_{\phi} = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{K_{кр}}{T_{кр}^2} \end{pmatrix}.$$

При расчете такого параметра необходимо учитывать дискретную реализацию РСУ, приняв остальные параметры такими, чтобы в системе установились устойчивые автоколебания.

Для сравнения в таблице приведены результаты работы алгоритма синтеза без учета дискретизации и предлагаемого алгоритма.

Цифровая реализация системы, синтезированной без учета дискретизации, приводит к уменьшению частоты автоколебаний. Она составила 62,5 Гц при желаемой 110 Гц. Соответственно увеличилась амплитуда автоколебаний и фазовое запаздывание привода. Для иллюстрации на рис. 10 приведены ФЧХ привода, синтезированные предлагаемым алгоритмом и методом ФГ без учета дискретизации.

Из рис. 10 видно, что учет дискретизации в алгоритме синтеза позволяет уменьшить максимальное фазовое запаздывание на 18,5 %.

Параметры корректирующих устройств  
*Parameters of corrective devices*

Синтез по непрерывной модели	Синтез по дискретной модели
$W_{\delta} = \frac{11,63z - 11,63}{z - 0,9997}$	$W_{\delta} = \frac{10,15z - 10,15}{z - 0,9996}$
$W_{freq} = \frac{7,685 \cdot 10^{-5}z + 7,685 \cdot 10^{-5}}{z^2 - 1,994z + 0,994}$	$W_{freq} = \frac{22,38z - 22,37}{z^2 - 0,9996}$



Рис. 10. ФЧХ привода с цифровым управлением  
Fig. 10. Phase frequency response of a sampled relay control system

## Заключение

В работе предложено несколько подходов к анализу периодических движений в РСУ, работающих в дискретном времени. Представлены два метода оценки устойчивости симметричных периодических движений в таких системах. Первый позволяет исследовать устойчивость каждого предельного цикла и определять области их притяжения. Показано, что такие области являются несвязанными и имеют различный размер для каждого предельного цикла. Другой метод анализа позволяет оценивать устойчивость периодических движений в дискретных релейных системах по эквивалентной непрерывной РСУ с запаздыванием. Данный подход обобщен на класс РСУ с кусочно-линейными ОУ. Показано, что при линеаризации цифровой РСУ коэффициент передачи РЭ по полезному сигналу будет переменным. Разработан алгоритм синтеза цифрового регулятора для РСУ. В отличие от известных он позволяет учитывать дискретизацию на этапе оптимизации параметров регулятора. На модельном примере продемонстрирована эффективность предложенных методов.

## Список литературы

1. Цыпкин Я. З. Релейные автоматические системы. М.: Наука, 1974. 576 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учеб. в 3 т. Т. 1: Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. С. 748.
3. Цыпкин Я. З., Попков Ю. С. Теория нелинейных импульсных систем. М.: Наука, 1973. 416 с.
4. Фалдин Н. В., Феофилов С. В. Исследование периодических движений в релейных системах, содержащих звенья с ограничителями // Известия РАН. Теория и системы управления, 2007. № 2. С. 15–27.
5. Моржов А. В., Фалдин Н. В. Линеаризация по полезному сигналу релейных систем управления, содержащих звенья с ограничителями // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2007. № 3. С. 5–15.
6. Феофилов С. В. Синтез цифровой системы управления релейных пневмоприводов // Известия ТулГУ. Серия Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Вып. 3. Системы управления. Т. 2. Тула: ТулГУ, 2006. С. 269–276.
7. Козырь А. В., Феофилов С. В. Анализ периодических движений в цифровых автоколебательных системах управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 9. С. 587–594. DOI: 10.17587/mau.19.587-594
8. Феофилов С. В. Периодические движения в релейных системах с цифровым управлением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 5. С. 11–17.
9. Bazanella A. S., Parraga A. Limit cycles in sampled-data relay feedback systems // IEEE Transactions on Automatic Control. Springer. 2016.

10. **Феофилов С. В., Козыр А. В.** Периодические колебания в дискретных релейных системах управления // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 12. Ч. 3. 2017. С. 61–71.

11. **Koch S., Horn M.** Frequency domain analysis of sampled variable structure systems // IEEE 56<sup>th</sup> Annual Conference on Decision and control December 12–15. 2017. P. 6664–6670.

12. **Galias Z., Yu X.** Euler's discretization of single input sliding-mode control systems // IEEE Transactions on Automatic Control. Sept 2007. Vol. 52, N. 9. P. 1726–1730.

13. **Oliveros-Munoz J. M., Jimenez-Islas H.** Hyperspherical path tracking methodology as correction step in homotopic continuation methods // Chemical Engineering Science. 2013. Vol. 97. P. 413–429.

14. **Galias Z., Yu X.** Analysis of delayed sliding mode control systems under zero-order holder discretization // IEEE Transactions on Automatic Control. Sept 2016. Vol. 61, N. 9. P. 2739–2744.

15. **Kowalczyk P., Glendinning A.** Micro-chaos in relay feedback systems with bang-bang control and digital sampling // IFAC. Italy, 2011.

## Stability of Periodic Motions and Synthesis of Relay Sampled Data Control Systems

**S. V. Feofilov**, svfeofilov@mail.ru, **A. V. Kozyr**, Kozyr\_A\_V@mail.ru,  
Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation

Corresponding author: **Feofilov Sergey V.**, Ph. D., Associate Professor, Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation, e-mail: svfeofilov@mail.ru

Accepted June 14, 2019

### Abstract

This article is devoted to research and design of relay systems with control of data sampling. It is shown that the time sample has a significant effect on the parameters of periodic oscillations. We propose an exact method for analyzing periodic modes in digital self-oscillatory control systems with a two-position relay element and a linear piecewise-linear part is proposed. The proposed approach extends the phase hodograph method to the class of systems operating in discrete time. Two approaches have been developed to assess the stability of periodic motions in such systems. In the first approach, a discrete representation of a plant is considered and areas of stability are defined for each possible limit cycle. The sampling of the control system causes a delay in the switching of the relay in a batch mode in comparison with the continuous case. The second approach assumes the replacement of a discrete system by an equivalent continuous system with a time delay. Further, the asymptotic orbital stability of self-oscillations in a relay control system (RCS) with a delay is estimated. We consider the linearization of relay systems with digital control of the input signal. It is also shown that when linearizing a relay element in a digital RCS using a useful signal, the relay transfer ratio will belong to a certain range of values. Synthesis of corrective devices for relay control systems with regard to digital implementation has been reviewed. At the stage of optimization of parameters of the relay control system, the sample is taken into account. The model example demonstrates an advantage in the synthesis of digital technologies. It is shown that when optimizing the controller parameters with regard to time discretization, it was possible to provide the desired frequency of self-oscillations, which ensures the best accuracy of the tracking mode.

**Keywords:** self-oscillations, relay control, discrete systems, limit cycle, phase locus method, relay-pulse systems

**Acknowledgements:** This article was prepared with the financial support of Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-08-01141).

For citation:

**Feofilov S. V., Kozyr A. V.** Stability of Periodic Motions and Synthesis of Relay Sampled Data Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 11, pp. 655–662.

DOI: 10.17587/mau.20.655-662

### References

1. **Tsyarkin Ya. Z.** Relay automatic systems, Moscow, Nauka, 1974, 576 p. (in Russian).

2. **Yegupov N. D.** ed. Methods of the classical and modern theory of automatic control: Textbook. Vol. 1: Analysis and statistical dynamics of automatic control systems, Moscow, Publishing house of MGTU im. N. E. Bauman, 2000, 748 p. (in Russian).

3. **Tsyarkin Ya. Z., Popkov Yu. S.** Theory of Nonlinear Pulse Systems, Moscow, Nauka, 1973, 416 p. (in Russian).

4. **Faldin N. V., Feofilov S. V.** On Periodic Motions in Relay Systems Contain ing Blocks with Limiters, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2007, vol. 46, no. 2, pp. 177–188 (in Russian).

5. **Morzhov A. V., Faldin N. V.** *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2007, no. 3, pp. 5–15 (in Russian).

6. **Feofilov S. V.** *Izvestiya TulGU. Seriya Vychislitel'naya tekhnika. Informatsionnyye tekhnologii. Sistemy upravleniya. Vyp.3. Sistemy upravleniya*. Vol. 2, Tula, Publishing house of TulGU, 2006, pp. 269–276 (in Russian).

7. **Kozyr A. V., Feofilov S. V.** *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 587–594, DOI: 10.17587/mau.19.587-594 (in Russian).

8. **Feofilov S. V.** *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye*, 2006, no. 5, pp. 11–17 (in Russian).

9. **Bazanella A. S., Parraga A.** Limit cycles in sampled-data relay feedback systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Springer, 2016.

10. **Feofilov S. V., Kozyr' A. V.** *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, iss. 12, part 3, Tula, Publishing house of TulGU, 2017, pp. 61–71 (in Russian).

11. **Koch S., Horn M.** Frequency domain analysis of sampled variable structure systems, *IEEE 56th Annual Conference on Decision and control*, December 12–15, 2017, pp. 6664–6670.

12. **Galias Z., Yu X.** Euler's discretization of single input sliding-mode control systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Sept 2007, vol. 52, no. 9, pp. 1726–1730.

13. **Oliveros-Munoz J. M., Jimenez-Islas H.** Hyperspherical path tracking methodology as correction step in homotopic continuation methods, *Chemical Engineering Science*, 2013, vol. 97, pp. 413–429.

14. **Galias Z., Yu X.** Analysis of delayed sliding mode control systems under zero-order holder discretization, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Sept 2016, vol. 61, no. 9, pp. 2739–2744.

15. **Kowalczyk P., Glendinning A.** Micro-chaos in relay feedback systems with bang-bang control and digital sampling, *IFAC*, Italy, 2011.

**А. А. Колесников**, д-р техн. наук, проф., ankolesnikov@sfnedu.ru,

**О. И. Якименко**, аспирант, iakimenko\_olga@mail.ru,

**И. А. Радионов**, канд. техн. наук, доц., radionovivan@sfnedu.ru, **Д. С. Калий**, аспирант, kaliy.d@yandex.ru,

Институт компьютерных технологий и информационной безопасности

Южного федерального университета, г. Таганрог

## Сравнение методов классической и синергетической теорий управления движением автономного подводного аппарата

*Рассмотрена проблема нелинейного синтеза законов управления движением автономного подводного аппарата (АПА) в вертикальной плоскости. Задачами синтеза являются выход подводного аппарата на заданную глубину с заданной скоростью. На основе нелинейной математической модели АПА выполнен синтез законов управления двумя различными способами: с использованием метода классической теории автоматического управления — пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД регулятора) и с использованием синергетической теории управления — метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Классические методы теории автоматического управления предполагают линейное или линеаризованное математическое описание управляемых процессов и скалярное управление, что не может не сказаться как на адекватности математического описания процессов, так и на эффективности разработанных алгоритмов. Такие структуры оказываются малоэффективными, поскольку не позволяют получить необходимый запас устойчивости системы и являются приближенными. К тому же скалярный принцип управления часто ограничивает возможность эффективного воздействия на систему, игнорируя потенциальные каналы управления. Используемый в работе векторный принцип управления позволяет более эффективно воздействовать на систему через различные каналы управления. Предполагаемые законы синергетического управления наделяют рассматриваемый объект свойствами асимптотической устойчивости во всей допустимой области изменения переменных состояния.*

*Рассмотрены результаты компьютерного моделирования движения АПА, которые подтверждают достижение целей управления.*

**Ключевые слова:** автономный подводный аппарат, система автоматического управления, математическая модель, ПИД регулятор, метод АКАР, инварианты, синтез регулятора, синергетическая теория управления

### Введение

Решению проблемы синтеза систем управления подвижными объектами посвящено большое число научных статей [1–8]. Однако несмотря на определенное разнообразие предложенных вариантов практическое применение получили методы классической теории автоматического управления. В связи с этим нелинейная модель объекта обычно упрощалась путем линеаризации или отбрасывания некоторых элементов модели ввиду их незначительного влияния. Очевидно, что часть динамических свойств объекта, которую мог бы учесть синтезируемый регулятор, при этом неизбежно терялась. Такой подход приводит к неизбежной потере маневренности аппаратов, особенно в экстремальных режимах движения. Поэтому актуальной в настоящее время остается проблема синтеза законов автоматического управления на основе исходных нелинейных много-связных математических моделей движения объектов как наиболее точно отражающих их динамику с физической точки зрения.

### Математическое описание объекта регулирования

При всем многообразии подводных аппаратов в характере их движения есть много общего. Уравнения движения автономного подводного аппарата (АПА) в связанной системе координат могут быть получены из законов механики как уравнения движения тела в жидкой среде. В данной работе рассматривается движение АПА, схематически представленного на рис. 1, в вертикальной плоскости.

Математическая модель движения АПА в вертикальной плоскости имеет следующий вид [9]:

$$\begin{aligned} m_x \frac{dV_x}{dt} - m_y \omega_z V_y &= T - qv^{2/3} (c_x^\alpha \alpha + c_x^\delta \delta_B), \\ m_y \frac{dV_y}{dt} + m_x \omega_z V_x &= qv^{2/3} (c_y^\alpha \alpha + c_y^\omega \omega_z + c_y^\delta \delta_B), \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + V_x V_y (m_y - m_x) &= qv (m_z^\alpha \alpha + m_z^\omega \omega_z + m_z^\delta \delta_B), \quad (1) \\ \frac{dy_g}{dt} &= V_x \psi + V_y, \\ \frac{d\psi}{dt} &= \omega_z, \end{aligned}$$

## Синтез системы управления с использованием ПИД регулятора

Наибольшее внимание специалистов по теории управления привлекает проблема адаптивного управления, о чем свидетельствует большое число публикаций на эту тему [10–14]. Качество адаптивной системы управления напрямую зависит от выбранного класса и структуры регулятора. Если основной регулятор достаточно адекватен задаче управления, то алгоритм адаптации обеспечит желаемое качество замкнутой системы. Однако синтез адекватной структуры регулятора представляет самостоятельную сложную задачу. Следует отметить, что в настоящее время в качестве основного регулятора наиболее часто выбираются простейшие типовые пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) или другие регуляторы с линейными законами управления. При таком выборе алгоритм адаптации позволяет подобрать параметры регулятора в соответствии с некоторым критерием оценки только лишь для узкого диапазона работы замкнутой системы. К тому же скалярный принцип управления часто ограничивает возможность эффективного воздействия на систему, игнорируя потенциальные каналы управления. Такой подход резко ограничивает возможности адаптивной системы управления, так как ее предельные свойства определяются линейными или типовыми законами управления, которые, как известно, эффективны лишь в качестве локальных регуляторов и оказались малопродуктивны при решении задач синтеза управления многосвязными нелинейными многомерными системами.

Рассматриваемый АПА (1) является существенно нелинейным объектом 5-го порядка с двумя каналами управления. Попробуем применить типовой ПИД закон управления для выполнения задачи погружения аппарата с постоянной скоростью для рассматриваемой модели в Simulink математического пакета MATLAB.

На рис. 2 представлена структурная схема АПА в математическом пакете Simulink MATLAB.

В данной схеме в блоке DEE1 записана рассматриваемая система (1) в виде дифференциальных уравнений. На входы подаются управляющие воздействия:  $u_1$  — сила тяги по продольной оси  $OX$ , сформированная ПИД регулятором, и  $u_2 = 0$  — угол перекладки верти-

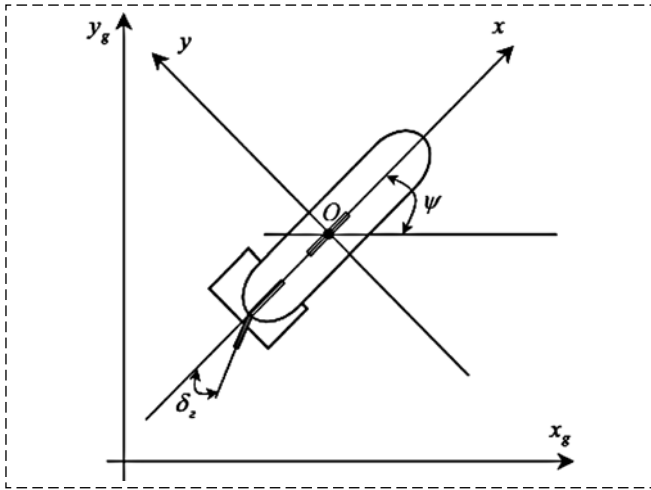


Рис. 1. Схема АПА  
Fig. 1. AUV scheme

где  $V_x$ ,  $V_y$  и  $\omega_z$  — проекции на оси связанной системы координат вектора линейной скорости перемещения центра масс автономного подводного аппарата и вектора угловой скорости вращения автономного подводного аппарата относительно центра масс;  $x_g$ ,  $y_g$  — координаты центра масс АПА в базовой системе координат;  $\psi$  — угол дифферента;  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $J_z$  — элементы матрицы инерции твердого тела с учетом присоединенных масс жидкости;  $c_i^j$  и  $m_i^j$  — гидродинамические коэффициенты;  $\alpha \approx -V_y/V$  — угол атаки;  $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$  — скорость поступательного движения;  $q$  — скоростной напор, зависящий от плотности воды и скорости движения:  $q = 0,5\rho V^2$ ;  $v$  — объемное водоизмещение аппарата;  $T$  — сила тяги по продольной оси  $OX$ , создаваемая тяговым движителем;  $\delta_b$  — угол перекладки вертикального руля.

Переменные состояния:  $x_1 = V_x$ ,  $x_2 = V_y$ ,  $x_3 = \omega$ ,  $x_4 = y_g$ ,  $x_5 = \psi$  и управляющие воздействия:  $u_1 = T$ ,  $u_2 = \delta_b$ .

Параметры модели (1) представлены ниже.

### Параметры модели АПА

$m_x$ , кг	110
$m_y$ , кг	150
$J_z$ , кг·м <sup>2</sup>	1200
$m_z^a$ , 1/°	-0,015
$m_z^o$ , 1/°	-0,012
$m_z^c$ , 1/°	-0,01
$v$ , м <sup>3</sup>	50
$c_x^a$ , 1/°	0,01
$c_x^c$ , 1/°	0,01
$c_y^a$ , 1/°	0,01
$c_y^c$ , 1/°	0,03
$c_y^o$ , 1/°	0,01
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1000



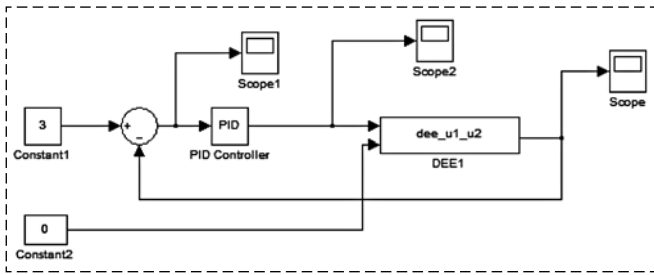


Рис. 2. Структурная схема АПА в Simulink MATLAB  
Fig. 2. Block diagram of the AUV in Simulink MATLAB

кального руля. В данном случае рассматривается один канал управления, предполагающий движение аппарата на постоянной глубине.

Как известно, в установившемся режиме ПИД регулятор воздействует на выходную величину так, чтобы свести ошибку регулирования  $e(t)$  к нулю. Ошибка регулирования представляет собой разность между заданным значением и значением управляемой (выходной) переменной объекта. Принцип ПИД регулятора основывается на уравнении, представля-

ющем регулирующее воздействие как сумму пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих:

$$u(t) = k_p e + k_i \int_0^t e dt + k_d \frac{de}{dt}. \quad (2)$$

Существуют различные процедуры для нахождения коэффициентов регулятора такого типа, также есть и средства автоматического поиска коэффициентов. Применяя их в совокупности, получаем  $k_p = 10$ ,  $k_i = 0,001$ ,  $k_d = 0,1$ . При найденных значениях регулятора для движения аппарата с постоянной скоростью  $x_1 = 3$  проведено компьютерное моделирование. На рис. 3, 4 представлены графики проекции на ось  $Ox$  вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА и силы тяги по оси  $Ox$  в базовой системе координат. Можно заметить, что регулятор отрабатывает достижение одной поставленной цели. Но при изменении значения управляющего воздействия  $u_2$  регулятор уже не отрабатывает выполнение рассматриваемой задачи, для достижения цели необходимо будет заново выбирать коэффициенты регулятора. Для синтеза нелинейных законов, обеспечивающих выполнение нескольких целей управления (например, движение с желаемой скоростью на заданной глубине), ПИД регулятор применить проблематично. Как известно, в регуляторах такого типа при подборе коэффициентов используется линеаризация, и если для одного канала управления такая процедура еще уместна, то для нескольких — нет. Нетрудно заметить, что в модели (1) присутствуют перекрестные обратные связи, и использование линеаризации в данном случае нерационально.

В связи с этим рассмотрим синтез нелинейного регулятора с двумя каналами управления, обеспечивающего выполнение двух технологических целей по процедуре синергетического синтеза методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов.

### Описание процедуры синергетического синтеза регулятора

Для решения задачи синтеза будем использовать метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления (СТУ) [15–18]. СТУ — это новое направление в общей теории

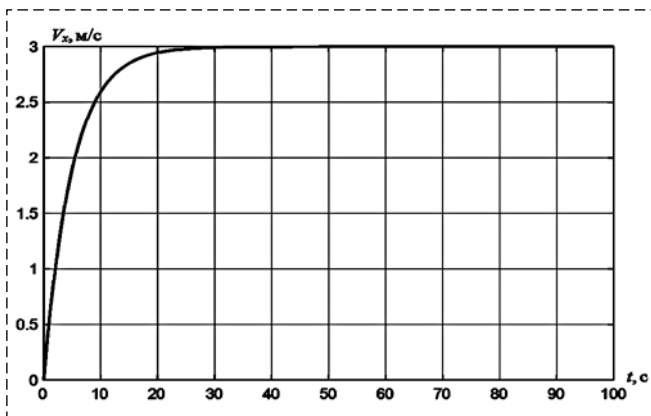


Рис. 3. График проекции на ось  $Ox$  вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА

Fig. 3. Graph of the projection onto the axis  $Ox$  of the linear velocity vector of the AUV center of mass

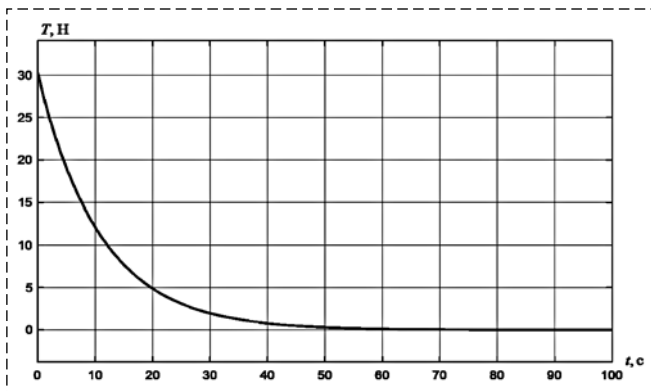


Рис. 4. График силы тяги по продольной оси  $Ox$

Fig. 4. Traction force graph along the longitudinal axis  $Ox$

управления, которое базируется на принципах направленной самоорганизации и динамической декомпозиции синтезируемых нелинейных систем на притягивающих инвариантных многообразиях (ИМ). Анализ движения объекта можно проводить с учетом всех координат системы, т. е. в отличие от традиционного подхода — конструирования отдельного стабилизирующего управления для каждого канала регулирования — в этом подходе используется совместное управление по всем переменным в целях перевода объекта в желаемое состояние. В этом случае для ряда вариантов алгоритмов управления связи между каналами управления осуществляются не косвенно, через объект управления, а непосредственно формируются в регуляторе.

В синергетической теории управления набор инвариантов должен отражать цели управления объектом. Число инвариантов всегда соответствует числу имеющихся каналов управления. В рассматриваемом случае необходимо обеспечить выход АПА на заданную глубину с заданной скоростью. Иными словами, в модели (1) выделяются два канала управления: сила тяги по продольной оси  $OX$ , создаваемая тяговым движителем, и угол перекладки вертикального руля, и, соответственно, два инварианта системы — заданная глубина и заданная скорость движения АПА.

Согласно процедуре АКАР введем совокупность ИМ следующего вида:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= x_2 - \varphi_1 = 0; \\ \psi_2 &= x_1 - x_1^* = 0.\end{aligned}\quad (3)$$

Как видно из соотношений (3), на переменную  $x_4$  в данном случае будем влиять через переменную  $x_2$ , где  $\varphi_1$  — пока неизвестная функция переменных состояния.

Запишем декомпозированную систему, которая имеет третий порядок. Очевидно, что одна из целей управления  $x_1 = x_1^*$  уже достигнута на  $\psi_2 = 0$ :

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= \frac{qv(m_z^\alpha \alpha + m_z^\omega x_3 + m_z^\delta u_2) - x_1^* \varphi_1 (m_y - m_x)}{J}; \\ \dot{x}_4 &= x_1^* x_5 + \varphi_1; \\ \dot{x}_5 &= x_3.\end{aligned}\quad (4)$$

Функцию  $\varphi_1$  можно рассматривать как "внутреннее" управляющее воздействие для декомпозированной системы (4) и можно повторить

процедуру, тем самым реализуя принцип последовательной декомпозиции. Для достижения цели управления  $x_4 = x_4^*$  введем еще одно инвариантное многообразие:  $\psi_3 = x_4 - x_4^* = 0$ .

Функция  $\varphi_1$  ищется из решения функционального уравнения  $T_3 \dot{\psi}_3 + \psi_3 = 0$ , т. е.  $T_3(x_1^* x_5 + \varphi_1) + x_4 - x_4^* = 0$  в силу системы (4), где  $T$  определяет быстродействие регулятора.

Получаем выражение для  $\varphi_1 = -\frac{T_3 x_1^* x_5 + x_4 - x_4^*}{T_3}$  и, подставляя его в (3), находим  $\psi_1 = x_2 + \frac{T_3 x_1^* x_5 + x_4 - x_4^*}{T_3}$ . Аналогично записываем функциональные уравнения для  $\psi_1, \psi_2$ :

$$\begin{aligned}T_1 \left( \frac{qv^{2/3}(c_y^\alpha \alpha + c_y^\omega x_3 + c_y^\delta u_2) - m_x x_3 x_1}{m_y} + \frac{x_1 x_5 + x_2}{T_3} + x_1^* x_3 \right) + x_2 + \frac{T_3 x_1^* x_5 + x_4 - x_4^*}{T_3} &= 0; \\ \frac{T_2(u_1 - qv^{2/3}(c_x^\alpha \alpha + c_x^\delta u_2) + m_y x_3 x_2)}{m_x} + x_1 - x_1^* &= 0.\end{aligned}\quad (5)$$

Решая систему (5), находим искомые законы управления:

$$\begin{aligned}u_1 &= (T_2 qv^{2/3} c_x^\alpha \alpha T_1 T_3 c_y^\delta - T_2 c_x^\delta T_1 T_3 qv^{2/3} c_y^\alpha \alpha - \\ &- T_2 c_x^\delta T_1 T_3 qv^{2/3} c_y^\omega x_3 - T_2 c_x^\delta T_1 x_1^* x_3 m_y T_3 + \\ &+ T_2 c_x^\delta T_1 T_3 m_x x_3 x_1 - T_2 c_x^\delta T_1 m_y x_1 x_5 - T_2 c_x^\delta T_1 m_y x_2 + \\ &+ T_2 c_x^\delta m_y x_4^* - T_2 c_x^\delta x_2 m_y T_3 - T_2 c_x^\delta m_y T_3 x_1^* x_5 - \\ &- T_2 c_x^\delta m_y x_4 - T_2 m_y x_3 x_2 T_1 T_3 c_y^\delta - \\ &- x_1 m_x T_1 T_3 c_y^\delta + x_1^* m_x T_1 T_3 c_y^\delta) / (T_2 T_1 T_3 c_y^\delta), \\ u_2 &= -(T_1 T_3 qv^{2/3} c_y^\alpha \alpha + T_1 T_3 qv^{2/3} c_y^\omega x_3 + \\ &+ T_1 x_1^* x_3 m_y T_3 - T_1 T_3 m_x x_1 x_3 + T_1 m_y x_1 x_5 + \\ &+ T_1 m_y x_2 - m_y x_4^* + x_2 m_y T_3 + \\ &+ m_y T_3 x_1^* x_5 + m_y x_4) / (T_1 T_3 qv^{2/3} c_y^\delta).\end{aligned}\quad (6)$$

При заданных инвариантах  $x_1^* = 3, x_4^* = -20$  системы (1) и при  $T_1 = T_2 = T_3 = 5$  в идеализированных условиях, когда внешнее сопротивление не действует, графики переходных процессов переменных состояния имеют вид, представленный на рис. 5, 6.

Анализируя полученные графики движения АПА в идеализированных условиях в вертикальной плоскости, представленные на рис. 5, 6, можно заметить, что регулятор работает исправно — АПА выходит на заданную

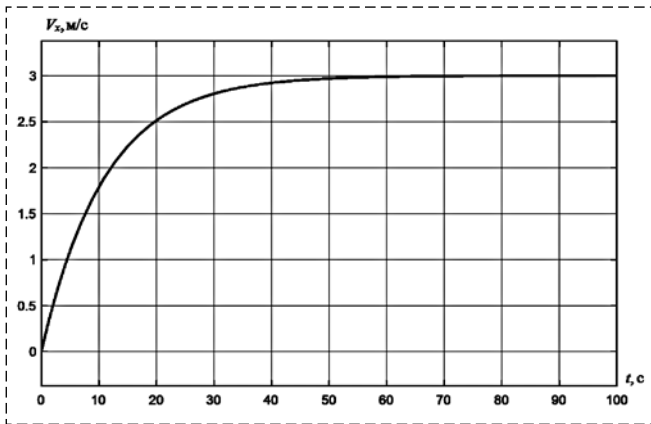


Рис. 5. График проекции на ось  $OX$  вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА

Fig. 5. Graph of the projection onto the axis  $OX$  of the linear velocity vector of the center of mass AUV

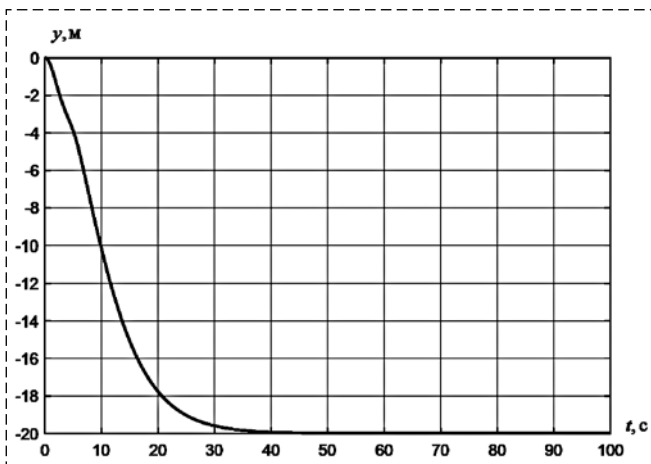


Рис. 6. График координаты центра масс АПА в базовой системе координат

Fig. 6. Graph coordinates of the AUV center of mass in the base coordinate system

глубину с заданной скоростью, т. е. достигают инварианты системы.

### Заключение

В данной работе показана возможность синтеза алгоритмов автоматического управления АПА на основе нелинейного математического описания для движения в вертикальной плоскости. Найденный ПИД регулятор позволил выполнить одну цель управления — погружение аппарата с постоянной скоростью. Для линейных объектов данный регулятор, вне сомнения, будет эффективен, но для рассматриваемой нелинейной модели АПА целесообразнее использовать метод АКАР синергетической теории управления. Найденный этим методом закон управления обеспечивает

достижение одновременно двух целей управления: выход автономного подводного аппарата на заданную глубину с заданной скоростью. В подтверждение работоспособности регулятора проведено компьютерное моделирование поведения системы с учетом параметров исследуемого технического объекта.

### Список литературы

1. Тарасов Н. Н., Тахтамышев М. Г. Алгоритм принятия решений при управлении балластной системой подводного аппарата // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 74—77.
2. Евстигнеева Л. В., Тарасов Н. Н., Тахтамышев М. Г. Синтез алгоритма для одной задачи управления морскими подвижными объектами // Проблемы управления. 2007. № 4. С. 84—88.
3. Ивель В. П., Герасимова Ю. В. Адаптивная система вертикального позиционирования автономного подводного аппарата // Наука и мир. 2014. Т. 1. № 2(6). С. 161—164.
4. Чернухин Ю. В. Искусственный интеллект и нейрокompьютеры. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. 273 с.
5. Пшихопов В. Х., Чернухин Ю. В., Федотов А. А. Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 87—101.
6. Nyakudome T. Design of Autonomous Underwater Vehicle // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2011. Vol. 8, N. 1. P. 131—139.
7. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 7. С. 62—69.
8. Бардачевский Н. Н., Безсуднов Е. Ю. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации // Сборник материалов международной научной конференции "СибОптика-2013", 2013. Новосибирск: СГГА. Т. 2. С. 124—128.
9. Лукомский Ю. А., Лукомский Ю. А., Чугунов В. С. Системы управления морскими подвижными объектами. Л.: Судостроение, 1988. 272 с.
10. Тарасов Н. Н., Тахтамышев М. Г. Алгоритм принятия решений при управлении балластной системой подводного аппарата // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 74—77.
11. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
12. Дружинина М. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу // Автоматика и телемеханика. 1996. № 2. С. 3—33.
13. Перельман И. И. Анализ современных методов адаптивного управления с позиции приложения автоматизации технологических процессов // Автоматика и телемеханика. 1991. № 7. С. 3—32.
14. Мирошник И. В., Никифоров В. О. Адаптивное управление пространственным движением нелинейных объектов // Автоматика и телемеханика. 1991. № 7. С. 78—87.
15. Колесников А. А. Синергетическая теория. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
16. Синергетика: процессы самоорганизации и управления: часть 2 / Под общ. Ред. А. А. Колесникова. Таганрог: ТРТУ, 2005. 358 с.
17. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: Едиториал УРСС / КомКнига, 2012. 240 с.
18. Современная прикладная теория управления. Ч. II: синергетический подход в теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. М.: ФЦ "Интеграция", Таганрог: изд-во ТРТУ, 2000. 559 с.

# Comparison of the Methods of Classical and Synergetic Theories of Control of the Movement Autonomous Underwater Machine

A. A. Kolesnikov, ankolesnikov@sfnu.ru, O. I. Yakimenko, iakimenko\_olga@mail.ru,  
I. A. Radionov, radionovivan@sfnu.ru, D. S. Kaliy, kaliy.d@yandex.ru  
Institute of computer technology and information security "Southern Federal University",  
Taganrog, 347900, Russian Federation

Corresponding author: **Kolesnikov Anatoly A.**, D. Sc., Professor,  
Institute of computer technology and information security "Southern,  
e-mail: ankolesnikov@sfnu.ru

Accepted on March 28, 2019

## Abstract

The article deals with the problem of nonlinear synthesis of the laws of motion control of an autonomous underwater vehicle (APA) in the vertical plane. The tasks of the synthesis are the output of the underwater vehicle to a predetermined depth at a given speed. Based on the non-linear mathematical model of the APA, the control laws are synthesized by two different approaches: using the classical automatic control theory method, the proportional-integral-differential controller (PID controller), and using the synergetic control theory, the analytical design method for aggregated regulators (ADAR). Classical methods of the theory of automatic control assume a linear or linearized mathematical description of controlled processes and scalar control, which cannot but affect the adequacy of the mathematical description of processes and the efficiency of the developed algorithms. Such structures are ineffective because they do not allow to obtain the necessary stability margin of the system and are approximate. In addition, the scalar control principle often limits the ability to effectively influence the system, ignoring potential control channels. The vector control principle used in the work allows to more effectively influence the system through various control channels. The assumed laws of synergetic control endow the object in question with properties of asymptotic stability in the entire admissible region of change of state variables.

The results of computer simulation of the APA motion, which confirm the achievement of control goals, are considered.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle, automatic control system, mathematical model, PID controller, ADAR method, invariants, controller synthesis, synergistic control theory

For citation:

Kolesnikov A. A., Yakimenko O. I., Radionov I. A., Kaliy D. S. Comparison of the Methods of Classical and Synergetic Theories of Control of The Movement Autonomous Underwater Machine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 11, pp. 663–668.

DOI: 10.17587/mau.20.663-668

## References

1. Tarasov N. N., Tahtamyshev M. G. *Control problems*, 2011, no. 1, pp. 74–77 (in Russian).
2. Evstigneeva L. V., Tarasov N. N., Tahtamyshev M. G. *Control problems*, 2007, no. 4, pp. 84–88 (in Russian).
3. Ivel' V. P., Gerasimova Yu. V. *Nauka i Mir*, 2014, vol. 1, no. 2(6), pp. 161–164 (in Russian).
4. Chernuhin Yu. V. *Artificial Intelligence and Neurocomputers*, Taganrog, Publishing house of TRTU, 1997, 273 p. (in Russian).
5. Pshihopov V. H., Chernuhin Yu. V., Fedotov A. A. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 3, pp. 87–101 (in Russian).
6. Hyakudome T. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2011, vol. 8, no. 1, pp. 131–139.
7. Bocharov L. *Ehlektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2009, no. 7, pp. 62–69 (in Russian).
8. Bardachevskij N. N. *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "SibOptika-2013"*, 2013, Novosibirsk, SGGA, vol. 2, pp. 124–128 (in Russian).
9. Lukomskij Yu. A., Chugunov V. S. *Marine Mobile Control Systems*, Leningrad, Sudostroenie, 1988, 272 p. (in Russian).
10. Tarasov N. N., Tahtamyshev M. G. *Problemy upravleniya*, 2011, no. 1, pp. 74–77 (in Russian).
11. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems*, SPb., Nauka, 2000, 549 p. (in Russian).
12. Druzhinina M. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Avtomatika i Telemekhanika*, 1996, no. 2, pp. 3–33 (in Russian).
13. Perel'man I. I. *Avtomatika i Telemekhanika*, 1991, no. 7, pp. 3–32 (in Russian).
14. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O. *Avtomatika i Telemekhanika*, 1991, no. 7, pp. 78–87 (in Russian).
15. Kolesnikov A. A. *Synergetic control theory*, Moscow, Ehnergoatomizdat, 1994, 344 p. (in Russian).
16. Kolesnikov A. A. ed. *Synergetics: processes of self-organization and control*, Taganrog, Publishing house of, TRTU, 2005, 358 p. (in Russian).
17. Kolesnikov A. A. *Synergetic methods of control of complex systems: the theory of system synthesis*, Moscow, Editorial URSS, KomKniga, 2012, 240 p. (in Russian).
18. Kolesnikov A. A. *Modern applied control theory. Part II: a synergistic approach to control theory*, Moscow, FC "Integraciya", Taganrog, publishing house, TRTU, 2000, 559 p. (in Russian).

**M. Ali Ben Fathallah**<sup>1,2</sup>, PhD Student, mohamed-benfathallah@hotmail.fr,  
**A. Ben Othman**<sup>1,3</sup>, PhD, afef@benothman.de, **M. Besbes**<sup>1,2</sup>, Professor, mongi.besbes@gmail.com,  
<sup>1</sup> Robotics, Informatics and Complex Systems (RISC), National School of Engineers of Tunis,  
University of Tunis El Manar, Tunis,  
<sup>2</sup> Higher Institute of Information and Communication Technologies, University of Carthage, Tunis,  
<sup>3</sup> National School of Engineers of Carthage, University of Carthage, Tunis

*Corresponding author: Ali Ben Fathallah Mohamed*, PhD Student,  
Robotics, Informatics and Complex Systems (RISC), National School of Engineers of Tunis,  
University of Tunis El Manar, Tunis, Tunisia, e-mail: mohamed-benfathallah@hotmail.fr

*Accepted on June 06, 2019*

## Stabilizing a DC Motor Speed of Photovoltaic Pumping System Using a Super Capacitor and Fuzzy Logic Controller

### Abstract

*In this paper, two issues are discussed in a PV pumping system. Firstly, an evaluation of super capacitor is studied to reassure the storage of electrical energy and solve the intermittence problem of photovoltaic energy production in dark periods. Secondly, a fuzzy logic controller (FLC) is proposed to stabilize, on the one hand, the DC motor speed around a preferred level by the control of duty cycle of DC buck boost converter. On the other hand, FLC serves to control the charge and discharge of super capacitor according to the sunlight levels and its state of charge. In this framework, a complete photovoltaic pumping system model is simulated in MATLAB Simulink to discuss the run results at different levels of sunshine.*

**Keywords:** photovoltaic pumping system, super capacitor, fuzzy logic controller, DC buck boost converter, DC motor speed, state of charge

For citation:

**Ali Ben Fathallah M., Ben Othman A., Besbes M.** Stabilizing a DC Motor Speed of Photovoltaic Pumping System Using a Super Capacitor and Fuzzy Logic Controller, *Mekhatronica, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 11, pp. 669—676.

УДК 681.51

DOI: 10.17587/mau.20.669-676

**М. Али Бен Фатхаллах**<sup>1,2</sup>, аспирант, mohamed-benfathallah@hotmail.fr,  
**А. Бен Отман**<sup>1,3</sup>, PhD, afef@benothman.de, **М. Бесбес**<sup>1,2</sup>, проф., mongi.besbes@gmail.com,  
<sup>1</sup> Лаборатория робототехники, информатики и сложных систем, Национальная инженерная школа Туниса,  
Университет Тунис-Аль-Манар, г. Тунис, Тунис,  
<sup>2</sup> Институт информационно-коммуникационных технологий, Университет Карфагена, г. Тунис, Тунис,  
<sup>3</sup> Национальная инженерная школа, Университет Карфагена, г. Тунис, Тунис

## Стабилизация двигателя постоянного тока в фотоэлектрической насосной системе с помощью суперконденсатора и нечеткого логического контроллера

*В данной работе обсуждаются две проблемы, связанные с фотоэлектрической насосной системой. Во-первых, проводится анализ суперконденсатора, направленный на обеспечение хранения электроэнергии и разрешение проблем, связанных с отсутствием производства фотоэлектрической энергии в темное время суток. Во-вторых, предложено использовать в системе нечеткий логический контроллер. С одной стороны, он предназначен для стабилизации частоты вращения двигателя постоянного тока вблизи предпочтительного значения за счет управления режимом работы комбинированного преобразователя постоянного тока. С другой стороны, этот контроллер служит для управления зарядкой и разрядкой суперконденсатора в соответствии с уровнем солнечного освещения и уровнем заряда конденсатора. Полная модель фотоэлектрической насосной системы исследуется в MATLAB Simulink. Обсуждаются результаты моделирования при разных уровнях освещения.*

**Ключевые слова:** насосная фотоэлектрическая система, суперконденсатор, нечеткий логический контроллер, комбинированный преобразователь постоянного тока, частота вращения двигателя постоянного тока, состояние заряда

## Introduction

The increase of oil prices and electricity billing, the abandonment of the silicon material and the sunshine of almost all the planet, are major factors leading to seek new energy sources such as photovoltaic electricity, free and independent of any other source of energy. This is why scientific research is reacting to improve the quality of photovoltaic energy to ensure consumer performance for the user [28, 29], and having a good knowledge of the basic solar components, including Direct Normal Irradiation (DNI), Global Horizontal Irradiation (GHI), is greatly significant to photovoltaic system (PV) projects. Moreover, the applicability of solar energy in area such as in the south of Tunisia can be an answer to the overgrowing problems of depleting fossil fuel supplies and CO<sub>2</sub> emissions in Tunisia [30, 31].

Several applications are powered by photovoltaic energy, such as satellites, electric cars, street lighting, boilers, and home installations. This paper represents a study of the photovoltaic water pumping system, which is still an essential function for living beings. This function requires an energy storage system to remedy the intermittent problem of system operation following the absence of sunshine during nights and cloudy days or in case of maintenance.

Despite the maturity of their technologies and their low cost, the number of cycles of conventional batteries is very limited, moreover these storage devices are affected by the memory impact that decrease their performance if they are not completely discharged before being recharged again [1].

Since 1978, super capacitors have appeared to perform the memory function in some electrical devices, such as VCRs and cameras. They were also exploited in 1990s to power toys and household equipment, and developed recently in electric vehicles and energy sources with higher storage capacities [2]. These ideal electrical properties have resulted in the rapid growth in the market of this element.

Indeed, the super capacitor is characterized by its long life span of up to 15 years, a cyclability that can exceed 20000 cycles of charge and discharge, a very high power density up to 18 KW/Kg and has no risk of explosion or thermal runaway [3, 23, 22]. All these advantages are the benefits of its new structure consisting of an electrolyte placed between two porous electrodes. The porosity of the electrodes offered a wider space for moving to a larger amount of charged ions, which provides an enormously high storage capacity compared to conventional batteries [4].

Experimental tests and simulations in MATLAB Simulink allowed to model the super capacitor by linear circuit with three branches RC, each branch of which describes the internal phenomena of the super capacitor during the phases of charge, discharge and rest [5, 23, 24].

Thanks to its efficiency and its simplicity compared to other models, the three branches RC model is taken into account, in this paper, to be implemented in the PV pumping system and simulated in Matlab Simulink in order to validate the storage performance by the super capacitor.

The pumping function can be disturbed by the accumulation of limestone, sand and pebbles at the pump, which reduces the stability of the pumping motor speed. Therefore, the control of the pumping motor voltage is unavoidable, and it is ensured by the intermediate of a DC buck boost converter placed between the power supply and the DC motor, which allows to increase or decrease the DC motor voltage to reach the nominal speed, playing on the duty cycle value by a sufficiently robust control technique.

Invented in 1965 by professor of mathematics L. A. Zadeh [20], the fuzzy logic controller has been used in several applications. Indeed, D. K. Grover has implemented the fuzzy logic controller for image processing, noise cancellation and the control of water level and shower temperature. He has thus demonstrated his simplicity [19]. This method has invaded the field of biomedical informatics and life sciences [18]. It has also been used to control automotive suspension systems [16], and the power of nuclear reactors [17]. In addition, FLC has demonstrated an intelligent behavior in the field of robotics for obstacle avoidance and line tracking [15].

The comparative studies that were analyzed between fuzzy logic and the neural network controller, clearly affirmed the performance and accuracy of the fuzzy logic to follow the reference, and its ability to model inaccurate knowledge [10, 12, 13].

In addition, K. V. Chate, O. E. Prado and C. F. Rengifo demonstrated that the fuzzy logic controller allows a smaller error deviation compared to the LQR and PID controllers, while ensuring a large equilibrium point of attraction region without wasting energy [14]. In terms of response time, this control method is faster compared to the PI controller and can immediately reach the reference with lower overruns [7, 11].

The fuzzy logic controller is also favored by its dynamic behavior and the self-tuning of its gain, which is the reason that allows stability and robust-

ness of control against unexpected variations in machine parameters [9, 10].

Unlike the PID controllers, the fuzzy logic controller does not require any mathematical model development of the system, it satisfies the non-linear criteria in all operating ranges, which reflects its importance for controlling the complex systems [6].

P. R. Komar and S. L. V. Sruvan Kumar have carried out experimental studies demonstrating that the ripple of the output voltage exceeds 3 V for Flyback converter controlled by PID controller, however this value decreases to 0.2 V and the power factor of Flyback converter reaches 70.07 % using the fuzzy logic controller [8].

All these advantages are sufficiently convincing to choose the fuzzy logic controller to control, on the one hand, the MOSFET integrated in the DC buck boost converter in order to vary its duty cycle and follow the reference speed of DC pumping motor in all the sunning conditions. On the other hand, the charge and discharge control of the super capacitor is accomplished through the fuzzy logic controller according to the level of sunlight and its state of charge.

In this context, this paper presents, in the first part, a modeling on Matlab Simulink of super capacitor by the three branches RC model, in the three branches RC model. In the second part a description of the implementation of fuzzy logic controller using Matlab Simulink to follow the state of charge of super capacitor and to vary the duty cycle of DC buck boost converter in order to maintain the stability of DC Motor speed in a PV pumping system. Finally simulation results are discussed.

## Model of PV pumping system

The PV pumping model, as shown in Fig. 1, is achieved through MATLAB Simulink. It consists of a photovoltaic panel model representing the main power supply of the system, a three-branch RC model of super capacitor to ensure the continuity of system operation, and two fuzzy logic controllers, the first of which controls the loading or super capacitor discharge according to its state of charge, while the second controls the duty cycle of DC buck boost converter in order to maintain DC motor speed in its stable state.

### Three branch RC model of Super capacitor

To model the super capacitor, it is necessary to know its chemical composition, understand its functioning and visualize the internal phenomena which can appear during the phases of charge, discharge and rest.

Indeed, the basic structure of this storage device is composed of an ionic electrolyte placed between two porous electrodes ensuring a larger space for the displacement of the ions carrying the charge [23, 27]. There is a nonlinear relationship between super capacitor capacitance and the surface of the material, a consequence of the heterogeneity of the electrodes and the variation of the pore depths. Therefore the super capacitor model consists mainly of a variable capacitance [4].

Zubieta and Bonert have proved, through experimental tests, the appearance of charge redistribu-

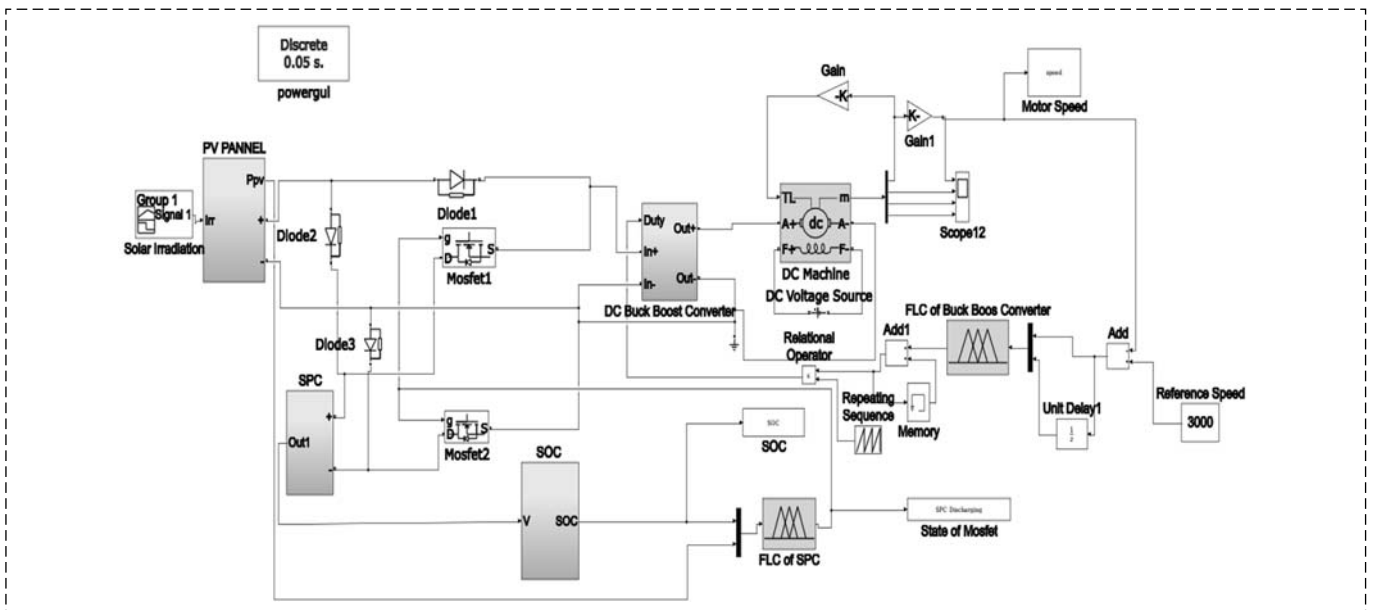


Fig. 1. PV pumping system model in MATLAB Simulink

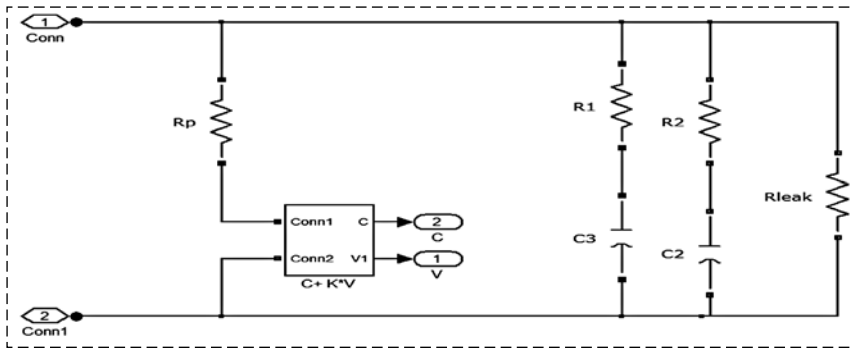


Fig. 2. Super capacitor Model in MATLAB Simulink

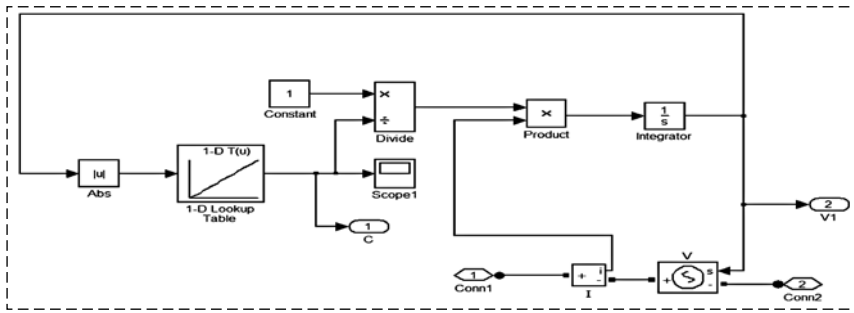


Fig. 3. Linearity of the super capacitor capacity according to the charging voltage

tion and self-discharge phenomena during the rest phase of the super capacitor, and this is explained by the mobility of charged ions. To simulate these phenomena, an RC circuit can be included in the super capacitor model [5]. The nature and electrochemical structure of the ionic electrolyte is also modeled by a second RC circuit [4].

This three branch RC model consists, as shown in Fig. 2, of a fast branch consisting of a series resistor with a variable capacitance as a function of the charging voltage, and two branches, medium-term and long-term, to describe the effect of redistribution of charge as a function of the duration of the rest phase. The presence of leakage resistance connected in parallel illustrates the phenomenon of self-discharge [21, 23].

The super capacitor capacity is expressed as a function of the charging voltage by the following linear relationship:

$$C = C_0 + KV. \quad (1)$$

$C_0$  is the base capacitance of super capacitor,  $K$  is the voltage-dependent capacitance in F/V. His model on MATLAB Simulink is shown in Fig. 3.

The state of charge (SOC) of super condenser is a very important parameter, it is defined by the power amount available on the super capacitor, and given by the ration of the current capacity  $Q$  to the nominal capacity  $Q_n$  [25, 26]:

$$SOC = \frac{Q}{Q_n}. \quad (2)$$

Which gives the following equation:

$$SOC = \frac{(C_0 + KV)V}{C_n V_n}. \quad (3)$$

From the value of this parameter, the super capacitor is controlled during the charge or discharge cycles.

### Model of DC buck boost converter

The use of a DC-DC converter allows generation of an output voltage at the desired level. Knowing that the DC buck converter makes it possible to lower the output voltage, and the DC boost converter makes it possible to raise the output voltage, the DC buck boost converter is implemented in the PV pumping

system to play dual roles: on the one hand it plays the role of DC buck converter if the supply voltage is higher than the pumping motor voltage, on the other hand it plays the role of DC boost converter if the supply voltage is lower than the pumping motor voltage.

The choice of conversion mode of this type of converter is ensured by the variation of its duty ratio  $D$  between 0 and 1, this parameter makes it possible to obtain the relationship between the output voltage and the input voltage as indicated by following equation:

$$V_s = \frac{D}{1-D} V_e. \quad (4)$$

As shown in Fig. 4, the DC buck boost converter is compiled of a power MOSFET transistor used as a controllable switch, a diode, a filter capacitor  $C_c$  and an inductance  $L_c$ .

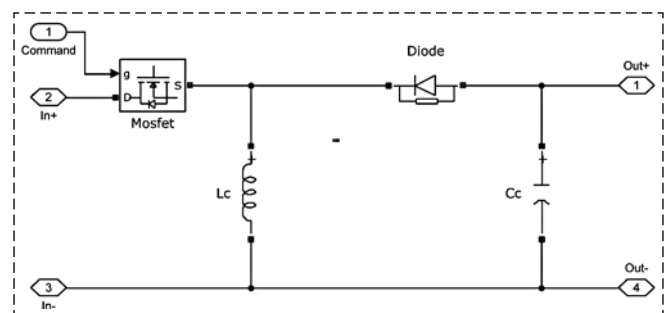


Fig. 4. DC Buck Boost converter model in MATLAB Simulink



When the MOSFET is in the on state, the input source supplies the energy to the inductor  $L_c$ , which will be conducted through the diode, during MOSFET blocking, to be discharged into the capacitor and the load.

The value of capacitor of buck boost converter is obtained by the following expression:

$$C_c = \frac{U_e}{\Delta U_s f R_c} \frac{D^2}{1-D}. \quad (5)$$

$U_e$  is the input source voltage,  $\Delta U_s$  is the ripple of the output voltage,  $f$  is the MOSFET switching frequency, and  $D$  is the duty cycle of DC buck boost converter.

The inductance of buck boost converter is expressed as a function of the current ripple  $\Delta I_{lc}$  that passes through it:

$$L_c = \frac{U_e}{\Delta I_{lc} f} D. \quad (6)$$

In order to minimize the current and voltage output ripple, the maximum duty cycle value is taken into account in the calculation of the buck boost converter parameters.

### Fuzzy logic controller

This part represents the fuzzy logic controller used to control, on the one hand, charging or discharging super capacitor according to its state of charge, on the other hand to stabilize pumping motor at its nominal speed.

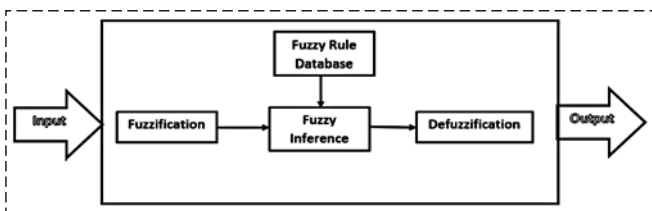


Fig. 5. Flowchart of working principle of Mamdani method

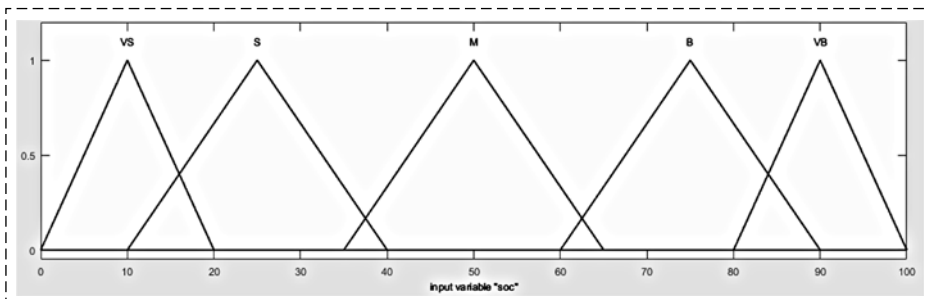


Fig. 6. Fuzzy membership function of state of charge of super capacitor

Without recourse to mathematical models and using only a human experience, the fuzzy logic controller is incorporated, as shown in Fig. 5, in the form of three main steps: the fuzzification step, the inference step and the defuzzification step.

#### • Fuzzification step

It is the projection of real physical variables on fuzzy sets characterizing the linguistic values taken by these variables, according to a definite membership function [32].

The membership functions follow an arbitrarily chosen form (triangular, trapezoidal, exponential, Gaussian ...). Triangular shapes are used in this work to facilitate programming. As for the number of membership functions, it is usually odd because they are distributed around an average value.

#### • Fuzzy inference

It relies on the use of an implication operator to evaluate the truth degree of a rule  $R$  of the form "If Condition 1 and Condition 2 Then Conclusion" [14]. This allows the quantification of the strength of the connection between the condition and the conclusion of the rule.

#### • Defuzzification step

The defuzzification step consists in transforming the fuzzy set resulting from the aggregation of the rules into a precise control quantity [14, 32].

The fuzzy logic controller is used for the decision making of super capacitor charging or discharging, and maintaining the pumping motor speed throughout its nominal value.

### Super capacitor charge and discharge control

The decision of super capacitor charging or discharging depends on its state of charge and on the solar irradiation.

As shown in Fig. 6, the state of charge of super capacitor is classified into five linguistic variables: Very Small (VS), Small (S), Medium (M), Big (B) and Very Big (VB).

The solar irradiation classified into five linguistic variables: Small (S), Zero (Z) and Big (B): Very Small (VS), Small (S), Medium (M), Big (B)

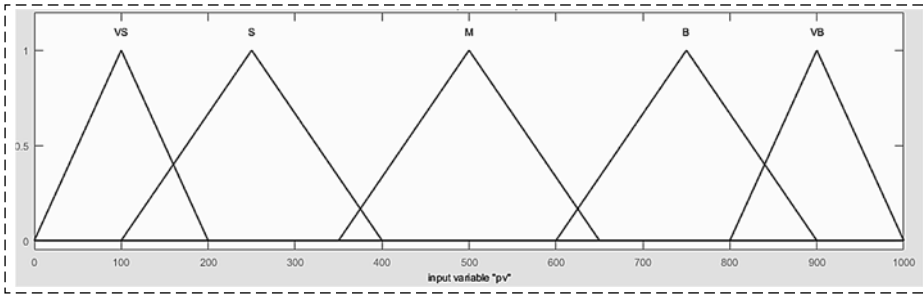


Fig. 7. Fuzzy membership function of solar irradiation

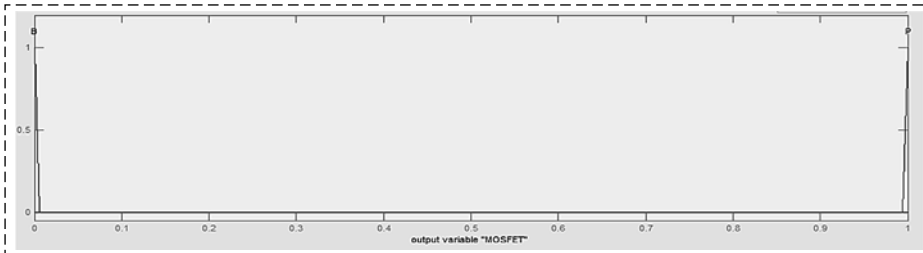


Fig. 8. Fuzzy membership function of MOSFET state

and Very Big (VB). Here membership function is shown in Fig. 7.

The fuzzy logic controller output represents the setting in 1 (P) or in zero (B) of MOSFET linking the super capacitor to the pump motor. See that the output is a Boolean variable (0 or 1), the intersection between the variables input is avoided to ensure control accuracy of the MOSFET. The membership function of the MOSFET state is represented by Fig. 8.

Table 1 represents the rules base of fuzzy logic controller.

Table 1

Rule Base of charging discharging control by fuzzy logic controller

SOC	pv	VS	S	M	B	VB
VS	MOSFET	B	P	P	P	P
S		B	P	P	P	P
M		B	B	P	P	B
B		B	B	B	P	B
VB		B	B	B	B	B

### DC pumping motor speed control

To maintain the pumping motor speed close at its nominal value, a comparison is made between the measured and the reference speed. This comparison represents the fuzzy logic controller input, it is classified, as shown in Fig. 9, into five linguistic variables: Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS), and Positive Big (PB).

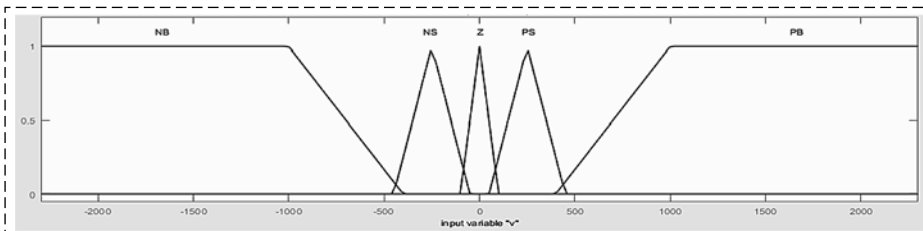


Fig. 9. Fuzzy membership function of difference between motor speed and reference

The second input of fuzzy logic controller is the sign of the variation of the pumping motor speed, it is classified into three linguistic variables: Negative (N), Zero (Z) and Positive (P). Here membership function is shown in Fig. 10.

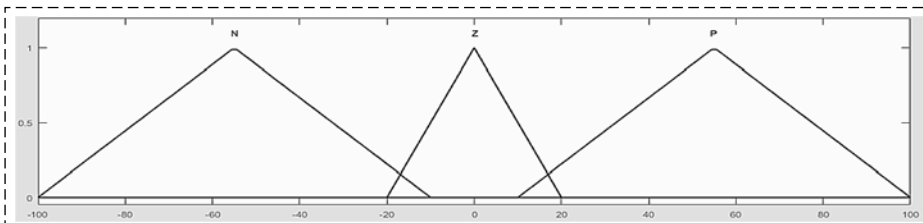


Fig. 10. Fuzzy membership function of motor speed variation

The duty cycle of DC buck boost converter is controlled by the fuzzy logic controller, it is classified into five linguistic variables: Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS) and Positive Big (PB). Fig. 11 shows here membership function.

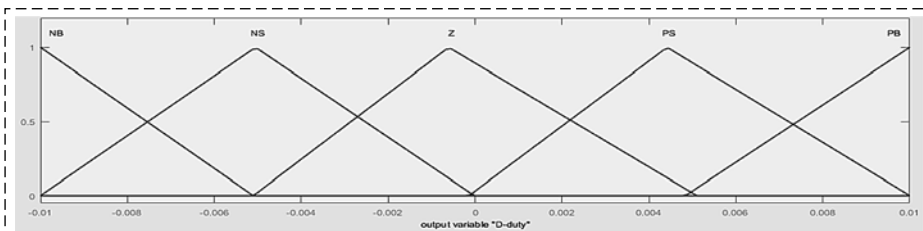


Fig. 11. Fuzzy membership function of duty cycle of DC buck boost converter

Table 2

Rules base of DC motor speed control by fuzzy logic controller

V	D-V	N	Z	P
NB	D-duty	PB	PB	P
NS		PB	P	P
Z		P	Z	N
PS		N	N	NB
PB		N	NB	NB

The rules base of fuzzy logic controller are shown in table 2.

### Result and discussion

As shown in Fig. 12, operation test of photovoltaic pumping system is carried out in two different sunlight levels 0 and 700 W/m<sup>2</sup>, to take into account the sudden appearance of clouds during the day.

Table 3 illustrates the parameter's values of the PV pumping system elements.

Fig. 13 shows the variation of the state of charge of super capacitor. Indeed, its discharge is carried out in real time with the appearance of the clouds, which validates the robustness of the fuzzy logic controller and its decision-making speed.

The state of charge of super capacitor reaches 80 % for 400 seconds, it is the result of the fast charging of this storage device. the duration of its discharge is longer, therefore it benefits from a sufficiently wide output for the DC pump power supply.

The start of DC pumping motor requires a stronger current, which is why the duty cycle, shown in

Table 3

Values of Parameters of PV Pumping System

PV panel	
P <sub>pv</sub>	110 W
I <sub>mpp</sub>	3.15 A
V <sub>mpp</sub>	35 V
I <sub>cc</sub>	3.45 A
V <sub>oc</sub>	43.5 V
Super Capacitor	
Capacitance	25F
Equivalent Series Resistance	0.069Ω
DC motor	
Output Power	200 W
Nominal Speed	2350 RPM
Nominal Voltage	40 V
Nominal Current	5 A
DC-DC Buck Boost Converter	
Inductance	0.432 H
Capacitance	7.7 mF

Fig. 14, increases up to 80 %, so that the speed, shown in Fig. 15, reaches its nominal value. Then the duty cycle decreases to 60 % because the speed keeps its stability around its nominal value.

The relation between the duty cycle and the pumping motor speed is explained in Fig. 16 (see the 2nd side of the cover) which illustrates a surface representation of base rule of fuzzy logic controller. Indeed the duty cycle increases when the difference between the measured speed and the reference is negative, and consequently decreases in the opposite case.

Hence it is clear that the fuzzy logic controller is able to follow all the conditions of PV pumping system to ensure an even more stable pumping rate.

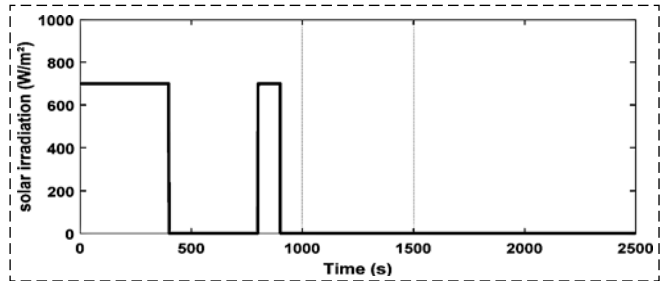


Fig. 12. Solar irradiation level

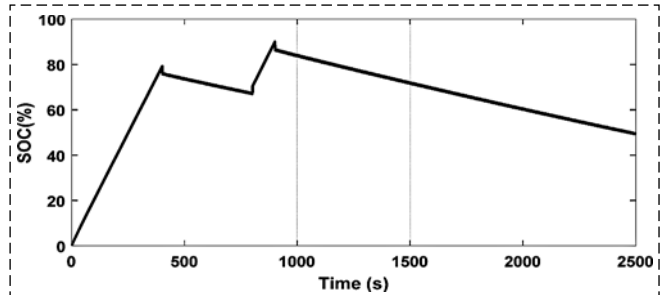


Fig. 13. State of charge of super capacitor

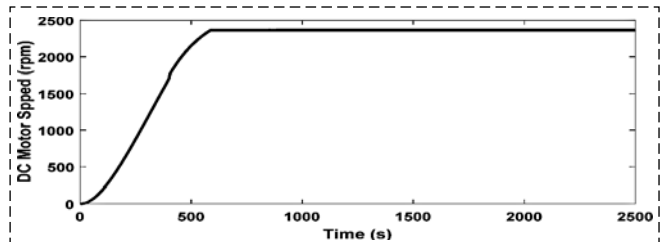


Fig. 14. Duty cycle of DC buck boost converter

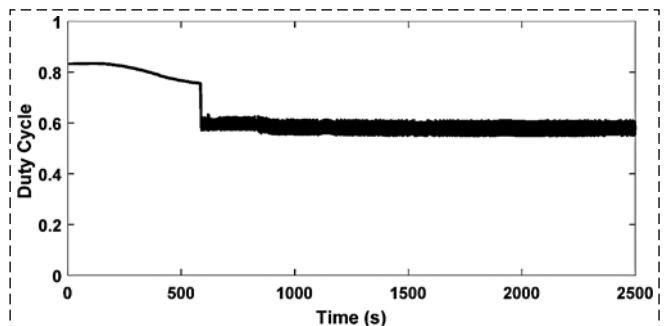


Fig. 15. DC motor Speed

## Conclusion

A study of energy storage performance and engine speed control is carried out in this paper to maintain the speed of the DC motor close at its nominal value despite the sunshine disturbances. The super capacitor installation has proven its rapid storage of large amounts of energy in short periods of sunshine and its ability to meet the need for a pumping motor to run at its nominal speed.

The stability of the pump motor speed is obtained following the implementation of a fuzzy logic controller which has a reflux, without the need for a mathematical model, as well as conditioning speed of the input and a better precision of decision-making.

## Reference

1. Kim S., No K. S., Chou P. H. Design and Performance Analysis of Supercapacitor Charging Circuits for Wireless Sensor Nodes, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, June 2011, vol. 1, iss. 2, pp. 1–7.
2. Jayalakshmi M., Balasubramanian K. Simple Capacitors to Supercapacitors — An Overview, *International Journal of Electrochemical Science*, October 2008, vol. 3, pp. 1196–1217.
3. Patil P. G., Venkateshwarlu K., Patel M. T. Application of Super Capacitor Energy Storage in Microgrid System, *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, March 2015, vol. 4, pp. 589–594.
4. Cultura A. B., Salameh Z. M. Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application, *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications*, 2015, pp. 876–882.
5. Zubieta L., Bonert R. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications, *IEEE-IAS'98*, 1998, pp. 1149–1154.
6. Ali A. Al Razzak Al Tahir. A Comparative Study Between PID Controller And Fuzzy Logic Controller For Speed Control of D.C Motors, *Journal of Babylon University/Pure and Applied Sciences*, 2010, vol. 18, pp. 1–16.
7. Farah N., Nizam Md. H. Comparative Study of PI and Fuzzy Logic Controllers Based Speed Control of Induction Motor Drive, *Journal of Modern Science & Engineering*, 2017, vol. 1, pp. 20–26.
8. Rajesh Kumar P., Sravan Kumar S. L. V. Comparative Study of PID Based VMC and Fuzzy Logic Controllers for Flyback Converter, *International Journal of Instrumentation, Control and Automation (IJICA)*, 2011, vol. 1, pp. 29–36.
9. Eddahmani Ch., Mahmoudi H. A comparative study of fuzzy logic controllers for wind turbine based on PMSG, *International Journal of Renewable Energy Research*, September 2018, vol. 8, pp. 1386–1392.
10. Morsli A., Tlemçani A., OuldCherchali N., Boucherit M. S. Comparative Study between Classical P-Q Method and Modern Fuzzy Controller Method to "Improve the Power Quality of an Electrical Network", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2015, vol. 9, pp. 1316–1322.
11. SafdarFasal T. K., Unnikrishnan L. A Comparative Study of Proportional Integral Controller and Fuzzy Logic Controller in Scalar Speed Control of Three Phase Induction Motor, *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, 2013, vol. 1, pp. 18–21.
12. Gowd B. P., Jayasree K., Hegde M. N. Comparison of Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Approaches for Crack Detection in a Beam Like Structure, *International Journal of Artificial Intelligence and Application*, January 2018, vol. 9, pp. 35–51.
13. Kumari N., Sunita Smita. Comparison of ANNs, Fuzzy Logic and NeuroFuzzy Integrated Approach for Diagnosis of Coronary Heart Disease: A Survey, *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, June 2013, vol. 2, pp. 216–224.
14. Chate K. V., Prado O. E., Rengifo C. F. Comparative Analysis between Fuzzy Logic Control, LQR Control with Kalman Filter and PID Control for a Two Wheeled Inverted Pendulum, *Advances in Automation and Robotics Research in Latin America*, 2017, vol. 13, pp. 144–156.
15. Chen C. H., Wang Ch. Ch., Wang Y. T., Wang P. T. Fuzzy Logic Controller Design for Intelligent Robots, *Mathematical Problems in Engineering*, VOL. 2017, pp. 1–12, September 2017.
16. Cherry A. S., Jones R. P. Fuzzy logic control of an automotive suspension system, *IEEE Proceedings — Control Theory and Application*, 1995s, vol. 142, pp. 149–160.
17. Adda F., Larbes C., Allek M., Loudini M. Design of an intelligent fuzzy logic controller for a nuclear research reactor, *Progress in Nuclear Energy*, 2005, vol. 46, pp. 328–347.
18. Patel A., Gupta Sh. K., Rehman Q., Verma M. K. Application of Fuzzy Logic in Biomedical Informatics, *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 2013, vol. 4, pp. 57–62.
19. Grover D. K. Simulations of Various Applications of Fuzzy Logic using the MATLAB, *International Journal of Computer Applications*, May 2016, vol. 141, pp. 39–45.
20. Zadeh L. A. Fuzzy Sets, *Information and control*, 1965, vol. 8, pp. 338–358.
21. Shi L., Crow M. L. Comparison of Ultracapacitor Electric Circuit Models, *IEEE Conference on Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1–6.
22. Zhang Y., Wei L., Shen X., Liang H. Study of Supercapacitor in the Application of Power Electronics, *Wseas Transactions on Circuits and Systems*, 2009, vol. 8, pp. 508–517.
23. Ben Fathallah M. A., Ben Othman A., Besbes M. Modeling a photovoltaic energy storage system based on super capacitor, simulation and evaluation of experimental performance, 2018, vol. 124, *Applied Physics A*, vol. 124, pp. 1–10.
24. Cultura A. B., Salameh Z. M. II. Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application, *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications*, 2015, pp. 876–882.
25. El Fadil H., Belhaj F. Z., Rachid A., Giri F., Ahmed-Ali T. Nonlinear Modeling and Observer for Supercapacitors in Electric Vehicle Applications, *International Federation of Automatic Control*, 2017, pp. 1898–1903.
26. Kurzweil P., Shamonin M. State-of-Charge Monitoring by Impedance Spectroscopy during Long-Term Self-Discharge of Supercapacitors and Lithium-Ion Batteries, *Journal of batteries*, 2018, pp. 1–13.
27. Ben Othman A., Ben Fathallah M. A., Besbes M. Robust Control of a Photovoltaic Pumping System with Super-Capacitor storage, P&O Algorithm and Pole Placement Technique, *Energy system Journal*, 2018, pp. 1–25.
28. Ben Othman A., Belkilani K., Besbes M. Global solar radiation on tilted surfaces in Tunisia: Measurement, estimation and gained energy assessments, *Energy Reports*, 2018, pp. 101–109.
29. Belkilani K., Ben Othman A., Besbes M. Assessment of global solar radiation to examine the best locations to install a PV system in Tunisia, *Applied Physics A*, 2018, pp. 124–122.
30. Belkilani K., Ben Othman A., Besbes M. Estimation and experimental evaluation of the shortfall of photovoltaic plants in Tunisia: case study of the use of titled surfaces, *Applied Physics A*, 2018, pp. 124–179.
31. Belkilani K., Ben Othman A., Besbes M. Estimation of Global and Direct Solar Radiation in Tunisia Based on Geostationary Satellite Imagery, *IEEE PES/IAS Power Africa*, 2018.
32. Ben Fathallah M. A., Ben Othman A., Besbes M. Study of Performance of Energy Storage and Control in Photovoltaic Pumping System, *International Conference of Problem of Mechanics and Control in Makhachkala*, Russian Federation, 2018.

**А. Б. Филимонов**, д-р техн. наук, проф., filimon\_ab@mail.ru,  
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва,  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
**Н. Б. Филимонов**, д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,  
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

## Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения

*Одним из актуальных направлений исследований в современной робототехнике является проблематика локальной навигации мобильных роботов (МР), обеспечивающей перемещение робота к цели с обходом препятствий в процессе движения. Процесс навигации включает в себя следующие этапы: составление карты внешней среды, локализация робота и планирование маршрута, ведущего к цели. К числу популярных методов локальной навигации роботов относится метод искусственных потенциальных полей (ПП). Суть метода ПП заключается в реализации движения МР в поле "информационных сил" с использованием сил "притяжения" к целевому положению и "отталкивания" от препятствий.*

*В работе рассматриваются вопросы локальной навигации и управления движением МР на основе метода ПП.*

*При использовании традиционных притягивающихся потенциальных полей структура виртуальных сил вблизи препятствия зависит от удаленности МР от цели, причем движение робота будет замедляться в конце маршрута, что неизбежно приведет к неоправданной задержке общего времени перемещения робота в целевое положение. Для устранения данного нежелательного эффекта авторами предложено использовать притягивающие потенциальные поля специального вида.*

*В методе ПП широко известна проблема локальных минимумов — потенциальных ям различной геометрической структуры, которые становятся ловушками для МР. Проведен анализ кинематических и динамических аспектов управления перемещением робота в рабочем пространстве. Авторами предлагаются новые методы ПП, позволяющие решать ключевые для управления МР проблемы "ловушек" (потенциальных ям) и обхода препятствий: метод двух карт потенциальных полей и метод "фарватера" на карте потенциальных полей.*

*Обсуждаются методы "жука", решающие задачу обхода препятствий в условиях отсутствия априорной информации о рабочем пространстве МР. Предложен модифицированный метод "жука", имеющий ряд преимуществ по сравнению с классическими методами.*

**Ключевые слова:** *мобильные роботы, локальная навигация, планирование движений, искусственные потенциальные поля, проблема локальных минимумов, задача обхода препятствий*

*"Поле — это структура, в которой совершается поведение"  
"Поскольку поведение является "полевым", то действия  
управляются силами поля"*

К. Левин (K. Z. Lewin), Теория поля, 1936 г.

### Введение

Одной из ключевых проблем мобильной робототехники является локальная навигация автономных мобильных роботов (МР) [1, 2], обеспечивающая их перемещение в неизвестной среде при выполнении сложных задач в различных областях науки и техники, включая военные и поисково-спасательные операции.

Локальная навигация занимается решением следующей группы задач: определение координат робота по отношению к некоторой (обычно стартовой) точке, локализация его в рабочем пространстве, планирование его маршрута перемещения к цели с предотвращением столкно-

вений с препятствиями (обходом препятствий) в процессе движения. Следует отметить, что планирование здесь задает лишь небольшой, локальный отрезок траектории, в конечной точке которого выбирается дальнейшая траектория.

Одними из наиболее популярных и широко распространенных методов локальной навигации МР в детерминированной (заранее определенной) статической среде являются *методы потенциального наведения*, основанные на использовании виртуальных (мнимых) сил притяжения к цели и отталкивания от препятствий, присущих потенциальным векторным полям. Общая идея данных методов состоит в движении МР вдоль линий векторного поля,

потенциальная функция которого отражает цель и конфигурацию препятствий. При этом силовые поля формально различаются по виду (однородное, перпендикулярное, тангенциальное, случайное, притягивающее, отталкивающее, комбинация притягивающего и отталкивающего и др.) и по типу потенциальной функции (виртуальное силовое поле, ньютоновское потенциальное поле, супербиквадратное потенциальное поле, гармоническое векторное поле и др.).

Среди методов потенциального наведения самым простым, имеющим низкую вычислительную сложность и высокую эффективность реализации, является метод потенциальных полей (ПП), который в литературе имеет следующие названия: метод "потенциалов" (potential field approach), метод "искусственных потенциальных полей" (artificial potential field), метод "полей виртуальных сил" (virtual force field), метод "гистограммы векторных сил" (vector field histogram) и др. Физическим аналогом искусственных ПП являются электрические поля с некоторым положительным зарядом для цели и отрицательным зарядом для препятствий.

Метод ПП в задачах навигации МР впервые был предложен А. К. Платоновым в 1970 г. [3]. За рубежом пионерскими являются работы Дж. Эндрюса (J. R. Andrews) и Н. Хогана (N. Hogan) [4], Р. Брукса (R. A. Brooks) [5], О. Хатиба (O. Khatib) [6]. Достаточно полное представление о современном состоянии метода и особенностях его применения в робототехнике дают работы [1, 2, 7–18]. Следует заметить, что сам архетип основной идеи метода движения в поле "информационных" (виртуальных) сил восходит к "теории поля" одного из виднейших гештальтпсихологов К. Левина (K. Z. Lewin), разработанной в 30–40-х годах прошлого столетия.

В настоящей статье, развивающей работы авторов [19–21], рассматриваются вопросы управления движением МР с использованием локальной навигации на основе метода ПП.

### Основные положения метода потенциальных полей

Суть метода ПП заключается в реализации движения МР в поле "информационных сил" с использованием присущих потенциальным полям мнимых сил "притяжения" к целевой точке и "отталкивания" от препятствий.

Рабочим пространством МР, обозначаемым  $W$ , будем называть окружающее пространство, в котором он функционирует. Различают задачи планирования маршрута и планирования движений МР.

*Маршрут* — это непрерывная кривая в рабочем пространстве. Параметризованный временем маршрут называется траекторией, посредством ее дифференцирования можно вычислять скорости и ускорения МР, а ее нахождение называется *планированием* траектории или планированием движения.

Полагаем, что МР располагает картой окружающей среды и снабжен навигационной системой, позволяющей достаточно точно определять его вектор координат  $\mathbf{q}$ . Функциональная структура робота содержит модуль генерации потенциального поля  $U(\mathbf{q})$ , которое включается в его информационную базу и применяется в алгоритмах управления для вычисления виртуальных сил, обеспечивающих притягивание робота к цели или его отталкивание от заранее известных препятствий. При появлении новых препятствий на пути движения робота поле виртуальных сил оперативно обновляется.

Ограничимся рассмотрением плоской задачи:  $W \subseteq \mathbf{R}^2$ . МР рассматривается как материальная точка, движущаяся в потенциальном поле  $U(\mathbf{q})$ , образуемом суперпозицией двух полей — притягивающего (attracting), создаваемого целью, и отталкивающего (repelling), создаваемого препятствиями:

$$U(\mathbf{q}) = U_{att}(\mathbf{q}) + U_{rep}(\mathbf{q}). \quad (1)$$

Далее полагаем поле  $U(\mathbf{q})$  дифференцируемым. Потенциальная сила в позиции  $\mathbf{q} = (x, y)$  находится как антиградиент функции  $U(\mathbf{q})$ :

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}) = -\nabla U(\mathbf{q}),$$

где

$$\nabla U(\mathbf{q}) = \text{col} \left( \frac{\partial U(\mathbf{q})}{\partial x}, \frac{\partial U(\mathbf{q})}{\partial y} \right).$$

В соответствии с (1) создаваемую полем  $U(\mathbf{q})$  виртуальную силу  $\mathbf{F}(\mathbf{q})$  также можно разложить на две составляющие — притягивающую и отталкивающую:

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{q}), \quad (2)$$

где

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) = -\nabla U_{att}(\mathbf{q}), \quad \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{q}) = -\nabla U_{rep}(\mathbf{q}).$$

Равнодействующая виртуальная сила (2) как раз и используется для управления движением МР: она формирует итоговый вектор движения робота, направляя его перемещение к цели и предотвращая столкновения с препятствиями. Существуют три способа такого ее применения [14]:

- управляющий вход  $\mathbf{u}$  робота формируется согласно закону

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}(\mathbf{q});$$

- в схеме *кинематического* управления силовое поле задает желаемую скорость движения робота:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}(\mathbf{q}); \quad (3)$$

- в схеме *динамического* управления робот рассматривается как массивная точка, на которую действует данная сила:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}(\mathbf{q}).$$

Реализация управляемого движения МР с использованием виртуальных ПП требует малых временных и вычислительных затрат, что крайне важно для решения задач управления МР в режиме реального времени.

### Проблема построения потенциальных полей

**Притягивающий потенциал.** В качестве притягивающего потенциала обычно принимают параболическую функцию:

$$U_{att}(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} k_a [d(\mathbf{q})]^2, \quad (4)$$

где  $k_a > 0$  — константа;  $d(\mathbf{q})$  — евклидово расстояние МР до цели, которая считается расположенной в точке  $\mathbf{q}_{goal}$ :

$$d(\mathbf{q}) = \|\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}\|,$$

где  $\|\cdot\|$  — евклидова норма вектора.

**Отталкивающий потенциал.** Отталкивающий потенциал должен быть большим вблизи препятствия и не должен влиять на движение МР вдали от него. Весьма распространен сле-

дующий способ задания отталкивающих потенциалов:

$$U_{rep}(\mathbf{q}) = \begin{cases} -\frac{1}{2} k_r \left( \frac{1}{\rho(\mathbf{q})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho(\mathbf{q}) \leq \rho_0; \\ 0, & \rho(\mathbf{q}) > \rho_0, \end{cases}$$

где  $k_r > 0$ ,  $\rho(\mathbf{q})$  — расстояние до препятствия;  $\rho_0$  — ширина зоны действия сил в потенциальном поле, именуемая также радиусом безопасности препятствия. Таким образом, данное поле создает "потенциальный барьер" вокруг препятствия ширины  $\rho_0$ , потенциал в котором резко возрастает при приближении к препятствию.

Следует отметить, что препятствия, как правило, описываются совокупностью "примитивов", таких как точка, прямая, эллипсоид, параллелепипед, конус, цилиндр и т. п. Чаще всего они представляются в виде окружностей (модель "сферического мира"), либо в виде многоугольников (модель "звездного мира").

### Выбор структуры потенциального поля.

Поле (4) порождает потенциальные силы

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) = -k_a (\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}),$$

причем

$$\|\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q})\| = k_a \|\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}\|.$$

Отметим важную характеристику такого решения: формируемая сила притяжения существенно изменяется в процессе перемещения МР, и при приближении к цели она стремится к нулю, что приводит к двум нежелательным эффектам:

- 1) структура виртуальных сил (2) вблизи препятствия зависит от удаленности робота от цели;
- 2) движение робота будет замедляться в конце маршрута, что неизбежно приведет к неоправданной задержке общего времени его перемещения в целевое положение.

Для устранения данных нежелательных эффектов авторами предложено использовать притягивающие потенциальные поля другого вида [19–21]:

$$U_{att}(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} k_a d(\mathbf{q}). \quad (5)$$

В этом случае получаем притягивающую силу

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) = -k_a \frac{\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}}{d(\mathbf{q})},$$

абсолютная величина которой оказывается постоянной:

$$\|\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q})\| = k_a.$$

Весьма эффективным может оказаться совместное использование потенциальных полей вида (4) и (5):

$$U_{att}(\mathbf{q}) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_a d(\mathbf{q})^2, & d(\mathbf{q}) \leq d_0; \\ \frac{1}{2} k_a d(\mathbf{q}), & d(\mathbf{q}) > d_0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $d_0$  — некоторое малое расстояние до цели.

### Проблема "ловушек" и обхода препятствий

Локальность метода ПП часто делает его "близоруким" и неэффективным для достижения сложных целей. Дело в том, что имеется вероятность попадания МР в локальные минимумы — потенциальные ямы различной геометрической структуры, которые становятся для робота ловушками.

В кинематической схеме управления робот движется в направлении антиградиента поля, т. е. следует траектории градиентного спуска:

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = -\nabla U(\mathbf{q}(t)).$$

В точке локального минимума  $\mathbf{q}^*$  градиент потенциальной функции обнуляется:

$$\nabla U(\mathbf{q}^*) = 0.$$

После попадания в точку минимума  $\mathbf{q}^*$  робот остановится.

В динамической схеме управления имеем другую картину: набравший скорость робот, благодаря фактору инерционности, будет преодолевать мелкие потенциальные ямы. Для анализа данных схем уместно обратиться к опыту численного решения задач безусловной оптимизации невыпуклых целевых функций. В теории оптимизации разработаны различные методы поиска глобального минимума для таких функций, включая метод "тяжелого шарика", физическим аналогом которого является процесс скатывания шарика по наклонной поверхности. Если шарик тяжелый, то он будет проскакивать мелкие впадины по инер-

ции. Чем больше масса шарика, тем глубже могут быть впадины, которые он проскакивает при движении. Схема динамического управления роботом, очевидно, идентична данному методу, хотя и имеет принципиальное отличие — нам априори известна точка глобального минимума потенциального поля:  $\mathbf{q} = \mathbf{q}_{goal}$ . Также надо учитывать, что в реальных условиях функционирования робот испытывает действие сил сопротивления движению со стороны внешней среды.

Однако динамические схемы управления не гарантируют преодоление роботом глубоких потенциальных ям в процессе движения. Отметим характер траекторий движения робота, захваченных потенциальной ямой: в окрестности локального минимума он будет совершать возвратно-поступательное, либо циклическое движение по замкнутой кривой ("топтанье на месте", "биение траектории") и, следовательно, не сможет продолжить движение к цели.

Кстати, интересен исторический аспект развития метода ПП. В первых работах в этой области исследований траектория робота вычислялась в результате интегрирования дифференциальных уравнений движения второго порядка. Однако в ходе исследований было установлено, что фактор инерционности может приводить к неприемлемому виду траекторий вблизи протяженных препятствий — в результате многократных отталкиваний робота от препятствий его траектория становится чересчур "изрезанной". Вследствие этого в дальнейшем внимание исследователей переключилось на модели движения первого порядка.

Итак, проблема возникновения ловушек в потенциальных полях не может полностью решаться посредством применения простых моделей движения первого или второго порядка и указывает на необходимость усложнения алгоритмов управления МР. В связи с этим актуальными являются следующие две задачи:

- 1) диагностирование захвата траектории движения робота потенциальной ямой;
- 2) вывод робота из потенциальной ямы.

В случае применения схем кинематического управления ситуацию попадания МР в потенциальную яму можно диагностировать посредством оперативного контроля его траекторной скорости — ей отвечает случай, когда в процессе движения скорость оказалась ниже некоторого порогового уровня. В схемах динамического управления ситуация попадания в яму



диагностируется посредством обнаружения факта локализации траектории в некоторой ограниченной зоне рабочего пространства — для этого необходимо накапливать и обрабатывать данные наблюдения в течение некоторого скользящего интервала времени.

Авторами предлагаются два новых метода решения задач локальной навигации МР: метод двух карт потенциальных полей и метод "фарватера" на карте потенциальных полей, которые могут быть полезными для мобильной робототехники.

### Метод двух карт потенциальных полей

В основу данного метода положена идея *раздельного* использования в алгоритмах управления двух карт потенциальных полей —  $U(\mathbf{q})$  и  $U_{rep}(\mathbf{q})$ . Силовые линии первого и эквипотенциальные линии (изолинии) второго рассматриваются как аналоги навигационных изолиний на навигационных картах в судовождении, к примеру, магнитных меридианов и параллелей Земли.

Силовые линии поля  $U(\mathbf{q})$  служат для прокладки маршрута движения МР. Изолинии отталкивающего поля описываются уравнением

$$U_{rep}(\mathbf{q}) = C, \quad C = \text{const} > 0.$$

Карта изолиний функции  $U_{rep}(\mathbf{q})$  позволяет решать две задачи. Во-первых, контролировать ситуации сближения робота с препятствиями. Во-вторых, изолинии поля представляют информацию о геометрии препятствия и используются для построения пути обхода данного препятствия — робот при движении направляется вдоль изолинии и, следовательно, его движение подчиняется уравнению

$$\langle \dot{\mathbf{q}}, \nabla U_{rep}(\mathbf{q}) \rangle = 0,$$

где угловые скобки  $\langle, \rangle$  обозначают скалярное произведение векторов.

### Метод "фарватера" на карте потенциальных полей

Попытки построения стратегий управления МР, позволяющих обходить препятствия, преодолевать ловушки или выбираться из них,

наталкиваются на затруднения принципиального характера и, по-видимому, малопродуктивны. Тем не менее концепция ПП может быть полезна для решения задач навигации и маршрутизации МР.

Создадим силовое поле посредством суперпозиции потенциальных полей — создаваемого целью притягивающего поля и создаваемых препятствиями отталкивающих полей. Поскольку последние действуют локально, то в результирующем поле имеются силовые линии, обходящие препятствия и потенциальные ямы.

*Силовой линией* для векторного поля  $\mathbf{F}(\mathbf{q})$  называется кривая в рабочем пространстве  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(s)$ , где  $s$  — скалярный параметр, касательная к которой во всех точках кривой совпадает с вектором напряженности поля:

$$\frac{d\mathbf{r}}{ds} = \mathbf{F}(\mathbf{r}(s)).$$

Среди семейства всех силовых линий выберем линию  $\mathbf{r}^*(s)$ , которая отвечает двум требованиям. Во-первых, она заканчивается в целевой точке, т. е. вектор напряженности поля во всех точках линии отличен от нуля:  $\|\mathbf{F}(\mathbf{r}(s))\| > 0$ . Во-вторых, она является ближайшей к начальному положению МР  $\mathbf{q}(0)$ .

Силовая линия  $\mathbf{r}^*(s)$  принимается в качестве заданного маршрута движения МР. Предлагаемый метод управления движением МР заключается в перемещении к данной силовой линии (возможно по наикратчайшему пути) и дальнейшем движении вдоль нее под действием силового поля. Данное решение задачи локальной навигации МР назовем *методом фарватера* на карте потенциальных полей по аналогии с понятием фарватера в морской навигации.

### Модифицированный метод "жука"

Простейший способ обхода МР препятствий лежит в основе семейства методов "жука" (BUG-методы нахождения пути в движении), согласно которым робот движется по прямому пути к цели, огибая встречные препятствия и продолжая движение в том же направлении. Классические методы "жука" Bug1 и Bug2, предложенные в работе [22], получили развитие в различных модификациях [23]: DistBug, OneBug, DHBug, MRBug, LeaveBug, TangentBug, CautionsBug и др.

Согласно методу Bug1 МР следует по границе препятствия и непрерывно измеряет расстояние от своего текущего положения до цели. Совершив полный оборот вокруг препятствия, он возвращается к точке, имеющей минимальное расстояние до цели, и далее совершает движение в направлении к целевой точке. Основным недостатком метода Bug1 является необходимость полного обхода препятствия. В методе Bug2 предполагается частичный обход препятствия: при обнаружении препятствия МР также, как и в алгоритме Bug1, двигается вдоль границы препятствия, но при пересечении линии первоначального курса изменяет траекторию и далее двигается по ней к цели.

Методы Bug имеют следующие ограничения: препятствия должны находиться на ненулевом расстоянии друг от друга (не соприкасаться); робот рассматривается как материальная точка, которая может двигаться между препятствиями независимо от ширины прохода между ними; границы препятствий должны быть такими замкнутыми кривыми, чтобы любая прямая, проходящая через точки кривой и точку цели, пересекала ее ограниченное число раз.

В основу предлагаемого авторами метода обхода препятствий МР положено следующее правило: в свободном пространстве МР движется к цели по прямой линии с исключением эффекта самопересечения его траектории движения, т. е. процесса закливания движения.

Линией визирования будем называть луч, соединяющий робот с целью, а точку траектории, в которой он изменяет направление движения, будем называть *точкой поворота*.

Предлагаемая схема обхода препятствий основана на следующих правилах:

1. Движение робота в свободном пространстве осуществляется по линии визирования цели.

2. Если робот подходит к препятствию в точке поворота  $q^+$ , то он изменяет направление движения и двигается вдоль границы препятствия либо по часовой, либо против часовой стрелки.

3. Движение робота вдоль границы продолжается до момента достижения точки отхода  $q^-$ , в которой линия визирования цели направлена в свободное пространство и движение по ней гарантированно не пересекает пройденный путь. Такая точка именуется далее *разрешенной* точкой отхода.

4. Далее робот движется прямолинейно по направлению к цели.

Ключевым в данной схеме движения МР является способ определения точки отхода  $q^-$ . Здесь возможны два случая. В первом линия визирования не пересекает пройденный путь и данная точка является безусловно разрешенной. Во втором случае линия визирования пересекает пройденный путь, но при этом выполняется дополнительное условие, которое предлагается называть *правилом знаков*.

Для учета ориентации траектории движения МР введем следующие обозначения: локальные области слева и справа от траектории будем обозначать соответственно знаками "—" и "+". Без ограничения общности будем считать, что робот обходит препятствие против часовой стрелки, так что препятствие находится слева по ходу движения. В результате при движении по линии визирования робот может попасть на пройденный участок траектории лишь с ее стороны "+", так что движение по линии визирования разрешено, если она пересекает пройденный участок траектории только со стороны "—".

Данное правило поясняют рис. 1 и 2. Здесь левая сторона траектории представлена прилегающей пунктирной линией (соответствует знаку "—"). Стартовая позиция МР и цель обозначены соответственно  $S$  и  $G$ .  $PG$  — линия визирования цели.

Рис. 1 иллюстрирует ситуацию, когда движение по линии визирования запрещено, поскольку оно приведет к самопересечению траектории МР. Действительно, точка  $Q$  лежит на пройденном пути и попадание в нее означает закливание движения МР. Напротив, в ситуации на рис. 2 сформулированное правило знаков разрешает движение по линии визирования.

Рис. 3 иллюстрирует процесс обхода препятствия согласно предложенному алгоритму. МР, двигаясь из положения  $S$  в направлении

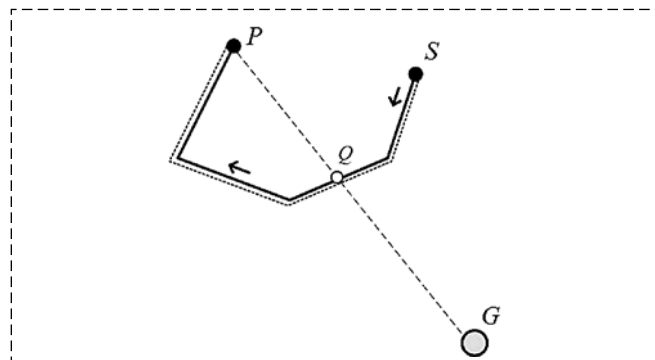


Рис. 1  
Fig. 1

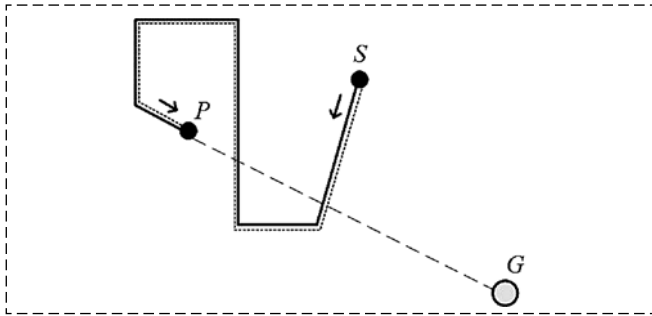


Рис. 2  
Fig. 2

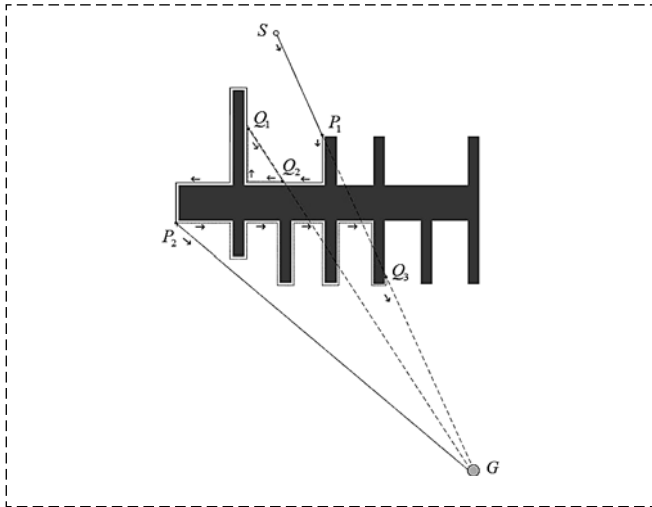


Рис. 3  
Fig. 3

к цели  $G$ , подходит к препятствию в точке  $P_1$ . Далее он движется вдоль края препятствия до разрешенной точки  $P_2$ . К примеру, точка  $Q_1$  не может быть точкой отхода от препятствия, поскольку дальнейшее движение приведет в точку  $Q_2$  пройденного пути.

На том же рисунке показана траектория движения МР согласно классическому алгоритму "жука": робот доходит до точки  $Q_3$  и далее движется по исходной линии визирования  $SG$ . Таким образом, предложенный алгоритм обхода препятствия может давать существенный выигрыш по критерию длительности движения к цели.

Важно отметить, что предложенный метод предполагает запоминание пройденного участка пути в процессе движения.

В общем случае, когда известна карта среды, но на пути движения МР возможны малоразмерные временные препятствия, можно объединить два предложенных метода: движение согласно методу фарватера и обход препятствия модифицированным методом "жука".

## Заключение

Рассмотрены вопросы применения метода ПП в задачах локальной навигации МР. Исследованы вопросы построения притягивающих потенциальных полей. Затронута проблема локальных минимумов. Проведен анализ кинематических и динамических аспектов управления перемещением робота в рабочем пространстве. Предложены новые методы локальной навигации МР, позволяющие обходить препятствия при движении робота к цели: метод двух карт, метод "фарватера" на карте потенциальных полей и модифицированный метод "жука".

В предложенных методах окружающая среда рассматривается как статическая, т. е. препятствия и целевая точка неподвижны. Однако в реальных условиях окружающая среда часто является динамической, препятствия и целевая точка могут изменяться. Предложенные методы ПП вполне могут быть преобразованы для их использования в динамической окружающей среде. Для этого достаточно использовать относительные скорость и положение робота по отношению к целевой точке в притягивающей потенциальной функции. При этом сам робот целесообразно представлять не точкой, а отрезком или прямоугольником, что позволит рассчитывать не только результирующую силу, действующую на робот, но и момент сил, т. е. управлять его ориентацией.

## Список литературы

1. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. 2018. № 1. С. 15–58.
2. Zafar M. N., Montana J. C. Methodology for Path Planning and Optimization of Mobile Robots: A Review // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 133. P. 141–152.
3. Платонов А. К., Карпов И. И., Кирильченко А. А. Метод потенциалов в задаче прокладки трассы // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР. М. 1974. № 124. 27 с.
4. Andrews J. R., Hogan N. Impedance Control as a Framework for Implementing Obstacle Avoidance in a Manipulator. Control of Manufacturing Process and Robotic Systems, Eds. Hardt D. E. and Book W. ASME. Boston. 1983. P. 243–251.
5. Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots // The International Journal of Robotics Research. 1985. Vol. 5 (1). P. 500–505.
6. Brooks R. A. A Robust Layered Control System for Mobile Robot and Stereo Vision for Mobile Robots // IEEE Journal of Robotics and Automation. 1986. Vol. 2, No. 1. P. 14–23.
7. Al-Sultan K. S., Aliyu M. D. A New Potential Field based Algorithm for Path Planning // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 1996. Vol. 17. P. 265–282.

8. Ge S. S., Cui Y. J. New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2000. Vol. 16. № 5. P. 615—620.
9. Платонов А. К., Кирильченко А. А., Колганов М. А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. М. 2001. № 40. 32 с.
10. Howard A., Mataric M. J., Sukhatme G. S. Mobile Sensor Network Deployment Using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage // Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems. Fukuoka, Japan, June 2002. P. 113—126.
11. Pozna C., Precup R.-E., Koczy L. T., Ballagi A. Potential Field-Based Approach for Obstacle Avoidance Trajectories // The IPSI BgD Transactions on Internet Research. 2002. Vol. 8, N. 2. P. 40—45.
12. Cosio F. A., Castaineda M. A. P. Autonomous Robot Navigation using Adaptive Potential Fields // Mathematical and Computer Modelling. 2004. Vol. 40. P. 1141—1156.
13. Fu-guang D., Peng J., Xin-qian B., Hong-jian W. AUV Local Path Planning based on Virtual Potential Field // In: 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2005. Vol. 4. P. 1711—1716.
14. Padilla Castaneda M. A., Savage J., Hernandez A., Arambula Cosío F. Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields. Motion Planning. Xing-Jian Jing (Ed.). Chapter 1. InTech, 2008. 598 p.
15. Чепиженко В. И. Анализ использования потенциальных полевых методов для решения навигационных и конфликтных задач // Кибернетика и вычислительная техника. 2012. Вып. 167. С. 15—24.
16. Li F., Tan Y., Wang Y., Ge G. Mobile Robots Path Planning Based on Evolutionary Artificial Potential Fields Approach // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. 2013. P. 1314—1317.
17. Dumitru S. A., Vladareanu L., Yan T. H., Qi Ch. K. Mobile Robot Navigation Techniques Using Potential Field Method in Unknown Environments // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 656. P. 388—394.
18. Белоглазов Д. А., Гайдук А. Р., Косенко Е. Ю. и др. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В. Х. Пшихопова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 300 с.
19. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Методология искусственных потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника — 2017. Матер. III Всероссийской научно-технической конференции. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 157—160.
20. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Некоторые аспекты применения метода потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XIX Международной конференции. Самара: ООО "Офорт", 2017. С. 242—247.
21. Filimonov A. B., Filimonov N. B. The Peculiarities of Application of the Potential Fields Method for the Problems of Local Navigation of Mobile Robots // Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Scientifically Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2018. 2018. V. 1, Part 6. P. 208—211.
22. Lumelsky V., Stepanov A. Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automaton Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape // Algorithmica. 1987. Vol. 2, N. 1-4. P. 403—430.
23. Ng J., Brauni Th. Performance Comparison of Bug Navigation Algorithms // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2007. Vol. 50, Iss. 1. P. 73—84.

## Issues of Motion Control of Mobile Robots Based on the Potential Guidance Method

A. B. Filimonov, Dr. Sci. Tech., filimon\_ab@mail.ru,

MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation,

N. B. Filimonov, nbfilimonov@mail.ru,

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

*Corresponding author: Filimonov Nikolay B., Professor, Dr. Sci. Tech.,  
Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation*

*Accepted on July 12, 2019*

### Abstract

*One of the topical areas of research in modern robotics is the problem of local navigation of mobile robots (MR), which ensures the movement of the robot to the target with the bypass of obstacles in the process of movement. The navigation process includes the following steps: mapping the environment, localization of the robot and planning the route leading to the goal. Among the popular methods of local navigation of robots is the method of artificial potential fields (PF). The essence of the PF method is to implement the movement of the MR in the field of "information forces" using the forces of "attraction" to the target position and the forces of "repulsion" from obstacles.*

*This article addresses the issues of local navigation and motion control of the MR based on the method of PF.*

*When using traditional attracting potential forces, the structure of virtual forces near the obstacle depends on the distance of the MR from the target, and the robot movement will slow down at the end of the route, which will inevitably lead to an unjustified tightening of the total time of moving the robot to the target position. To eliminate this undesirable effect, the authors propose to use attracting potential fields of special type.*

*The authors propose new methods of PF allowing to solve the key problems for the control of MR — "traps" (potential pits) and bypass obstacles: the method of two maps of potential fields and the method of "fairway" on the map of potential fields. The methods of "beetle" for solving the problem of bypass obstacles in the condition of the absence of a priori information about the working space of MR are discussed. A modified method of "beetle" having a number of advantages in comparison with classical methods is proposed.*

**Keywords:** *mobile robots, local navigation, planning of movements, artificial potential fields, the problem of local minima, the problem of getting around obstacles*

For citation:

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Issues of Motion Control of Mobile Robots Based on the Potential Guidance Method, *Mechatronics, Automatization, Control*, 2019, vol. 20, no. 11, pp. 677—685.

DOI: 10.17587/mau.20.677-685

### References

1. Liu W. Path planning methods in an environment with obstacles (a review), *Mathematics & Mathematical modelling*, 2018, no. 1, pp. 15—58 (in Russian).

2. Zafar M. N., Montana J. C. Methodology for Path Planning and Optimization of Mobile Robots: A Review, *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 133, pp. 141–152.
3. Platonov A. K., Karpov I. I., Kirilchenko A. A. The method of potentials in the problem of track laying, *Preprint of the Institute of applied mathematics of the USSR Academy of Sciences*, Moscow, 1974, no. 124, 27 p. (in Russian).
4. Andrews J. R., Hogan N. Impedance Control as a Framework for Implementing Obstacle Avoidance in a Manipulator. Control of Manufacturing Process and Robotic Systems, Eds. Hardt D. E. and Book W, Boston, ASME, 1983, pp. 243–251.
5. Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *The International Journal of Robotics Research*, 1985, vol. 5 (1), pp. 500–505.
6. Brooks R. A. A Robust Layered Control System for Mobile Roboton and Stereo Vision for Mobile Robots, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1986, vol. 2, no. 1, pp. 14–23.
7. Al-Sultan K. S., Aliyu M. D. A New Potential Field based Algorithm for Path Planning, *J. Intell. Robot. Syst.*, 1996, vol. 17, pp. 265–282.
8. Ge S. S., Cui Y. J. New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, vol. 16, no. 5, pp. 615–620.
9. Platonov A. K., Kiril'chenko A. A., Kologanov M. A. The Potential Field Approach in the Path Finding Problem: History and Perspectives, *Preprint, Inst. Appl. Math., the Russian Academy of Science*, 2001, no. 40, 32 p. (in Russian).
10. Howard A., Mataric M. J., Sukhatme G. S. Mobile Sensor Network Deployment Using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems*, Fukuoka, Japan, June 2002, pp. 113–126.
11. Pozna C., Precup R.-E., Koczy L. T., Ballagi A. Potential Field-Based Approach for Obstacle Avoidance Trajectories, *The IPSI BgD Transactions on Internet Research*, 2002, vol. 8, no. 2, pp. 40–45.
12. Cosio F. A., Castaineda M. A. P. Autonomous Robot Navigation using Adaptive Potential Fields, *Mathematical and Computer Modelling*, 2004, vol. 40, pp. 1141–1156.
13. Fu-guang D., Peng J., Xin-qian B., Hong-jian W. AUV Local Path Planning based on Virtual Potential Field, *2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2005, vol. 4, pp. 1711–1716.
14. Padilla Castaneda M. A., Savage J., Hernandez A., Arambula Cosío F. Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields. Motion Planning. Xing-Jian Jing (Ed.). Chapter 1, InTech, 2008, 598 p.
15. Chepizhenko V. I. The Analysis of Use of the Potential Field Methods for the Solution of Navigation and Confluent Problems, *Cybernetics and Computerized Technology*, 2012, no. 1, pp. 15–24 (in Russian).
16. Li F., Tan Y., Wang Y., Ge G. Mobile Robots Path Planning Based on Evolutionary Artificial Potential Fields Approach, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, 2013, pp. 1314–1317.
17. Dumitru S. A., Vladareanu L., Yan T. H., Qi Ch. K. Mobile Robot Navigation Techniques Using Potential Field Method in Unknown Environments, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 656, pp. 388–394.
18. Beloglazov D. A., Gajduk A. R., Kosemko E. Iu. etc. The Group Control by the Moving Objects in Indefinite Mediums. By edit. V. Kh. Pshikhopov, Moscow, PHYSMATLIT, 2015, 305 p. (in Russian).
19. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Methodology of artificial potential fields in the problems of local navigation of mobile robots. Intellectual systems, control and mechatronics, *The materials of the third All-Russian conference of the young scientist, post-graduates and students*, Sevastopol, Publishing house of Sev.SU, 2017, pp. 157–160 (in Russian).
20. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Some aspects of use of the potential fields method in the problems of local navigation of mobile robots. Control problems and simulation in complex systems, *The papers of XIX International conference. Samara. Sam SC RAS*, 2017, pp. 242–247 (in Russian).
21. Filimonov A. B., Filimonov N. B. The Peculiarities of Application of the Potential Fields Method for the Problems of Local Navigation of Mobile Robots, *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Scientifically Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2018*, 2018, vol. 1, part 6, pp. 208–211.
22. Lumelsky V., Stepanov A. Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automaton Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape, *Algorithmica*, 1987, vol. 2, no. 1–4, pp. 403–430.
23. Ng J., Braunl Th. Performance Comparison of Bug Navigation Algorithms, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2007, vol. 50, iss. 1, pp. 73–84.



25—27 мая 2020 г. в Санкт-Петербурге  
на базе ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор" состоится

## XVII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам

### Тематика конференции

- инерциальные датчики, системы навигации и ориентации;
- интегрированные системы навигации и управления движением;
- глобальные навигационные спутниковые системы;
- средства гравиметрической поддержки навигации.

### В рамках каждого направления рассматриваются:

- схемы построения и конструктивные особенности;
- методы и алгоритмы;
- особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные);
- испытания и метрология.

### Контактная информация:

Тел.: + 7 (812) 499 82 10 + 7 (812) 499 81 57  
Факс: + 7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eplib.ru

Инь Шуай, аспирант, shuai.yin@yandex.ru, А. С. Ющенко, д-р техн. наук, проф., yusch@bmstu.ru, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

## Диалоговая система управления роботом на базе теории конечных автоматов<sup>1</sup>

Рассматривается система речевого диалогового управления манипуляционными роботами. Проведен анализ основных методов автоматического распознавания речи, понимания речи, управления диалогом, синтеза голосовых ответов в диалоговых системах. Рассмотрены три типа управления диалогом: "инициатива системы", "инициатива пользователя" и "комбинированная инициатива". Предложена система объектно-ориентированного диалогового управления роботом на основе теории конечных автоматов состояния с использованием глубокой нейронной сети. Основное отличие предложенной системы заключается в предварительном выполнении диалога, в процессе которого робот может выполнять движения, направленные на получение дополнительной информации. После этого робот выполняет поставленную задачу в автоматическом режиме. Такой способ построения диалогового управления роботом позволяет автоматически корректировать результат распознавания речи и соответствующих действий робота и выполнять диалоговое управление в темпе, близком к темпу работы хирурга с человеком-оператором.

Управление роботом возможно в двух режимах. Специальный режим дает возможность непосредственно управлять движениями манипулятора голосовыми командами пользователей. Общий режим расширяет возможности оператора, позволяя ему получить дополнительную информацию в реальном времени.

Необходимость коррекции результата распознавания речи и выполнения действий робота может быть вызвана особенностями речи пользователя, помехами в информационной системе или некорректными голосовыми командами.

Процесс коррекции состоит из трех этапов. На первом этапе выполняется непрерывное преобразование речи в текст в реальном масштабе времени с использованием глубокой нейронной сети, учитывающей особенности и скорость речи различных пользователей. На втором этапе осуществляется управление диалогом на основе теории конечных автоматов. Наконец, на третьем этапе осуществляется управление действиями робота с учетом его текущего состояния.

В целях реализации диалога между пользователем и роботом, близкого к естественному по темпу и по содержанию, создается база сценариев возможных диалогов.

В проведенных экспериментах разработанная диалоговая система использовалась для управления манипулятором KUKA. Диалоговая система реализована в среде Python. Управление роботом осуществлялось с помощью программного обеспечения RoboDK. Результаты экспериментов подтвердили работоспособность и эффективность диалоговой системы управления роботом. Получена достаточно высокая точность распознавания (92 %); при этом скорость автоматического распознавания речи позволяла вести диалог в темпе, близком к темпу естественной речи.

**Ключевые слова:** глубокая нейронная сеть, скрытая марковская модель, обучение, управление диалогом, конечный автомат состояния, система управления роботом

### Введение

Диалоговая система — это средство обмена информацией между человеком и машиной с использованием естественного языка. Такая

система позволяет управлять роботами операторам, не имеющим специальной подготовки. Диалоговая система включает несколько подсистем, в том числе блок автоматического распознавания речи, блок понимания речи, блок управления диалогом, блоки генерации ответов и синтеза голоса [1] (рис. 1).

<sup>1</sup>Работа подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-07-01313.



Рис. 1. Схема диалоговой системы управления роботом

Fig. 1. Diagram of the robot interactive control system

Блок распознавания речи преобразует голосовое сообщение в текст. Задача блока понимания речи состоит в том, чтобы правильно интерпретировать это сообщение независимо от формы его выражения. Блок управления диалогом получает информацию от системы управления роботом и управляет диалоговым процессом в соответствии со сценарием диалога. Текст синтезируемых ответов преобразуется в голосовой ответ в блоке "синтез речи".

Диалоговые системы "человек—машина" условно можно разделить на два типа — без ограничений и с ограничениями [2]. Диалоговая система без ограничений, обладая большими базами знаний в различных областях, теоретически позволяет машине ответить на любой вопрос человека. Ограниченная диалоговая система является объектно-ориентированной и разрабатывается для специальной области применения. Несмотря на большое число публикаций и способов организации систем диалогового управления, в каждом конкретном случае возникает проблема наиболее эффективного способа обработки речевых сигналов и управления диалогом с учетом особенностей задачи управления. В статье предлагается структура объектно-ориентированной диалоговой системы для управления манипуляционными роботами.

### Методы обработки голосовых сигналов

Предварительным этапом распознавания речи является обработка голосовых сигналов. Обычно голосовые сигналы преобразуются в частотную область с использованием методики MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients) [3]. Процедуры распознавания речи можно разделить на процедуры распознавания отдельных слов и распознавание непрерывной речи. Для изолированного распознавания слов применяется акустическая модель динамического искажения времени (DTW — Dynamic Time Warping) [3]. Она чаще и эффективнее применяется без модели конкретного языка. Для непрерывного распознавания речи применяется скрытая марковская модель (НММ — Hidden Markov Model), которая обычно рассматривается совместно с моделью языка.

Напомним, что скрытая марковская модель отличается от марковской модели тем, что скрытая марковская модель определяется тремя параметрами: вероятностью перехода

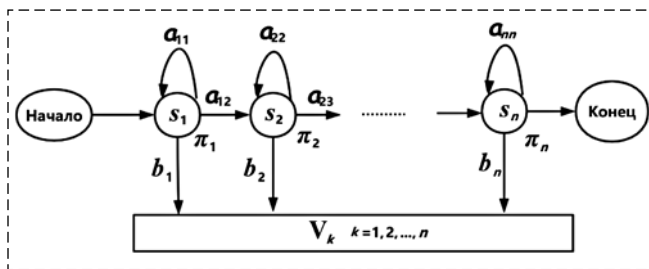


Рис. 2. Схема скрытой марковской модели  
Fig. 2. Scheme of the hidden Markov model

между состояниями, вероятностью начального состояния и наблюдаемой вероятностью, в то время как марковская модель построена только по двум первым параметрам. Дискретная НММ представляет собой упорядоченную последовательность состояний (рис. 2) и может быть выражена в форме  $\{\mathbf{A}, \boldsymbol{\pi}, \mathbf{B}\}$ , где  $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ ,  $i, j = 1, 2, 3, \dots, N$  — матрица вероятности перехода между  $N$  состояниями,  $a_{ij} = P(s_t = j | s_{t-1} = i)$ ,  $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $\boldsymbol{\pi} = [\pi_i]$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$  — матрица вероятности начального состояния,  $\pi_i = P(s_1 = i)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $\mathbf{B} = [b_i]$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$  — наблюдаемые вероятности  $b_i(\mathbf{o}_t) = P(\mathbf{o}_t = \mathbf{v}_i | s_t = i)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ;  $s_t$  — состояние в момент времени  $t$ ;  $\mathbf{v}_i$ ,  $\mathbf{o}_t$  — наблюдаемые векторы.

Перечислим три задачи, которые надо решить при использовании скрытой марковской модели:

1. Вычисление наблюдаемых вероятностей  $P(\mathbf{o}_t | s^{(i)})$  при известных параметрах  $\{\mathbf{A}, \boldsymbol{\pi}, \mathbf{B}\}$  и наблюдаемых векторах  $\mathbf{v}_k$  с помощью алгоритма FBA (Forward-backward algorithm) [4].

2. Обучение скрытой марковской модели с помощью алгоритма Баума-Уэлча (Baum-Welch) [5], в результате чего определяются параметры  $\{\mathbf{A}, \boldsymbol{\pi}, \mathbf{B}\}$  при известных наблюдаемых векторах  $\mathbf{v}_k$ .

3. Вычисление наиболее вероятного состояния при известных параметрах  $\{\mathbf{A}, \boldsymbol{\pi}, \mathbf{B}\}$  и наблюдаемых векторах  $\mathbf{v}_k$  с применением алгоритма Витерби (Viterbi) [6].

При распознавании речи состояниями модели являются фонемы, или отдельные слова. Параметры наблюдаемых вероятностей  $\mathbf{B}$  вычисляются, например, с помощью метода GMM (Gaussian Mixture Models), метода DTW (Dynamic Time Warping) или комбинированного метода GMM-НММ [7, 8].

Для решения задач голосового управления в робототехнике целесообразно приме-

нять глубокие нейронные сети (Deep Neural Network, DNN), которые обладают значительно большими возможностями, чем обычные нейронные сети, от которых они отличаются по числу слоев [9]. В глубоких нейронных сетях имеются не менее пяти скрытых слоев. Однако нейронные сети не способны непосредственно моделировать голосовые сигналы. Поэтому, чтобы использовать способность нейронных сетей к классификации, целесообразно рассмотреть комбинированную модель DNN-HMM (рис. 3).

Модель DNN-HMM, показанная на рис. 3, состоит из глубоких нейронных сетей DNN и скрытой марковской модели HMM. Скрытая марковская модель (HMM) использована для описания динамики голосовых сигналов; вероятности наблюдаемых векторов вычисляются нейронными сетями. Вероятность начального состояния предполагается известной. При заданных характеристиках голосовых сигналов на выходах нейронных сетей будут получены априорные вероятности состояний. Обучение нейронной сети проводится с помощью алгоритма обратного распространения ошибки (Backward Error Propagation — BP). На рис. 3 обозначено:  $a_{12}, a_{23}$  — вероятности перехода между состояниями;  $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$  — наблюдаемые вероятности. Приведенная на рис. 3 сеть DNN имеет шесть скрытых слоев по 2048 нейронов, 440 входных и 1024 выходных сигналов сети. Глубокая нейронная сеть вычисляет вероятность  $P(s|\mathbf{o})$ , наблюдаемая вероятность  $P(\mathbf{o}|s)$  определяется по формуле Байеса:

$$P(\mathbf{o}|s) = \frac{P(s|\mathbf{o})P(\mathbf{o})}{P(s)}, \text{ где } P(s) \text{ — априорная веро-}$$

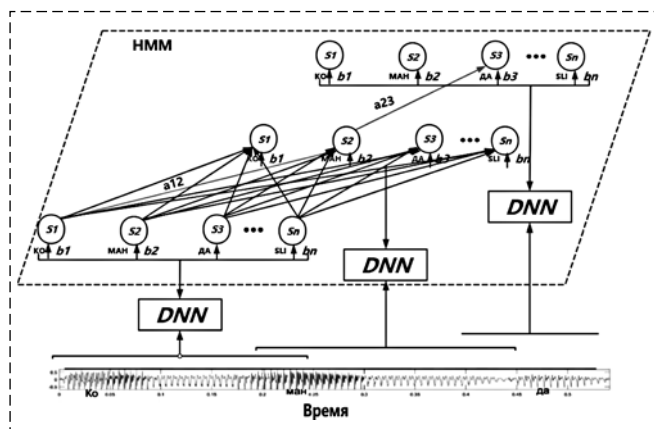


Рис. 3. Схема модели DNN-HMM (распознавание слова "команда")

Fig. 3. DNN-HMM model diagram (recognition of the word "command")

ятность состояния  $s$ ; величина  $P(\mathbf{o})$  не зависит от последовательности слов и может быть принята равной 1.

При непрерывном распознавании речи рассматриваемая модель DNN-HMM имеет ряд преимуществ по сравнению с моделью GMM-HMM. Она позволяет значительно повысить точность распознавания по сравнению с моделью GMM-HMM. Кроме того, в модели DNN-HMM используется только одна нейронная сеть для вычисления плотности распределения вероятностей состояния  $P(s|\mathbf{o})$ . В модели GMM-HMM используются модели GMM для вычисления наблюдаемых вероятностей по формуле [10]

$$P(\mathbf{o}_1^N | \mathbf{s}_1^N) = \prod_{n=1}^N b_{s_n}(\mathbf{o}_n) = \prod_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{c_{s_n, m}}{(2\pi)^{M/2} [\det(\Sigma_{s_n, m})]^{1/2}} \times \exp \left[ -\frac{1}{2} (\mathbf{o}_n - \boldsymbol{\mu}_{s_n, m})^T \Sigma_{s_n, m}^{-1} (\mathbf{o}_n - \boldsymbol{\mu}_{s_n, m}) \right],$$

где  $\boldsymbol{\mu}_{i, m}$  — векторы математического ожидания;  $\Sigma_{i, m}$  — ковариационные матрицы;  $c_{i, m}$  — весовые коэффициенты;  $\mathbf{s}_1^T = \{s_1, s_2, \dots, s_T\}$  — последовательность состояний;  $\mathbf{o}_1^T = \{\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2, \dots, \mathbf{o}_T\}$  — последовательность наблюдений.

В отличие от модели DTW модель DNN-HMM способна распознавать естественную речь, что особенно важно при разработке робототехнических систем коллаборативного типа, ориентированных на работу с пользователем, не имеющим специальной подготовки.

Поскольку для обучения нейронных сетей нужно иметь большие массивы известных входных и выходных сигналов, то вначале необходимо обучить модель GMM-HMM с использованием алгоритма Viterbi и задать входные и выходные сигналы нейронных сетей с помощью модели GMM-HMM. Таким образом, эффективность глубоких нейронных сетей DNN зависит от выбранной модели GMM-HMM.

### Способы распознавания и понимания речи

В качестве основного средства для распознавания речи роботом целесообразно выбрать языковую модель  $n$ -gram [11], которая позволяет вычислять вероятность следующего слова по словам, которые появились раньше. Ины-



ми словами, языковая модель  $n$ -gram способна вычислить состояние  $n$  по предыдущим  $n - 1$  состояниям. В модели  $n$ -gram обычно имеются модели 1-gram, 2-gram и 3-gram. Модель 1-gram, которая используется наиболее часто, прогнозирует состояние  $n$  только по состоянию  $n - 1$ , модель 2-gram прогнозирует состояние  $n$  только по состояниям  $n - 1$  и  $n - 2$ , и т. д.

Задача понимания естественной речи представляет собой интерпретацию смысла сообщения по тексту. В объектно-ориентированной системе задача интерпретации смысла существенно упрощается за счет синтаксиса — правил формирования высказываний. Например, в робототехнической системе структура сообщения о выполнении манипуляционной операции, определяющая синтаксис высказывания, может быть представлена в виде стандартного фрейма: <(1) название операции>, <(2) объект операции>, <(3) обстоятельство места>, <(4) обстоятельство образа действия> [12]. Например, <(1) поставить>, <(2) красный короб>, <(3) на большой стол>, <(4) без удара>. Обратим внимание на использование в таком высказывании лингвистических переменных, которыми пользуется человек в обычной жизни.

Еще один метод понимания речи рассматривает проблему понимания речи как проблему распознавания образов. При этом наиболее правдоподобный смысл слова или фразы  $M$  определяется в результате сравнения с образцами  $W$  соответствующих текстов, которые содержатся в результатах распознавания речи на предыдущих этапах. Таким образом, наиболее правдоподобным считается объект, обладающий наибольшей условной вероятностью, что можно записать как  $P(M|W)$ . Преимущество этого метода — возможность получения наилучшего варианта смысла пользователем из больших массивов данных, полученных на предыдущих этапах обучения. Существуют также методы, основанные на применении марковских двухслойных сетей [13].

### Управление диалогом

Управление диалогом непосредственно влияет на то, как естественный и интеллектуальный диалог системы воспринимается пользователями. Задача управления диалогом — определить следующее действие системы, учитывая предыдущий ход диалога. Диалоговый про-

цесс состоит из обращений между субъектом, делающим запрос, и субъектом, отвечающим на запрос, которые зависят от контекста дискурса. В рассматриваемом случае один из субъектов диалога — человек, а другой — робот. Диалоговый процесс можно рассматривать как обмен информацией, в которой инициатива может принадлежать и пользователю, и технической системе. В соответствии с этим можно выделить три вида диалога: 1) система обладает инициативой управления диалогом; 2) пользователь управляет диалогом, и система реагирует на его запросы; 3) система осуществляет общий контроль над диалоговым процессом, но в то же время пользователь может вмешиваться и изменять направление диалога, например, используя указание "отменить задачу А, выполнять задачу Б...". Это диалог смешанного типа.

Существуют несколько методов управления диалогом. Ряд методов использует рекуррентные нейронные сети [14, 15]. В работе [16] применяется рейтинг сообщений. Система управления диалогом может создавать следующие состояния диалога: по его текущему состоянию или по запросу клиента. Существуют подходы к управлению диалогом на основе анализа структуры текста [17] и подходы, предусматривающие обучение диалоговой системы по наблюдаемым записям диалога [18]. Чтобы решить проблемы контроля за состоянием диалога и управления диалогом, можно применить методику конечных автоматов состояния [19]. Такая методика применялась в ряде работ, так, в работе [20] для управления диалогом применялись модифицированные сети Петри. Напомним, что конечным автоматом состояния (КАС) называется математическая модель, которая содержит текущее состояние, условие действия и условие перехода в следующее состояние. Действие будет инициировано или будет выполнен переход одного состояния в другое после выполнения условия перехода. После выполнения действия КАС может перейти в новое состояние или оставаться в исходном состоянии.

На рис. 4 в качестве примера показан конечный автомат, который описывает диалоговую систему управления манипулятором. Здесь приняты следующие обозначения для действий и условий: 1Д (Действие) — инициализация модулей; 2Д — запуск системы; 3Д — инструкции по использованию; 4Д — распознавание речи; 5Д — запуск подсистемы специального режи-

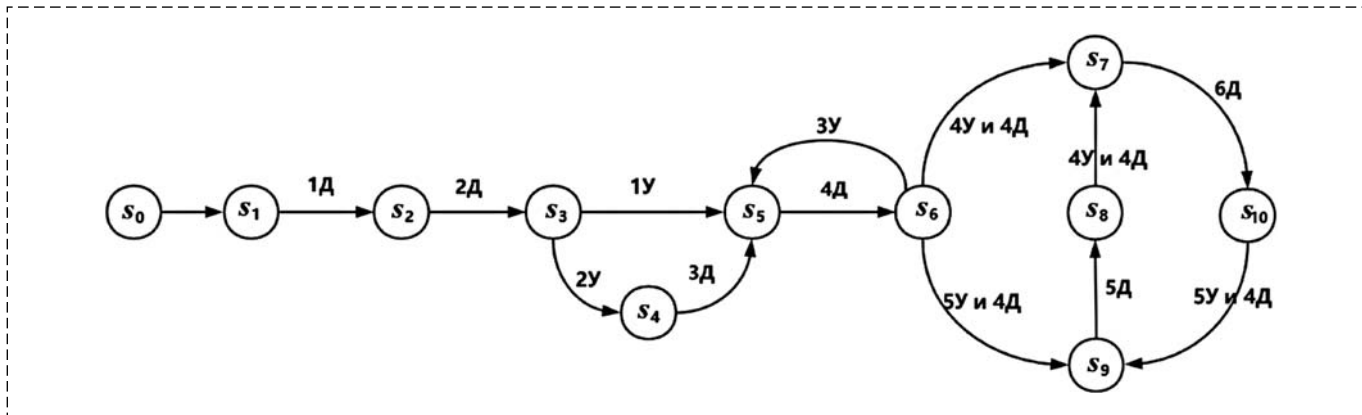


Рис. 4. Конечный автомат состояния диалоговой системы управления манипулятором  
 Fig. 4. The finite-state automate in interactive manipulator control system

ма; 6Д — запуск подсистемы общего режима; 1У (Условие) — запуск системы первый раз; 2У — запуск системы не первый раз; 3У — команда неправильная; 4У — общий режим; 5У — специальный режим. Это система комбинированного типа. В представленной схеме конечный автомат состояния имеет девять состояний. Первые пять состояний автомат проходит последовательно, переходы по остальным состояниям зависят от запросов пользователей. Система распознает запросы пользователей с помощью алгоритма (DNN-HMM). Пользователь должен ответить на вопрос системы: "вводить специальный режим или общий режим?", "управлять ли положением инструмента?", "введите голосовую команду" и т. д.

На практике в объектно-ориентированной диалоговой системе число входных запросов клиентов ограничено (обычно число запросов от 20 до 30). В ориентированной на "естественную" речь (неограниченной) диалоговой системе предполагается распознавание любых высказываний. Чтобы реализовать такой диалог используются большие массивы данных для обучения. По сравнению с неограниченной диалоговой системой объектно-ориентированная система обладает не только ограничениями, но и рядом преимуществ, в том числе высокой скоростью распознавания речи, высокой эффективностью и простотой обучения.

#### Система диалогового управления манипуляционным роботом

Ниже рассматривается возможность применения объектно-ориентированной диа-

логовой системы для управления манипуляционным роботом в специальном режиме и в общем режиме.

Специальный режим дает возможность непосредственно управлять манипулятором по голосовым командам клиентов. Например, "положить красный блок на место А", "убрать синий блок" и т. д. В этом режиме применены акустическая модель (DNN-HMM), языковая модель ( $n$ -gram) и словарь для распознавания нескольких заранее определенных объектно-ориентированных речевых запросов (рис. 5).

С помощью открытых исходных пакетов Kaldi ASR обучаются акустическая модель DNN-HMM и языковая модель  $n$ -gram. Акустическая модель представляет слова русского языка с помощью латинского алфавита. Например, слово "положить" представляется как p o l o z h y u t t, а слово "красный" как k r a a s n y j. В акустической модели на базе глубоких нейронных сетей определяются вероятности возможных состояний (слов). Состояние максимальной вероятности считается достоверным отображением голосовых сигналов. Применение языковых моделей позволяет повысить точность распознавания речи. Например, если вероятность высказывания "положить на место" составляет 0,1, а вероятность высказывания "положить блок" составляет 0,5, то запрос "положить блок" считается достоверным. Анализатор высказываний способен преобразовать их в команды, которые должны быть правильно интерпретированы роботом. Например, высказывание "положить красный блок на место А" преобразуется в последовательность команд: "манипулятор из положения В (полученного при выполнении

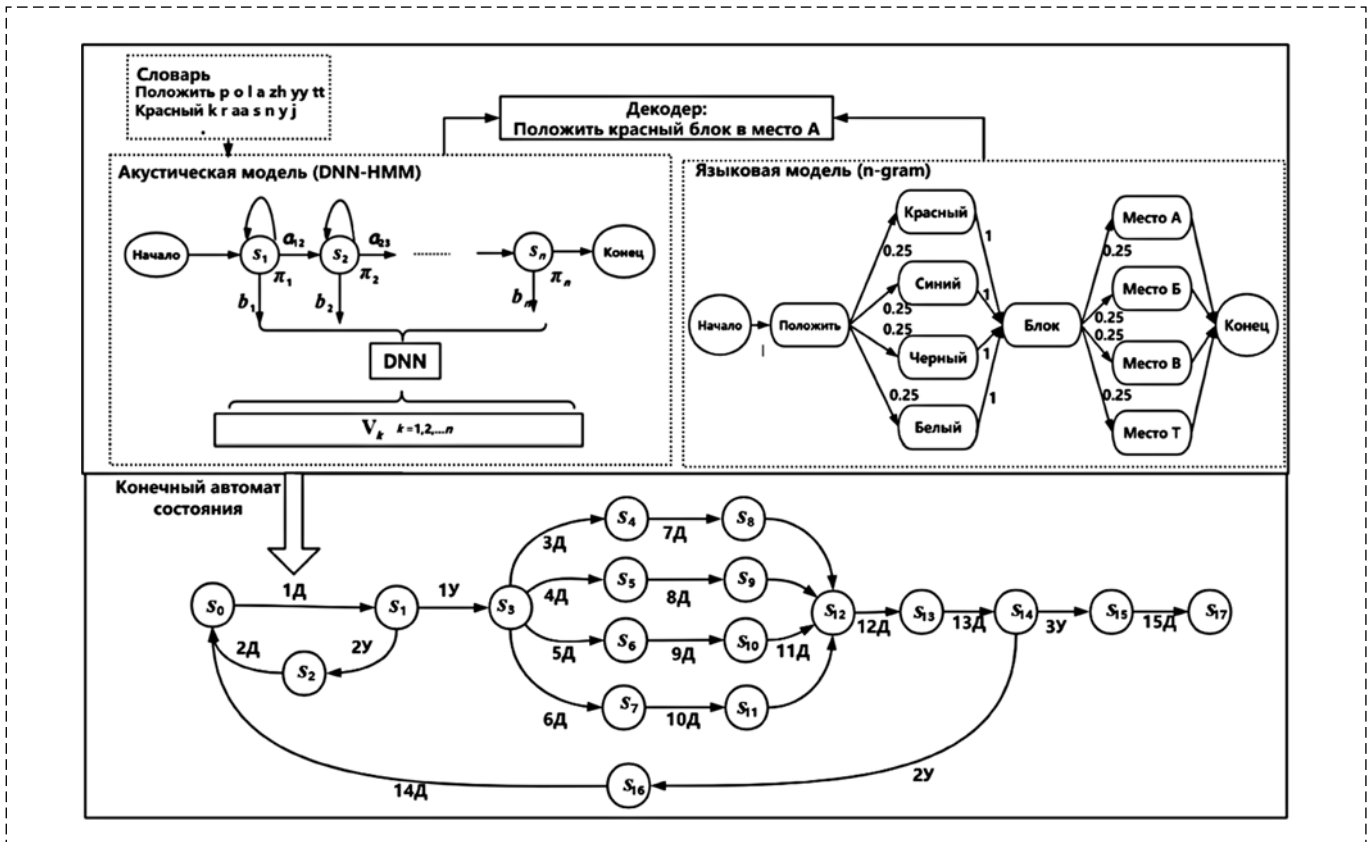


Рис. 5. Схема специального режима. Левая часть графика — метод распознавания русской речи; правая часть графика — управление диалогом на основе теории конечных автоматов состояния  
 Fig. 5. Scheme of the special mode. The left part of the graphics is the Russian speech recognition method; the right part of the graphic is dialog management based on a finite — state automata

предыдущей команды "взять красный блок") перевести в положение А. Заметим, что в более сложных случаях необходимо решать задачу автоматического планирования действий. Например, если в приведенной выше команде на красном блоке находится предмет С, то его надо сначала убрать [21]. С помощью технического зрения робота можно определить координаты красного блока в положении В и координаты заданного оператором положения А, после чего передать эти координаты в систему управления манипулятором. Для распознавания сложных объектов можно использовать сверточную (конволюционную) нейронную сеть [22]. После выполнения операции предполагается проверка реального состояния, т. е. того, находится ли блок в положении А. Если ответ положительный, то задача считается выполненной.

На рис. 5 приняты следующие обозначения для узлов и ребер графа: 1Д (Действие) — распознавание речи; 2Д — запуск голосового файла: "команда неправильная, снова введите команду"; 3Д — проверка положения "место А";

4Д — проверка направления "в"; 5Д — проверка объекта "красный блок"; 6Д — проверка глагола "положить"; 7Д — обнаружение места А; 8Д — определение направления движения схвата манипулятора; 9Д — обнаружение красного блока; 10Д — формирование траектории схвата манипулятора; 11Д — определение координат захвата; 12Д — схват манипулятора движется по траектории; 13Д — обнаружение красного блока; 14Д — запуск голосового файла "операция не выполнена, снова ввести команду"; 15Д — запуск голосового файла "операция выполнена, ввести новую команду"; 1У (Условие) — команда правильная; 2У — команда неправильная; 3У — красный блок не находится в нужном месте.

Заметим, что в специальном режиме не выполняется синтез речи, все голосовые ответы содержатся в заранее подготовленном файле записи, например, "операция выполнена", "введите голосовую команду" и т. д.

Общий режим расширяет возможности оператора, позволяя ему получить дополнительную информацию в реальном времени. Наибо-

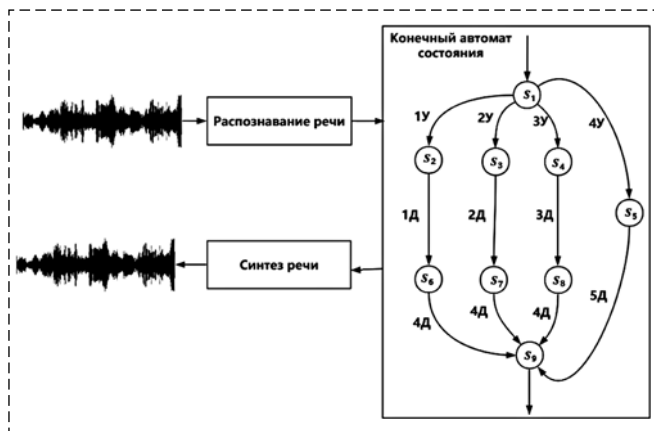


Рис. 6. Схема общего режима. Распознавание речи с помощью модели DNN-HMM; синтез речи с помощью сервиса Яндекс

Fig. 6. Scheme of the general regime. Speech recognition with DNN-HMM; speech synthesis using the Yandex service

более простой способ реализации общего режима состоит в подключении диалоговой системы к сети Интернет, содержащей необходимый сервис "Яндекс для синтеза речи" (рис. 6).

Если распознавание речевого сообщения не удастся, то система выдает сообщение: "не удалось распознавание сообщения!". Система содержит библиотеку диалогов; для управления диалогом используются такие варианты: "один ответ для нескольких запросов", "несколько ответов для одного запроса" и "ответ из сайта для специальных вопросов". Выбор варианта зависит от выполнения следующих условий и действий: 1Д (Действие) — поиск информации по условию.1; 2Д — поиск информации по условию.2; 3Д — поиск информации по условию.3; 4Д — синтез ответов; 5Д — синтез сообщения "не удалось распознавание речи"; 1У (Условие) — запросы клиента содержат функциональную информацию, например, "что ты можешь?", "что ты делаешь?"; 2У — запросы клиента содержат информацию о текущем состоянии робота; 3У — запросы клиента содержат текущую информацию о рабочем состоянии робота, о погоде и т. п.; 4У — результат распознавания речи неправильный.

### Экспериментальное исследование диалога "оператор—робот"

Исследование проводили с помощью манипулятора KUKA KR3 R540. Предполагалось, что предварительно получены координаты наблюдаемых объектов с помощью открытого

исходного пакета OpenCV. Оператор способен ввести голосовую команду через микрофон PC с использованием языка Python. Диалоговая система комбинированного типа обрабатывает голосовую информацию, распознает и отправляет команды подсистеме управления манипулятором KUKA KRC4 через программное обеспечение RoboDK. В системе управления KRC4 запускается приемочный код RoboDKsynch.sh, который написан на стандартном языке управления манипулятором KUKA. Одновременно программа KUKA VARPROXY возвращает текущие обобщенные координаты (относительные углы поворота звеньев манипулятора) в компьютер для отображения текущего состояния манипулятора. Функциональная схема диалоговой системы приведена на рис. 7.

В проведенных экспериментах для распознавания речи использовалась модель DNN-HMM (см. выше), которая позволяла эффективно и быстро распознавать произвольные высказывания на русском языке с помощью языковой модели  $n$ -gram.

На рис. 8 (см. вторую сторону обложки) показана 3D-модель манипулятора KUKA KR3 R540, с помощью которой обрабатывалась диалоговая система управления реальным манипулятором, и приведен фрагмент диалога при управлении этой моделью: пользователь дает

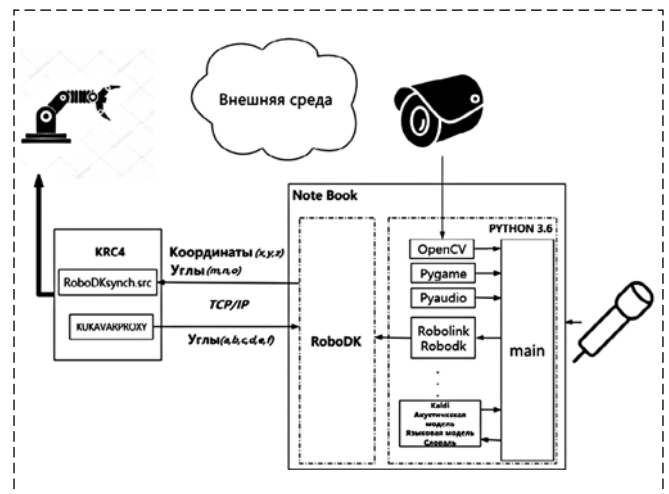


Рис. 7. Функциональная схема диалоговой системы для управления манипулятором KUKA KRC4 комбинированного типа. TCP/IP — сетевая модель передачи данных, представленных в цифровом виде; KRC4 — система управления манипулятором KUKA

Fig. 7. Functional diagram of the dialogue system for controlling the KUKA KRC4 manipulator of the combined type. TCP/IP — network model of data transmission, presented in digital form; KRC4 — KUKA manipulator control system

задание — "положить красный блок на место А"; робот после уточнения задачи отвечает: "операция выполняется", после выполнения операции, сообщается: "блок на месте". Аналогично, при управлении реальным роботом-ассистентом хирурга вводятся команды "передать скальпель", после уточнения задачи и сообщения "операция выполняется" робот осуществляет поиск нужного инструмента в соответствии с изложенной выше методикой, захватывает его и перемещает в определенное положение в рабочей области хирурга. После чего сообщает: "медицинский инструмент готов". В дальнейшем планируется добавить процедуру распознавания кисти протянутой руки хирурга и перемещение инструмента непосредственно в его руку.

Некоторые затруднения, возникавшие в процессе эксперимента, были связаны с тем, что для работы системы распознавания требуется полная тишина и отсутствие резких изменений громкости. Диалоговая система, организованная на основе теории конечных автоматов, ведет диалог с клиентом-оператором с использованием практически естественного языка, в чем состоит ее преимущество. Однако система не лишена недостатков. Система работает только по заранее определенной последовательности высказываний для диалога данного типа. Она не может прерывать текущий диалог и самостоятельно перейти к следующему диалогу, что ограничивает возможности диалога робота и оператора. Эти ограничения могут быть преодолены при дальнейших исследованиях.

### Заключение

Проведенные эксперименты показали, что реализованная объектно-ориентированная система диалогового управления роботом, построенная на основе технологии конечных автоматов состояния, успешно решает задачу управления манипулятором с помощью голосовых команд, которые, в свою очередь, распознаются с использованием комбинированного метода DNN-НММ. Получены достаточно высокие точность (92 %) и скорость автоматического распознавания речи, что позволяло вести диалог в темпе, близком к темпу естественной речи.

Отметим, что чем больше слов нужно распознать, тем меньше скорость и ниже точность

распознавания. На практике глубокие нейронные сети применяются для преобразования от голосовых сигналов к слогам. Для распознавания слов и фраз нужно применять марковскую и языковую модели, хотя это и повысит как сложность, так и время обучения. Преимуществом рассмотренной выше объектно-ориентированной диалоговой системы является упрощение преобразования от голосовых сигналов к слову.

### Список литературы

1. **Jurafsky D., Martin J. H.** Speech and Language Processing: An introduction to natural language processing, computational linguistics, and speech recognition. Pearson, 2014. P. 273—543.
2. **Sergienko R.** Text Classification for Spoken Dialogue Systems. Institute of Telecommunications and Institute of Artificial Intelligence, 2016. P. 17—58.
3. **Mansour A. H., Salh G. Z. A., Mohammed K. A.** Voice Recognition using Dynamic Time Warping and Mel-Frequency Cepstral Coefficients Algorithms // International Journal of Computer Applications. 2015. P. 34—41.
4. **Yu Z. S., Kobayashi H.** An Efficient Forward-Backward Algorithm for an Explicit-Duration Hidden Markov Model // IEEE Signal Processing Letters. 2003. P. 11—14.
5. **Tu S.** Derivation of Baum-Welch Algorithm for Hidden Markov Models. URL: <https://people.eecs.berkeley.edu/~stephen-tu/writeups/hmm-baum-welch-derivation.pdf>
6. **Tao C.** A generalization of discrete hidden Markov model and of Viterbi algorithm // Department of Computer Science. 1992. P. 1381—1387.
7. **Rabiner L. R.** A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition // Proceeding of the IEEE. 1989. P. 257—286.
8. **Rabiner L., Juang B. H.** Fundamentals of Speech Recognition. Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1993. P. 321—386.
9. **Arisoy E., Sainath T., Kingsbury B., Ramabhadran B.** Deep neural network language model // In proceedings of the Joint Human Language Technology Conference and the North American Chapter of the Association of Computational Linguistics Workshop. 2012. P. 20—28.
10. **Dong Y., Li D.** Automatic Speech Recognition (A Deep Learning Approach). London: Springer-Verlag, 2015. P. 13—48
11. **Pauls A., Klein D.** Faster and smaller N-gram language models // Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. 2011. P. 258—267.
12. **Ющенко А. С.** Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника", 25—26 сентября 2012. Санкт-Петербург: Политехника-сервис, 2012. С. 29—36.
13. **Meza-Ruiz I. V., Riedel S., Lemon O.** Spoken language understanding in dialogue systems, using a 2-layer Markov logic network // Improving semantic accuracy. Semantics and Pragmatics of Dialogue (LONDIAL'08). 2008. P. 191—192.
14. **Williams J. D.** Web-style ranking and slu combination for dialog state tracking // Annual Meeting of the Special Interest Group on Discourse and Dialogue. 2014. P. 282—291.
15. **Henderson M., Thomson B., Young S. J.** Deep Neural Network Approach for the Dialog State Tracking Challenge // Proceedings of SIGDIAL. 2013. P. 467—471.
16. **Thomson B., Young S.** Bayesian update of dialogue state: A POMDP framework for spoken dialogue systems // Computer Speech & Language. 2010. P. 562—588.

17. **Pieraccini R., Huerta M. J.** Where do we go from here? research and commercial spoken dialog systems // SIGdial Workshop on Discourse and Dialogue. 2005. P. 1–24.

18. **Thomson B., Young S.** Bayesian update of dialogue state: A POMDP (the partially observable Markov decision process) framework for spoken dialogue systems // Computer Speech & Language. 2010. P. 562–588.

19. **Yuschenko A. S., Morozov D. N., Zhonin A. A.** Speech control for mobile Robotic systems // Proc. of 4th International Conference "Mechatronic Systems and Materials" MSM-2008, Bialostok, Poland, July 2008. P. 14–17.

20. **Жонин А. А.** Алгоритм обучения менеджера диалога речевой диалоговой системы управления роботом // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научн. тр. междунар. конф. М.: Физ.-мат. лит., 2011. С. 395–406.

21. **Ющенко А. С.** Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С. 5–18.

22. **Huang J., Rathod V., Sun C., Zhu M. I., Korattikara A.** Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors // Computer Vision and Pattern Recognition, 2017.

## Dialogue System of Controlling Robot Based on the Theory of Finite-State Automata

**Yin Shuai**, shuai.yin@yandex.ru, **A. S. Yuschenko**, yusch@bmstu.ru,

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Yin Shuai*, Post-Graduate Student of Robotic Systems and Mechatronics Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: scholessl8@mail.ru

Accepted on July 29, 2019

### Abstract

The article discusses the system of dialogue control manipulation robots. The analysis of the basic methods of automatic speech recognition, speech understanding, dialogue management, voice response synthesis in dialogue systems has been carried out. Three types of dialogue management are considered as "system initiative", "user initiative" and "combined initiative". A system of object-oriented dialog control of a robot based on the theory of finite state machines with using a deep neural network is proposed. The main difference of the proposed system lies in the separate implementation of the dialogue process and robot's actions, which is close to the pace of natural dialogue control. This method of constructing a dialogue control robot allows system to automatically correct the result of speech recognition, robot's actions based on tasks. The necessity of correcting the result of speech recognition and robot's actions may be caused by the users' accent, working environment noise or incorrect voice commands. The process of correcting speech recognition results and robot's actions consists of three stages, respectively, in a special mode and a general mode. The special mode allows users to directly control the manipulator by voice commands. The general mode extends the capabilities of users, allowing them to get additional information in real time. At the first stage, continuous speech recognition is built by using a deep neural network, taking into account the accents and speech speeds of various users. Continuous speech recognition is a real-time voice to text conversion. At the second stage, the correction of the speech recognition result by managing the dialogue based on the theory of finite automata. At the third stage, the actions of the robot are corrected depending on the operating state of the robot and the dialogue management process. In order to realize a natural dialogue between users and robots, the problem is solved in creating a small database of possible dialogues and using various training data. In the experiments, the dialogue system is used to control the KUKA manipulator (KRC4 control) to put the desired block in the specified location, implemented in the Python environment using the RoboDK software. The processes and results of experiments confirming the operability of the interactive robot control system are given. A fairly high accuracy (92 %) and an automatic speech recognition rate close to the rate of natural speech were obtained.

**Keywords:** deep neural network, hidden Markov model, training, dialogue control, finite state machine, robot control system

For citation:

**Yin Shuai, Yuschenko A. S.** Dialogue System of Controlling Robot Based on the Theory of Finite-State Automata, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol.20, no. 11, pp. 686–695.

DOI: 10.17587/mau.20.686-695

### References

1. **Jurafsky D., Martin J. H.** Speech and Language Processing: An introduction to natural language processing, computational linguistics, and speech recognition, Pearson, 2014, pp. 273–543.

2. **Sergienko R.** Text Classification for Spoken Dialogue Systems, Institute of Telecommunications and Institute of Artificial Intelligence, 2016, pp. 17–58.

3. **Mansour A. H., Salh G. Z. A., Mohammed K. A.** Voice Recognition using Dynamic Time Warping and Mel-Frequency Cepstral Coefficients Algorithms, *International Journal of Computer Applications*, 2015, pp. 34–41.

4. **Yu Z. S., Kobayashi H.** An Efficient Forward-Backward Algorithm for an Explicit-Duration Hidden Markov Model, *IEEE Signal Processing Letters*, 2003, pp. 11–14.

5. **Tu S.** Derivation of Baum-Welch Algorithm for Hidden Markov Models, available at: <https://people.eecs.berkeley.edu/~stephentu/writeups/hmm-baum-welch-derivation.pdf>

6. **Tao C.** A generalization of discrete hidden Markov model and of Viterbi algorithm, Department of Computer Science, 1992, pp. 1381–1387.

7. **Rabiner L. R.** A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition, *Proceeding of the IEEE*, 1989, pp. 257–286.

8. **Rabiner L., Juang B. H.** Fundamentals of Speech Recognition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1993, pp. 321–386.
9. **Arisoy E., Sainath T., Kingsbury B., Ramabhadran B.** Deep neural network language models, *In proceedings of the Joint Human Language Technology Conference and the North American Chapter of the Association of Computational Linguistics Workshop*, 2012, pp. 20–28.
10. **Dong Y., Li D.** Automatic Speech Recognition (A Deep Learning Approach), Springer-Verlag, London, 2015, pp. 13–48.
11. **Pauls A., Klein D.** Faster and smaller N-gram language models, *Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, 2011, pp. 258–267.
12. **Yuschenko A. S.** Interactive robot control based on fuzzy logic, *Proceedings of the international scientific-technical conference "Extreme Robotics"*, September 25–26 2012, St. Petersburg, Polytechnic service, 2012, pp. 29–36 (in Russian).
13. **Meza-Ruiz I. V., Riedel S., Lemon O.** Spoken language understanding in dialogue systems, using a 2-layer Markov logic network, *Improving semantic accuracy. Semantics and Pragmatics of Dialogue (LONDIAL'08)*, 2008, pp. 191–192.
14. **Williams J. D.** Web-style ranking and slu combination for dialog state tracking, *Annual Meeting of the Special Interest Group on Discourse and Dialogue*, 2014, pp. 282–291.
15. **Henderson M., Thomson B., Young S. J.** Deep Neural Network Approach for the Dialog State Tracking Challenge, *Proceedings of SIGDIAL*, 2013, pp. 467–471.
16. **Thomson B., Young S.** Bayesian update of dialogue state: A POMDP framework for spoken dialogue systems, *Computer Speech & Language*, 2010, pp. 562–588.
17. **Pieraccini R., Huerta M. J.** Where do we go from here? research and commercial spoken dialog systems, *SIGdial Workshop on Discourse and Dialogue*, 2005, pp. 1–24.
18. **Thomson B., Young S.** Bayesian update of dialogue state: A POMDP (the partially observable Markov decision process) framework for spoken dialogue systems, *Computer Speech & Language*, 2010, pp. 562–588.
19. **Yuschenko A. S., Morozov D. N., Zhonin A. A.** Speech control for mobile Robotic systems, *Proc. of 4th International Conference "Mechatronic Systems and Materials" MSM-2008*, Byalostok, Poland, July, 2008, pp. 14–17.
20. **Zhonin A. A.** Algorithm for learning the dialogue manager of the dialogue robot control system, *Integrated models and soft computing in artificial intelligence. Sat scientific papers of the international conference*, Moscow, Phys. mat. Lit. 2011, pp. 395–406 (in Russian).
21. **Yuschenko A. S.** Intellectual planning in the activities of robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 3, pp. 5–18 (in Russian).
22. **Huang J., Rathod V., Sun C., Zhu M. I., Korattikara A.** Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017.



**21 февраля 2020 г.**  
**в г. Новокузнецк на базе Научно-исследовательского центра**  
**«МашиноСтроение» (НИЦ МС) состоится**

## IV Международная научно-практическая конференция "МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИКА И РОБОТОТЕХНИКА"



### Секции конференции:

1. Роботы, мехатроника и робототехнические системы.
2. Методы и техника создания и исследования интеллектуальных машин.
3. Механика и управление движением машин.
4. Механизация, автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.
5. Методы контроля и диагностики в машиностроении.
6. Информационно-измерительные и управляющие системы.
7. Математическое и программное обеспечение вычислительных машин и комплексов.

По итогам конференции издается сборник трудов с присвоением УДК, ББК, ISSN.  
 Сборник индексируется в базе данных РИНЦ.  
 Всем публикациям постатейно присваивается цифровой идентификатор DOI.

Подробную информацию о конференции см. на сайте:  
<http://srcms.ru>

М. Р. Либерзон, д-р физ.-мат. наук, проф., mark@fund.ru,  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

## Технология ГЕОНОД: состояние и перспективы автоматизации и управления

*Сейсморазведка — необходимая составляющая эффективного использования нефтегазовых месторождений морского шельфа, так как стоимость бурения скважины на шельфе в сотни раз дороже бурения скважины на суше, а предварительная морская сейсморазведка может помочь избежать неоправданных затрат.*

*Высокое качество морской сейсморазведки возможно получить только с помощью донных технологий: на исследуемый участок морского дна опускают специальные донные станции, которые улавливают прямые и отраженные от морского дна акустические сигналы, генерируемые на поверхности акустическим излучателем. Полученные акустические сигналы станции фиксируют и записывают. После того как данные записаны, станцию поднимают на поверхность, записанные данные скачивают со станции на специальные устройства для последующей интерпретации. В результате на основе полученных данных составляют детальную 2D- или 3D-карту вероятных залежей нефти и газа. Полученные карты используют для определения точных координат установки буровых станций.*

*Самой распространенной технологией морской сейсморазведки является применение донных станций на фале (веревке). Первые разработки донных станций на фале начались в 70-е годы прошлого века и не предполагали средств автоматизации работ с донными станциями. Все операции съема и прикрепления фала к станции, погружения и подъема станции, а также ряд других операций выполнялись вручную. На сегодняшний день фактически не появилось какой-либо эффективной автоматизации в работе со станциями на фале. Кроме того, использование фала приносит в морскую сейсморазведку множество других негативных явлений и трудностей. Вот лишь несколько из них: зацепления фала за неровности дна и возможные препятствия, что влечет потерю или порчу станций, обрыв фала; необходимость иметь на судне достаточно места для хранения фала и лебедок для фала, что ведет к использованию габаритных судов и как следствие — к невозможности вести сейсморазведку на малых глубинах и в приливно/отливных транзитных зонах; фал, соединяющий станции на дне, производит сейсмический шум, что сильно ухудшает качество получаемых данных; невозможность вести сейсморазведку в местах, где находятся другие суда (например, рыболовецкие), и т. п.*

*Разработанная в течение нескольких последних лет новая отечественная технология морской сейсморазведки ГЕОНОД позволяет решить указанные и многие другие проблемы. Многие из этих проблем вообще не возникают, так как в технологии ГЕОНОД фалы не используются, а работа ведется с помощью автономных самовсплывающих донных станций (АСДС).*

*В статье рассматривается ряд задач прикладной механики и управления, возникающих при использовании технологии ГЕОНОД: управление движением станции при погружении и при всплытии, обеспечение точности установки станции в заданную точку на дне, сбор станций после их подъема на поверхность и др.*

**Ключевые слова:** технология сейсморазведки, углеводороды, морской шельф, самовсплывающие донные станции

### Технологии разведки месторождений углеводородов на шельфе

Процессы добычи нефти и газа на месторождениях под морским дном — на шельфе — существенно отличаются от добычи нефти и газа на суше главным образом по следующей причине. Для бурения скважин в морском дне используются специальные буровые установки, например, такие, как показано на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Стоимость эксплуатации такой буровой установки исключительно высока и может достигать до 1 млн долларов США в день, стоимость бурения скважины на шельфе в сотни раз превосходит стоимость бурения скважины на суше. Поэтому необходимо выбрать та-

кое место на шельфе для бурения, в котором с большой степенью вероятности есть месторождение нефти и газа, чтобы по возможности избежать неоправданных затрат. В этом помогает проведение предварительной разведки.

Предварительная разведка на шельфе с целью достаточно достоверно определить наличие в данном месте месторождения нефти и газа ведется уже на протяжении нескольких десятилетий в различных регионах мира. Разработчики и пользователи технологий такой разведки остановились на методе сейсмической разведки на базе работы специальных донных станций. Станции опускают на дно и расставляют на некоторой площади. По поверхности воды над станциями барражирует судно с акустическим излучателем. Станция



на дне улавливает прямой акустический сигнал от судна и сигналы, отраженные морским дном. Эти сигналы фиксирует и записывает станция. Затем она поднимается на поверхность, записанные сигналы передаются на специальный сервер, который на основе сравнения зафиксированных станцией прямого и отраженного от морского дна акустических сигналов определяет плотность породы и наличие пустот под морским дном в исследуемом месте, т. е. вероятность существования месторождений нефти и газа. После этого станции перевозятся на соседний участок морского шельфа, и сейсморазведка осуществляется на нем. В результате создается карта исследованного шельфа с указанием участков вероятных месторождений нефти и газа и объемов этих месторождений.

Самой распространенной и применяемой в мире технологией сейсморазведки на шельфе является технология американской компании *FairfieldNodal*. Известны и другие технологии, но на их долю остается сейсморазведка лишь небольшой части мирового шельфа. Так, на протяжении многих лет компания *Fairfield-Nodal* выполняет сейсморазведку более чем на 90 % площади морского шельфа России. Такая же картина и в других регионах мира.

Около 10 лет назад группа российских специалистов под руководством Д. А. Ильинского начала разработку новой технологии ГЕОНОД сейсморазведки углеводородов на морском шельфе [1—4]. В 2011—2012 гг. технология ГЕОНОД уже была в такой стадии разработки, что была апробирована, применена в реальных условиях и на Международной конференции "Шельф России 2012" была признана лучшей геологоразведочной технологией в мире. Это объясняется тем, что технология ГЕОНОД ни по каким параметрам не уступает существующим технологиям, а по многим превосходит их. Кроме того, ряд изобретений, внедренных при разработке технологии ГЕОНОД, а также комплекс задач по прикладной механике и теории управления, по которым в некоторой части решения получены, а в остальном задачи продолжают решаться, ставит технологию ГЕОНОД в преимущественное положение по сравнению с другими аналогичными технологиями. Ниже будут показаны некоторые аспекты сравнения технологии ГЕОНОД с существующими аналогами.

## Сравнение различных технологий сейсморазведки

Основные параметры различных технологий сейсморазведки на шельфе показаны на рис. 2 [5—16]. Очевидны преимущества технологии ГЕОНОД практически по всем параметрам по отношению к другим технологиям. Автономное время работы, производительность и ряд других технических характеристик, несомненно, играют значительную роль при сравнении технологий. Отметим, что глубина до 7000 м, на которой могут работать станции ГЕОНОД, не имеет аналогов. В настоящее время на всех шельфах мира сейсморазведка ведется на глубинах до 250...300 м. Таких неразведанных шельфов еще много в различных регионах. Но уже через несколько лет придется переходить к сейсморазведке углеводородов на значительно больших глубинах. Например, по всей длине средиземноморского шельфа Израиля предполагаются очень большие запасы нефти и газа, которые до сих пор не разведаны. Рельеф морского дна здесь таков, что при удалении от берега глубина резко возрастает и уже на расстоянии 50...60 км достигает 2500...3000 м, а дальше еще глубже. Очевидно, что получение достоверных результатов сейсморазведки на этом шельфе будет возможно лишь с применением технологии ГЕОНОД. Подобных шельфов много и в других регионах мира. Еще одно преимущество станции ГЕОНОД состоит в том, что ее корпус изготовлен из радиопрозрачного материала в отличие от станций, применяющихся в других технологиях. Все использующиеся в мире технологии сейсморазведки на шельфе предполагают, что по окончании работы станции на морском дне ее необходимо поднять на поверхность с помощью фала (веревки), а затем на палубе судна вскрыть корпус станции, подсоединить провода и переписать на сервер информацию со станции. Станция ГЕОНОД, оказавшись на поверхности воды, сразу же передает информацию на сервер дистанционно сквозь радиопрозрачный корпус. Особое значение имеет тот факт, что технология ГЕОНОД не использует фалы для опускания, подъема и перемещения станций, без чего не может обойтись ни одна другая технология. Некоторые негативные явления, возникающие в результате использования фалов, упомянуты выше в аннотации. На рис. 3 (см.








Производитель	СЕЙСМО-ШЕЛЬФ Россия	Fairfield Nodal Z700 США	Fairfield Nodal Z3000 США	Seabird CASE Abyss Норвегия	CGGVeritas Trilobit Франция	Geospace Technologies OBX США	ГЕОНОД
Внешний вид							
Тип прибора	Развертывание свободное падение	Соединяется с помощью фала	Развертывание с помощью роботов	Развертывание с помощью роботов	Развертывание с помощью роботов	Соединяется с помощью фала	Развертывание свободное падение
Допустимые глубины работ, м	0...500 м	0...700 м	0...3000 м	0...3000 м	0...3000 м	0...3450 м	0...7000 м
Снаряженная масса одного прибора, кг	32,5	30	97	150	59	15,9	23
Автономное время работы, дни	30	15	60	60	75	30	90
Требование к судну	Любое	Требует адаптации	Требует адаптации	Специальное	Специальное	Специальное	Любое
Передача прибора лаборатории судна	После каждого развертывания или восстановления	После каждого развертывания или восстановления	После каждого развертывания или восстановления	После каждого развертывания или восстановления	После каждого развертывания или восстановления	После каждого развертывания или восстановления	Свободный режим
Скачивание данных	Проводное	Проводное	Проводное	Проводное	Проводное	Проводное	Беспроводное
Качество сейсмических данных	Полный азимут, 4 компонента	Полный азимут, 4 компонента	Полный азимут, 4 компонента	Узкий азимут, один компонент	Узкий азимут, один компонент	Узкий азимут, один компонент	Полный азимут, 4 компонента
Производительность в сутки, км <sup>2</sup>	5	2	1,2	1,2	1,2	2	10

Рис 2. Сравнение технологий сейсморазведки на шельфе

Fig. 2. Comparison of technologies of seismic prospecting on shelf

третью сторону обложки) видно, какие крупногабаритные установки, включая лебедки, приходится размещать на морских судах при использовании фалов.

### Некоторые особенности технологии ГЕОНОД

Возможность отказаться от применения фалов предоставляет уникальная разработка, которая внедрена и используется в технологии ГЕОНОД. Схематически конструкция станции ГЕОНОД показана на рис. 4 (см. третью сторону обложки).

Станция снабжена грузом-якорем, который изготовлен из спрессованного морского песка, т. е. из экологически чистого материала. Меха-

низм, соединяющий станцию с грузом-якорем, представляет собой механическое реле, которое размыкается при получении акустического сигнала определенной частоты. При сбрасывании станции в воду груз-якорь погружает ее на дно и удерживает в нужном месте нужное время. После того как станция собрала необходимые данные, с поверхности посылается специальный акустический сигнал с частотой, на которую настроен механизм замыкания соединения станции с грузом-якорем. Происходит замыкание, станция всплывает, а груз-якорь остается на дне и в течение короткого времени (обычно это 15...20 дней) бесследно растворяется. Механизм замыкания каждой отдельной станции настроен на свою собственную частоту замыкания, что позволяет

давать станциям команды на всплытие поочередно для более удобного их сбора на поверхности.

Для сбора всплывших станций с поверхности воды сконструирован снабженный необходимой автоматикой беспилотный катер, показанный на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

В верхней части каждой станции ГЕОНОД установлен радиомаячок, который автоматически включается после всплытия станции. Радар катера по сигналу радиомаячка обнаруживает всплывшую станцию, подходит к ней по радиосигналу и с помощью специального сачка поднимает станцию из воды на свою палубу. После этого радар катера разыскивает другую станцию по ее радиосигналу и подбирает ее с воды. Так продолжается до тех пор пока палуба катера не будет заполнена поднятыми станциями и не возникнет необходимость переправить станции на другое судно или пока радар катера не перестанет обнаруживать всплывшие станции, т. е. пока не будут собраны все станции. Кроме того, определение местоположения станций осуществляется с помощью спутниковой системы ГЛОНАСС, если необходима корректировка направления движения к станции беспилотного катера.

### **Вопросы автоматизации и управления**

Перед группой разработчиков технологии ГЕОНОД стоит еще серия задач по механике, автоматизации и управлению. Некоторые из этих задач связаны с управлением ориентацией станции и расположением ее в пространстве посредством использования не одного, а двух или трех грузов-якорей с возможностью разъединения их со станцией независимо друг от друга, что позволит менять ориентацию станции как во время ее нахождения на дне, так и во время движения в воде при погружении и подъеме. Кроме того, на ориентацию станции в пространстве можно влиять, меняя расположение груза-якоря относительно станции. Эти же методы могут использоваться для обеспечения точности установки станции в заданную точку на дне. Возникает необходимость исследования и обеспечения устойчивости динамики механических систем, для чего в большинстве случаев применяется известный метод иннов [17]. Необходимо также ре-

шать задачи автоматизации и управления при сборе всплывших станций с поверхности воды и доставке их на судно, что осуществляется катером-беспилотником. Сюда входят задачи автоматического наведения катера на станцию, подъем станции на катер с помощью сачка, определение необходимости прекращения сбора станций с поверхности воды в случае полного заполнения палубы катера или в случае, когда собраны все станции с поверхности воды, и транспортировка собранных станций на большое судно. В процессе дальнейшей разработки и совершенствования технологии ГЕОНОД, ее использования в реальных условиях на морском шельфе возникают все новые задачи автоматизации и управления.

Здесь даны лишь краткие описания задач механики, автоматизации и управления, связанных с развитием и использованием технологии ГЕОНОД. Решения этих задач не приводятся, так как по большей части окончательные решения пока отсутствуют да и многие задачи еще требуют более четкой постановки. Несомненно, что в ближайшее время появится ряд новых задач, решение которых будет необходимо для дальнейшей разработки технологии ГЕОНОД. Многолетний опыт научно-исследовательской работы автора настоящей статьи убеждает в том, что публикация гипотез и нерешенных задач часто приводит к проявлению интереса все новых и новых исследователей, а в результате — к решению рассматриваемых проблем. Верится, что Вы, уважаемый читатель, проявите интерес к описанным здесь проблемам и, возможно, окажете позитивное влияние на их решение и на дальнейшее развитие разработок в технологии ГЕОНОД, что имеет исключительно важное значение как для науки и техники, так и для народного хозяйства.

### **Заключение**

Разработанная в течение нескольких последних лет российская технология ГЕОНОД сейсморазведки углеводородов на морском шельфе в целом по всем показателям превосходит используемые в мире технологии. Развитие и совершенствование технологии ГЕОНОД продолжается, но уже сейчас она может и должна применяться и там, где работы ведутся на основе других технологий, и там,

где другие технологии не могут быть использованы. Например, ни одна из других технологий сейсморазведки углеводородов на морском шельфе не работает на малых глубинах и в приливно/отливных транзитных зонах, так как туда не могут подойти крупные морские суда с установленными на них лебедками для фалов, а также технологии, использующие фалы, не могут использоваться на больших глубинах, так как применение фалов длиной в несколько километров не представляется возможным. Диапазон глубин, на которых технология ГЕОНОД работает эффективно и дает достоверную информацию, составляет от 0 до 7000 м. Еще одна немаловажная деталь: стоимость производства станций ГЕОНОД и ряд других затрат при использовании этой технологии как минимум в два раза меньше, чем аналогичные затраты в других технологиях.

В заключение укажем некоторые работы, проведенные с использованием технологии ГЕОНОД.

2011 г. Создание первой версии действующей станции ГЕОНОД. Испытания станций с участием приглашенных экспертов, Черное море, район г. Геленджик.

2011 г. Проведение первой съемки 2D в транзитной зоне акватории Хайпудырской губы, юго-восток Печерского моря, заказ ПАО ЛУКОЙЛ, Россия.

2012 г. Выполнение работ в глубоководном сейсмическом 2D-проекте на глубинах 0,2...2,5 км, акватория Лаккадивского моря (Индия), заказ ONGC Limited, Индия.

2014 г. Исследование сейсмической опасности в зоне строительства Керченского моста, заказ Института Физики Земли РАН и ОАО ГипроТрансМост.

2014 г. Создание и испытания широкополосной донной сейсмической станции реального времени, заказ Института Океанологии им. П. П. Ширшова РАН по гранту Минпромторга России.

2015 г. Осуществление глубоководного 2D-проекта в Индии, глубина 4,5 км, заказ Национального Центра Исследования Арктики и Антарктики, Индия.

2016 г. Пассивные наблюдения на шельфе Сахалина для прямых поисков углеводородов, три профиля по 7,8 км, заказ ООО РН Шельф-Арктика, Россия.

2017 г. Глубоководный 2D-проект 700 км через Андаманские острова (Индия), глубины от

200 м до 4,3 км, 63 постановки станций, заказ Национального Геофизического Исследовательского Института, Индия.

#### Список литературы

1. Ильинский Д. А., Либерзон М. Р., Шаренков С. Б. Комплексный подход к проведению сейсморазведки на шельфе моря при помощи автономных самовсплывающих донных станций // Сборник статей "Булатовские чтения". Краснодар: Изд-во Института нефти, газа и энергетики ФГБОУ ВО "КубГТУ", 2017. С. 57—65.
2. Либерзон М. Р., Ильинский Д. А., Погородний П. Г., Шаренков С. Б. Мониторинг акваторий в удаленных районах на основе технологии ГЕОНОД // IX Международный аэрокосмический конгресс. Пленарные и избранные доклады. М.: Издательство РИА, 2018. С. 215—220.
3. Либерзон М. Р., Ильинский Д. А., Погородний П. Г., Шаренков С. Б. Проблемы прикладной механики при применении технологии ГЕОНОД сейсморазведки на шельфе // 1-я Международная конференция "Проблемы механики и управления". Тезисы докладов. Махачкала, 2018.
4. Либерзон М. Р., Ильинский Д. А., Погородний П. Г., Шаренков С. Б. Технология ГЕОНОД для сейсморазведки углеводородов на шельфе и обнаружения объектов // Идеи и новации. 2018. Т. 6, № 3. С. 75—81.
5. Slejko D., Santulin M., Garcia J., Papoulia J., Daskalaki E., Fasulaka C., Fokaefs A., Piinski D., Mascle J., Makris J., Nicolich R., Papadopoulos G. A., Tsambas A., Wardell N. Preliminary Seismic Hazard Assessments for the Area of Pylos and Surrounding Region (SW Peloponnese) // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2010. Vol. 51, N. 2—3.
6. URL: <http://fairfieldgeo.com/media/pdfs/Z100-spec-sheet-2018.pdf>
7. URL: <http://fairfieldgeo.com/media/pdfs/ZLoF-spec-sheet-2018.pdf>
8. URL: [https://www.inapril.com/wp-content/uploads/2019/06/2019-06-A3000C\\_Spec-Sheet-approved.pdf](https://www.inapril.com/wp-content/uploads/2019/06/2019-06-A3000C_Spec-Sheet-approved.pdf)
9. URL: <https://www.inapril.com/the-node/>
10. URL: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Manta-Spec-Sheet-2018-September-US-Letter-Email-Quality.pdf>
11. URL: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Trilobit%20Spec%20Sheet%202014%20US%20LoRez.pdf>
12. URL: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Case%20Abyss%20Spec%20Sheet%202014%20US%20LoRez.pdf>
13. URL: [https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2019/05/592-12350-02\\_B\\_Brochure-OBX-60-Deep.pdf](https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2019/05/592-12350-02_B_Brochure-OBX-60-Deep.pdf)
14. URL: [https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/04/592-13010-02\\_A\\_Brochure-OBX-90-4p.pdf](https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/04/592-13010-02_A_Brochure-OBX-90-4p.pdf)
15. URL: [https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2017/12/592-10720-02\\_A\\_Brochure-OBX-150-1.pdf](https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2017/12/592-10720-02_A_Brochure-OBX-150-1.pdf)
16. URL: [https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/10/592-15670-01\\_A\\_Brochure-OBX-750E-4p-for-desktop-printing.pdf](https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/10/592-15670-01_A_Brochure-OBX-750E-4p-for-desktop-printing.pdf)
17. Jury E. I. *Inners and Stability of Dynamic Systems* (Second Edition). Robert E. Krieger Publishing Co., Inc. Malabar, Florida, USA, 1982.

# Technology GEONOD: Status and Prospects of Automation and Control

M. R. Liberzon, mark@fund.ru,  
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Corresponding author: **Liberzon Mark R.**, D. Sc., Professor,  
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation,  
e-mail: mark@fund.ru

Accepted on August 15, 2019

## Abstract

Seismic prospecting is one of the crucial components for an effective use of oil and gas fields on offshore. Since the costs of drilling a well on the shelf is hundreds of times more expensive than drilling a well on land, preliminary marine seismic exploration can help avoid unnecessary costs. High quality data of marine seismic surveys can only be obtained from bottom technologies: special bottom stations are lowered into the investigated area of the seabed. These bottom stations collecting direct and reflected acoustic signals (generated on the surface by an acoustic radiator) from the seabed. After all data is recorded, bottom stations are lifted to the surface, the recorded data is downloaded for subsequent interpretation. As a result, based on the obtained data, a 2D or 3D detailed map of the potential oil and gas deposits is compiled. The resulting maps are used to determine the exact coordinates of the installation of drilling stations. The most common technology of marine seismic exploration is the use of bottom stations on a halyard rope. First development of this technology began in the 1970s and did not assume the means of automation work with bottom stations. All operations of removal and attachment of rope to station, diving and lifting stations, as well as a number of other operations were performed manually. Nowadays, there has not been any automation in working with stations on the halyard rope. In addition, the use of halyard rope has a number of disadvantages such as: Hooking of halyard rope for obstacles on the sea bottom; The breakage of the halyard rope; The need to have additional space on the vessel to store the halyard rope and all accessories, which leads to the use of larger vessels that can not operate at shallow depths; The halyard rope that is connected to the bottom stations generates a seismic noise, which degrades the quality of the received data; Impossible to conduct seismic prospecting in places with high shipping traffic. Developed over the past few years, a new Russian technology of marine seismic exploration GEONOD allows us easily solve many of mentioned problems. Many of these problems do not rise at all, since the GEONODE technology does not use halyards, and the work is carried out by the autonomous self-popup bottom stations (ASDS). In this paper a number of problems on applied mechanics and control in connection with technology GEONOD are considering.

**Keywords:** technology of seismic prospecting, hydrocarbons, sea shelf, autonomous self-popup bottom stations

## For citation:

**Liberzon M. R.** Technology GEONOD: Status and Prospects of Automation and Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 11, pp. 696–701.

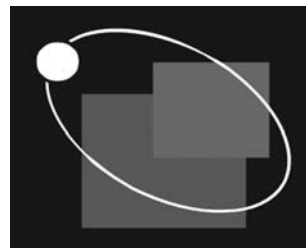
DOI: 10.17587/mau.20.696-701

## References

1. Ilyinsky D. A., Liberzon M. R., Sharenkov S. B. Complex approach to the seismic prospecting at the sea shelf with use of autonomous self-popup bottom stations, *Proceedings of the Conference "Bulatov's readings"*, Krasnodar, 2017 (in Russian).
2. Liberzon M. R., Ilyinsky D. A., Pogorodny P. G., Sharenkov S. B. Monitoring of water area in remote areas on the GEONOD technology basis, *Proceedings of the Ninth International Aerospace Congress*, 2018, Moscow (in Russian).
3. Liberzon M. R., Ilyinsky D. A., Pogorodny P. G., Sharenkov S. B. Problems of applied mechanics in use of technology GEONOD for the seismic prospecting of the sea shelf, *Proceedings of the First Intl. Conference "Problems of Mechanics and Control"*, 2018, Makhachkala (in Russian).
4. Liberzon M. R., Ilyinsky D. A., Pogorodny P. G., Sharenkov S. B. GEONOD Technology for Off-shore Seismic Hydrocarbon Exploration and Object Detection, *Ideas and innovations*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 75–81 (in Russian).
5. Slejko D., Santulin M., Garcia J., Papoulia J., Daskalaki E., Fasulaka C., Fokaefs A., Iiinski D., Mascle J., Makris J., Nicolich R., Papadopoulos G. A., Tsambas A., Wardell N. Preliminary Seismic Hazard Assessments for the Area of Pylos and Surrounding Region (SW Peloponnese), *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2010, vol. 51, no. 2–3 (in Russian).
6. Available at: <http://fairfieldgeo.com/media/pdfs/Z100-spec-sheet-2018.pdf>
7. Available at: <http://fairfieldgeo.com/media/pdfs/ZLoF-spec-sheet-2018.pdf>
8. Available at: [https://www.inapril.com/wp-content/uploads/2019/06/2019-06-A3000C\\_Spec-Sheet-approved.pdf](https://www.inapril.com/wp-content/uploads/2019/06/2019-06-A3000C_Spec-Sheet-approved.pdf)
9. Available at: <https://www.inapril.com/the-node/>
10. Available at: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Manta-Spec-Sheet-2018-September-US-Letter-EmailQuality.pdf>
11. Available at: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Trilobit%20Spec%20Sheet%202014%20US%20LoRez.pdf>
12. Available at: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Case%20Abys%20Spec%20Sheet%202014%20US%20LoRez.pdf>
13. Available at: [https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2019/05/592-12350-02\\_B\\_Brochure-OBX-60-Deep.pdf](https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2019/05/592-12350-02_B_Brochure-OBX-60-Deep.pdf)
14. Available at: [https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/04/592-13010-02\\_A\\_Brochure-OBX-90-4p.pdf](https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/04/592-13010-02_A_Brochure-OBX-90-4p.pdf)
15. Available at: [https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2017/12/592-10720-02\\_A\\_Brochure-OBX-150-1.pdf](https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2017/12/592-10720-02_A_Brochure-OBX-150-1.pdf)
16. Available at: [https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/10/592-15670-01\\_A\\_Brochure-OBX-750E-4p-for-desktop-printing.pdf](https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/10/592-15670-01_A_Brochure-OBX-750E-4p-for-desktop-printing.pdf)
17. Jury E. I. *Inners and Stability of Dynamic Systems* (Second Edition). Robert E. Krieger Publishing Co., Inc. Malabar, Florida, USA, 1982.

С. Ф. Сергеев, д-р псих. наук, проф., СПбГУ, СПбПУ

## Интеллектуальный потенциал России в науках об управлении: МКПУ- 2019



Очередная XII мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019) состоялась 23—28 сентября 2019 года в живописном селе Дивноморское, расположенном рядом с Геленджиком, известным черноморским курортом Краснодарского края. Несмотря на завершение курортного сезона возможность тесного научного и человеческого общения привлекла более 560 участников, представлявших государственные структуры, организации Академии наук, вузы и промышленные предприятия России и стран ближнего зарубежья. О научном уровне конференции говорит состав участников конференции, среди которых 15 академиков РАН, 13 членов-корреспондентов, 6 профессоров РАН, 184 доктора наук, 203 кандидата наук, 36 аспирантов и студентов.

Работа конференции осуществлялась на четырех локальных научно-технических конференциях: «Модели, методы и технологии интеллектуального управления» (ИУ-2019), председатель — академик С. Н. Васильев, сопредседатели — чл. корр. РАН Д. А. Новиков, д.т.н. О. П. Кузнецов; «Робототехника и мехатроника» (РиМ-2019), председатель — академик Ф. Л. Черноусько, сопредседатель — академик И. А. Каляев; «Управление в распределенных и сетевых системах» (УРСС-2019), председатель — академик И. А. Каляев, сопредседатель — академик И. В. Бычков; «Управление аэрокосмическими системами» (УАКС-2019), сопредседатели — академик С. Ю. Желтов, академик С. Л. Чернышев. Кроме того в рамках МКПУ-2019 были проведены две отчетные сессии по выполнению программ ориентированных фундаментальных исследований Российского фонда фундаментальных исследований под руководством председателей экспертных советов академиков И. А. Каляева и Ф. Л. Черноусько.

Основной целью мультиконференции явилось обсуждение новых результатов фундамен-

тальных и прикладных исследований в области процессов управления и их практического применения в различных сферах человеческой деятельности, направленных на реализацию Стратегии научно-технологического развития страны, утвержденной указом Президента РФ № 642 от 01 декабря 2016 года. Рассматривались работы по приоритетному направлению «Переход к цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших данных, машинного обучения и искусственного интеллекта». Следует отметить, что междисциплинарный характер конференции позволил объединить научные интересы специалистов широкого спектра фундаментальных и практических дисциплин математического, инженерного и технологического знания, работающих в области управления.

Работу мультиконференции открыл на первом пленарном заседании председатель Президиума академик В. Г. Пешехонов (ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»), который в своем приветственном слове отметил важность для развития экономики России работ в области интеллектуального управления техническими системами, рассматриваемых в рамках конференции. В последовавших пленарных докладах был представлен широкий комплекс проблем управления, методов и подходов к их решению, охватывающий авиационно-космическую тематику, эргатические системы и проблемы управления роботами. Отдельно отметим выступление академика В. А. Сойфера (Самарский университет) с докладом «Фотоника и ее применение в сенсорике, обработке информации и управлении», в котором показаны перспективы данного направления при решении задач создания элементов новых микромеханических машин и

устройств. Рассмотрены технологии оптической микроманипуляции движением микротурбины, технологии создания дифракционных объективов с восстановлением изображений на основе сверточных нейронных сетей глубокого обучения для систем технического зрения малых космических аппаратов, БПЛА и систем видеонаблюдения, представлены результаты в области нанофотоники и создания фотоники «на чипе». Не меньший интерес участников конференции был прикован к выступлению Ю. В. Визильтера и С. Ю. Желтова (ФГУП «ГосНИИАС»), посвященному использованию технологий глубоких нейронных сетей для анализа данных, управления и оптимизации перспективных авиационных приложений.

В докладе Е. А. Микрина и М. Ю. Беляева (РКК «Энергия») рассматривались научные результаты, полученные в экспериментах, проводимых на борту Международной космической станции (МКС). Помимо решения научных и прикладных задач в этих экспериментах широко представлены возможности использования МКС в образовательных целях. Оптимизации орбитального движения космических аппаратов с электроракетными двигательными установками был посвящен доклад О. А. Горшкова, В. Г. Петухова, Г. А. Попова, Н. А. Тестоедова (Госкорпорация «Роскосмос», МАИ, ИСС им. М. Ф. Решетнева). В выступлении А. А. Галяева и Е. Я. Рубиновича (ИПУ РАН) была затронута проблема оптимизации и планирования маршрутов движения управляемых объектов в конфликтной среде, что имеет большое значение при решении задач планирования передвижений войск, судов, самолетов и других транспортных средств, при их уклонении от систем однородных и/или разнородных наблюдателей. Продолжает оборонную тематику доклад Е. Н. Семашкина (КБП им. академика А. Г. Шипунова), посвященный исследованию проблем всепогодного применения тепловизионных и радиолокационных каналов управления. Вопросы организации роботизированного производства отражены в докладе И. А. Каляева и С. Г. Капустяна (НИИ МВС им. академика А. В. Каляева ЮФУ, Южный научный центр РАН). Доклад М. В. Андреевой и В. Е. Павловского (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) был

посвящен математическому моделированию и созданию макета робопоезда (робота змеи).

На секционных заседаниях МКПУ-2019 и научных сессиях было прочитано 286 докладов. Все они посвящены актуальным проблемам управления в человеко-машинных и технических системах и имеют высокий научно-практический уровень. Отметим работы из области учета человеческого фактора и оценки функциональных состояний операторов сложных систем управления, выполненные в ГосНИИАС (О. Н. Корсун, Е. И. Михайлов, Т. А. Тихомирова). Ряд работ был посвящен машинному обучению, интеллектуальному анализу данных, поддержке принятия решений. Интересный доклад был представлен профессором В. С. Заборовским с соавторами (СПбПУ), в нем предложен подход к созданию вычислительных суперкомпьютерных систем нового поколения, использующих принципы адаптивной реконфигурации аппаратного обеспечения, распределенной обработки данных и интеллектуализации среды исполнения прикладных задач.

В рамках краткого отчета, к сожалению, невозможно описать все представленные работы и направления исследований, которые охватывали широкий спектр проблем проектирования и управления в робототехнических системах, создания интеллектуальных систем управления, разработки методов обработки и представления информации, организации управления вычислениями, методам автоматизированного проектирования, архитектуре бортовых комплексов управления, системам моделирования динамики летательных аппаратов, управлению в транспортных системах и др.

В заключение отметим прекрасную организацию конференции и работу организационного комитета МКПУ-2019 под руководством академика РАН И. А. Каляева. Участники конференции выражают глубокую признательность руководителю рабочей группы А. П. Кухаренко и ее членам С. Г. Капустяну, В. Н. Капустян, Н. Ю. Ивановой, Т. И. Жерновой, Д. Б. Михайловой, В. В. Коробкину, И. В. Агузову, А. И. Серогородскому обеспечившим организационно-техническое сопровождение конференции и условия для продуктивной и комфортной работы.



27 ноября 2019 г. в ГК «ИЗМАЙЛОВО» (г. Москва) состоится

**Десятая Межотраслевая конференция  
«АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА-2019»,**

посвященная демонстрации современных программ, приборов, систем и решений для автоматизации предприятий энергетики, машиностроения, металлургии, химической, нефтегазовой, цементной и других отраслей промышленности.

*Темы докладов конференции*

- Актуальные задачи автоматизации в промышленности
- Информационно-управляющие системы промышленной автоматизации (АСУ ТП, АСОДУ, ERP, CRM, MES, АСКУЭ, ПАЗ, РЗА, SCADA и др.)
- Опыт внедрения различных информационных систем на предприятиях машиностроения, энергетики, металлургии, нефтегазовой, оборонной и др. отраслей промышленности
- Теория и практика управления информационной безопасностью промышленных предприятий
- Отечественные и зарубежные контрольно-измерительные приборы
- Автоматизация электроснабжения промышленных предприятий. Системы энергоменеджмента
- Программные средства поддержки проектирования, измерений и испытаний
- Системы управления нормативно-справочной информацией

**Контактная информация:**

тел.: + 7 (905) 567-8767; e-mail: [admin@intecheco.ru](mailto:admin@intecheco.ru)

---

---

**Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5510, (499) 269-5397**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 28.08.2019. Подписано в печать 11.10.2019. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1119. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)