ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

М ЕХАТРОНИКА, ВТОМАТИЗАЦИЯ, И ПРАВЛЕНИЕ



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 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:

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 ГАРАЩЕНКО 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. 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.

Редакция: БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства: АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Ловчаков В. И., Шибякин О. А. Модифицированные фильтры Баттерворса в решении обратной задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов71

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

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 МНБД Scopus и RSCI (на платформе Web of Science).

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу: http://novtex.ru/mech, e-mail: mech@novtex.ru

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

MECHATRONICS, **AUTOMATION, CONTRO**

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAV

Vol. 22

2021

No. 2

Published since 2000

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 KALYAEVI A KURZHANSKI A. B. KUZNETSOV N. 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. VUSUPOV R M ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan 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. PUTOV V. V. PSHIKHOPOV V. Kh. RAPOPORT E. Ya. SERGEEV S. F. ZHUKOV I. A.

Editorial Staff: BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House: ANTONOV B. I.

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

DOI 10.17587/issn.1684-6427

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and prospectives 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

Karabutov N. N. On Role of S-Synchronizability and Excitation Constancy in Structural Identifi-

Lovchakov V. I., Shibyakin O. A. Modified Butterworth Filters in Solving the Inverse Problem

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

lakovlev R. N., Rubtsova J. I., Erashov A. A. Comparative Evaluation of Approaches for De-

Moskovsky A. D., Burgov E. V., Ovsyannikova E. E. An Approach to Scene Recognition

Gavruishin S. S., Bui V. P., Phung V. B., Dang H. M., Nguyen V. D., Thanh Vu. C. Improving the Visual Interactive Analysis Method for Automation and Control of the Decision-Making

Information about the journal is available online at: http://novtex.ru/mech.html, e-mail: mech@novtex.ru

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 681.5.015

DOI: 10.17587/mau.22.59-70

Н. Н. Карабутов, д-р техн. наук, проф., kn22@yandex.ru, МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва

О роли S-синхронризируемости и постоянства возбуждения в задаче структурной идентифицируемости нелинейных систем

Рассмотрен класс динамических систем с одной нелинейностью. Введено понятие S-синхронизируемости входа. Показано, что S-синхронизируемость является условием структурной идентифицируемости нелинейной системы, которая может быть преобразована к некоторой статической системе. Принятие решения о структурной идентифицируемости основано на анализе свойств специального класса геометрических структур, отражающих свойства нелинейной части динамической системы. Рассмотрены требования к модели, позволяющие получить геометрическую структуру по измерениям входа и выхода. Исследовано влияние условия постоянства возбуждения входа на структурную идентифицируемость системы. Невыполнение условия постоянства возбуждения приводит к появлению незначимой геометрической структуры. Рассмотрены различные виды идентифицируемости системы, основанные на анализе структуры. Введено понятие d-оптимальности, которое характеризует свойства геометрической структуры. Получены условия неидентифицируемой структуры нелинейной системы при невыполнении условия d-оптимальности для геометрической структуры при заданных свойствах входа. Предложены методы оценки идентифицируемости системы и нахождения области идентифицируемости в условиях неопределенности. Показано, как на основе фазового портрета можно получить оценку неидентифицируемости системы. Предлагаемый подход обобщен на системы с двумя нелинейностями. Приведены условия частичной структурной идентифицируемости. Предложен метод построения области структурной идентифицируемости системы. Отмечены особенности структурной идентифицируемости данного класса систем. Показано, как при выполнении условия структурной идентифицируемости оценить структуру системы. Предложен способ иерархического погружения для идентификации структуры системы. Предлагаемые методы и процедуры применены для исследования систем с гистерезисом Бука-Вена и двумя нелинейностями. Приведен пример, иллюстрирующий эффективность метода иерархического погружения.

Ключевые слова: идентифицируемость, геометрическая структура, структурная идентификация, S-синхронизируемость, система с двойной нелинейностью, степень структурной идентифицируемости

Введение

В настоящее время получены основополагающие результаты по параметрической идентификации систем. Наряду с этим продолжаются исследования по оценке идентифицируемости динамических систем. Подход к оценке идентифицируемости основан на идеях Р. Калмана [1], а дальнейшее их развитие дано в работах [2, 3]. Показано, что для параметрической идентифицируемости системы необходима невырожденность информационной матрицы. В работе [4] введено понятие структурной идентифицируемости. Для проверки структурной идентифицируемости могут применяться различные подходы и методы [5-7].

Из приведенных результатов следует, что оценка идентифицируемости системы вы-

полняется в параметрическом пространстве. Исследованию данной проблемы посвящено множество публикаций. Отличие от подхода, изложенного в работе [2], состоит в том, что результаты идентифицируемости пытаются представить в виде, принятом в задачах параметрического оценивания. Другие подходы к оценке структурной идентифицируемости рассмотрены в работах [8—10].

Много работ посвящено параметрической идентифицируемости нелинейных систем (см. например, [9—12]). В статье [10] для исследования идентифицируемости применяется подход, основанный на анализе чувствительности системы по выходу. В работе [9] получены условия локальной параметрической идентифицируемости при различных вариантах измерения экспериментальных данных. Критический

анализ подходов, применяемых для оценки идентифицируемости биологических моделей, дан в статье [11]. Рассмотрены модели оценки идентифицируемости нелинейных систем на основе разложения в ряд Тейлора, таблиц идентифицируемости и алгебры Ли. Вопросам исследования практической идентифицируемости посвящены работы [12—14].

Проведенный анализ показывает, что под идентифицируемостью модели понимают возможность оценки ее параметров. Предлагаемые методы основаны на оценке невырожденности информационной матрицы. Аналогичные результаты получены в теории параметрического оценивания, а условие невырожденности (полноты ранга) матрицы представлено в легко проверяемом условии постоянства возбуждения входа и выхода системы. Как правило, структура модели задается априори, и поэтому не всегда понятно, какой смысл вкладывается в понятие структурной локальной идентифицируемости. Понятие структуры широко эксплуатируется в задачах оценки идентифицируемости. Идентифицируемость нелинейной системы также сводится к задаче параметрической идентифицируемости на основе применения различных методов линеаризации модели по параметрам. Эта обширная область исследований не охватывает задачи структурной идентифицируемости нелинейных динамических систем в следующем смысле: можно ли в условиях неопределенности принять решение о структуре (форме, зависимости) нелинейной части системы. Задача в таком виде не ставилась. Такая постановка соответствует анализу структурных аспектов идентифицируемости (идентификации) системы. Кроме того, не рассматривался вопрос: какой вход, даже обладающий свойством постоянства возбуждения, гарантирует структурную идентифицируемость системы в указанном выше смысле. Данная постановка впервые была предложена в работе [15].

Ниже рассматривается задача структурной идентифицируемости нелинейной системы. Понятие структурной идентифицируемости (*h*-идентифицируемости) введено в статье [15]. В отличие от изложенных выше методов предлагаемый подход направлен на решение задачи оценки структуры нелинейной части динамической системы и основан на анализе специального класса структур. Ниже дается изложение и обобщение результатов, полученных в работах [16, 17].

Постановка задачи

Рассмотрите систему

$$\dot{X} = AX + B_{\varphi}\varphi(y) + B_{u}u,$$

$$y = C^{T}X,$$
(1)

где $u \in R$, $y \in R$ — вход и выход системы; $A \in R^{q \times q}$, $B_u \in R$, $B_{\phi} \in R^q$, $C \in R^q$ — матрицы соответствующих размерностей; $\varphi(y)$ — некоторая скалярная нелинейная функция. Матрица A является гурвицевой. Далее полагаем, что $B_{\phi} = B_u = I = [0, 0, ..., 0, 1]^{\mathsf{T}}$, $C = [1, 0, ..., 0]^{\mathsf{T}}$.

Полагаем, что функция $\varphi(y)$ является гладкой и удовлетворяет условию

$$\begin{split} &\chi \in F_{\varphi} = \{\gamma_1 \xi^2 \leq \varphi(\xi) \xi \leq \gamma_2 \xi^2, \\ &\xi \neq 0, \ \varphi(0) = 0, \ \gamma_1 \geq 0, \gamma_2 < \infty\}, \end{split}$$
(2)

где $\xi \in R$ — вход нелинейного элемента, ξ является линейной комбинацией переменных состояния. Для системы (1) известно информационное множество

$$I_{o} = \{u(t), y(t), t \in J = [t_{0}, t_{k}]\}.$$
 (3)

Задача: на основе анализа и обработки I_o оценить структурную идентифицируемость (СИ) нелинейной части системы (1).

Воспользуемся подходом к структурной идентификации, предложенным в работе [17]. Он основан на переходе в специальное структурное пространство и построении структур S_{ey} , отражающих свойства нелинейной части (1). Анализ S_{ey} напрямую связан с решением задачи структурной идентифицируемости системы. Чтобы отличить излагаемый далее подход от параметрической идентифицируемости, ниже будет использоваться термин *h*-идентифицируемости (*HI*). Изложим метод построения S_{ey} -структуры.

Метод построения Sev-структуры

Построение S_{ey} -структуры требует предварительного формирования множества $I_{N,g}$, содержащего информацию о функции $\varphi(y)$. Изложим способ получения $I_{N,g}$, следуя работе [18]. Применим к y(t) операцию дифференцирования и обозначим полученную переменную x_1 . Учет x_1 приводит к расширению информационного множества I_o : $I_{ent} = \{I_o, x_1\}$. *Замечание 1.* Если переменные *u*, *y* измеряются с ошибкой, то к *u*, *y* следует применить процедуру фильтрации или сглаживания.

Выделим подмножество $I_g \subset I_{ent}$, соответствующее частному решению системы (1) (установившемуся состоянию). Множество $I_g = I_{ent} \setminus I_{tr}$ не содержит данные I_{tr} о переходном процессе в системе. Применим математическую модель

$$\hat{x}_{1}^{l}(t) = H^{\mathrm{T}}[1 \ u(t) \ y(t)]^{\mathrm{T}}$$
(4)

для выделения линейной составляющей в x_1 , где $H \in \mathbb{R}^3$ — вектор параметров модели. Переменная x_1 определена на интервале $J_g = J \setminus J_{tr}$.

Определим вектор Н как решение задачи

$$\min_{H} Q(e) \Big|_{e = \hat{x}_{1}^{l} - x_{1}} \to H_{opt}, \ Q(e) = 0, 5e^{2}.$$

Найдем прогноз для переменной x_1 на основе модели (4) $\forall t \in I_g$ и сформируем ошибку $e(t) = \hat{x}_1^l(t) - x_1(t)$. e(t) зависит от нелинейности $\varphi(y)$ в системе (1). Итак, получено множество $I_{N,g} = \{y(t), e(t) \ t \in J_g\}$. Далее будем применять обозначение y(t), полагая, что $y(t) \in I_{N,g}$.

Замечание 2. Выбор структуры модели (4) является одним из этапов структурной идентификации системы (1). Результаты моделирования показывают, что модель (4) применима в системах идентификации объектов со статическими нелинейностями. Решение задачи выбора структуры модели (4) для более сложного класса нелинейностей дано в работе [16].

Фазовый портрет *S*, описываемый функцией $\Gamma : \{y\} \to \{y'\}$, не всегда гарантирует принятие решения о нелинейных свойствах системы в условиях неопределенности. Перейдем в пространство $\mathcal{P}_{ye} = (y, e)$, которое будем называть структурным.

Рассмотрим функцию $\Gamma_{ey} : \{y\} \rightarrow \{e\}, \forall t \in J_g,$ которая на плоскости (y, e) описывает изменение структуры S_{ey} . Так как $I_{N,g}$ содержит информацию о $\varphi(y)$, то S_{ey} будет в обобщенном виде описывать изменение нелинейной функции. Идентификация структуры $\varphi(y)$ основана на использовании входа системы (1), удовлетворяющего определенным условиям. Он должен обладать свойством постоянства возбуждения (см. далее). Такой вход позволяет получить замкнутую структуру S_{ey} . В некоторых случаях может применяться также структура S_{ek} , которая описывается функцией $\Gamma_{ek} : \{k_s\} \rightarrow \{e\}$, где $k_s(t) \in R$ — коэффициент структурности [16]:

$$k_s(t) = \frac{e(t)}{y(t)}.$$

В результате применения модели (4) система (1) может быть представлена в виде

$$S_{y}:\begin{cases} \dot{\tilde{X}} = A\tilde{X} + I\zeta, \\ \tilde{y} = C^{\mathsf{T}}\tilde{X}, \end{cases} \quad S_{\varphi}: e = f(y, x_{1}), \qquad (5)$$

где $\tilde{X} \in \mathbb{R}^{q}$ — переменная, описывающая общее решение системы (1); $\zeta \in \mathbb{R}$ — ограниченное возмущение, возникающее в результате применения процедуры определения переменной *e*; $I = [0, 0, ..., 0, 1]^{\mathsf{T}}$, $I \in \mathbb{R}^{q}$.

Рассмотрим проблему идентифицируемости систем S_{ν}, S_{ω} .

Структурная идентифицируемость нелинейной системы

Рассмотрим систему S_{φ} и свойства $I_{N,g}$, позволяющие решить задачу структурной идентификации, а следовательно, и *h*-идентифицируемости. Анализ $I_{N,g}$ позволяет определить важные свойства информационного множества I_o .

Пусть выполняются следующие условия:

В1. Вход *u*(*t*) является постоянно возбуждаемым на интервале *J*.

В2. Анализ S_{ey} дает решение задачи оценки нелинейных свойств системы (1).

Определение 1. Вход u(t) будем называть представительным, если он удовлетворяет условиям B1, B2.

Пусть структура S_{ey} является замкнутой, и ее площадь не равна нулю. Обозначим $h(S_{ey})$ высоту S_{ey} , где высота понимается как расстояние между двумя точками противоположных сторон структуры S_{ey} .

Теорема 1 [18]. Пусть: 1) линейная часть системы (1) является устойчивой, а нелинейность $\varphi(\cdot)$ удовлетворяет условию (2); 2) вход u(t) является ограниченным, кусочно-непрерывным и постоянно возбуждаемым; 3) существует такое $\delta_S > 0$, что $h(S_{ey}) \ge \delta_S$. Тогда структура S_{ey} является идентифицируемой на множестве $I_{N,g}$.

Определение 2. Структура *S*_{*ey*}, имеющая указанные свойства, называется *h*-идентифицируемой.

Предположим, что *S*_{ey} является *h*-идентифицируемой. Особенности понятия *h*-идентифицируемости рассмотрены в работе [15]. Следует отметить, что может существовать "плохой" вход, который удовлетворяет условию постоян-

ства возбуждения. Такой вход может давать так называемую "незначимую" S_{ey} -структуру ($\mathcal{N}S_{ey}$ структура). Но при этом $\mathcal{N}S_{ey}$ -структура может быть *h*-идентифицируемой. Идентификация нелинейности в условиях неопределенности на основе анализа $\mathcal{N}S_{ey}$ -структуры может давать результаты, нетипичные для исследуемой системы.

Приведем условия существования *MS_{ev}*-структуры. Рассмотрим класс нелинейных функций, к которым применима операция гомотетии [19].

Пусть $S_{ey} = \mathcal{F}_{S_{ey}}^l \cup \mathcal{F}_{S_{ey}}^r$, где $\mathcal{F}_{S_{ey}}^l, \mathcal{F}_{S_{ey}}^r$ — левый и правый фрагменты S_{ey} . Определим для $\mathcal{F}_{S_{ey}}^l, \mathcal{F}_{S_{ey}}^r$ секущие

$$\gamma_S^r = a^r y, \ \gamma_S^l = a^l y, \tag{6}$$

где a^l , a^r — числа, определяемые с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

Теорема 2 [16]. Пусть: 1) структура S_{ey} является h-идентифицируемой и имеет вид $S_{ey} = F_{S_{ey}}^l \cup F_{S_{ey}}^r$; 2) секущие для $F_{S_{ey}}^l$, $F_{S_{ey}}^r$ описываются уравнениями (6). Тогда S_{ey} является $\mathcal{N}S_{ey}$ -структурой, если

$$||a^l| - |a^r|| > \delta_h, \tag{7}$$

где $\delta_h > 0$ — некоторое заданное число.

Замечание 3. *Ж_{еу}*-структуры часто являются результатом неадекватного применения входных воздействий.

Рассмотрим структуру S_{ey} . Введем обозначения: $\mathcal{D}_y = \text{dom}(S_{ey})$ — область определения S_{ey} , $D_y = D_y(\mathcal{D}_y) = \max y(t) - \min y(t)$ — диаметр \mathcal{D}_y . Пусть $u(t) \in U$, где U — допустимое множество входов для системы (1). Множество U содержит представительные входы.

Определение 3. Вход $u(t) \in U_S \subseteq U$ будем называть S-синхронизирующим систему (1), если на множестве $\{y(t), t \in J\}$ область определения \mathcal{D}_y структуры S_{ey} имеет максимальный диаметр D_y .

Рассмотрим эталонную структуру S_{ey}^{ref} , под которой понимаем структуру S_{ey} , позволяющую отразить все свойства функции $\varphi(y)$. Обозначим D_y^{ref} — диаметр $D_y(S_{ey}^{ref})$. D_y^{ref} существует для системы (1) с S-синхронизирующим входом.

Из определений 2, 3 следует, что если $S_{ey} \cong S_{ey}^{ref}$, то $|D_y - D_y^{ref}| \le \varepsilon_y$, где $\varepsilon_y \ge 0$, \cong — знак близости. Элементы подмножества U_S обладают свойством

$$\left| D_{y}(S_{ey}(u(t)\big|_{u\in U_{S}})) - D_{y}^{ref} \right| \leq \varepsilon_{y}.$$
(8)

Синхронизацию $u(t) \in U$ будем понимать как выбор такого входа $u_h(t) \in U$, который позволяет отразить все особенности S_{ey} , характерные для $\varphi(y)$. Это возможно только в случае, когда u(t) обеспечивает $\max D_y$. В отличие от понятия синхронизации, принятого в теории колебаний, здесь выбор свойств входа направлен на возможность получения структуры $S_{ey} \neq \mathcal{N}S_{ey}$. Такой подбор $u_h(t) \in U$ можно трактовать как синхронизацию между структурами модели и системы, поэтому выполнение условия $d_{h,y} = \max D_y$ приводит к *h*-идентифицируемости системы. Условие *h*-идентифицируемости принимает вид

$$\left| D_{y}(S_{ey}(u(t) \big|_{u \in U_{S}})) - d_{h,y} \right| \leq \varepsilon_{y}.$$
(9)

Условие появления *NSev*:

$$\left|D_{y}(S_{ey}(u(t)\big|_{u\in U\setminus U_{S}}))-d_{h,y}\right|>\varepsilon_{y}.$$
 (10)

Условие (9) можно интерпретировать как область близости

$$Q_D = \left| S_{ey}(u(t) \Big|_{u \in U_S}) - S_{ey}^{ref} \right|,$$

которая понимается как $|\dot{y}(t) - \dot{y}^{ref}(t)| \leq \varepsilon_y$, для почти $\forall t \geq \tilde{t}$.

Будем писать $\delta Q_D \leq \varepsilon_y$, если рассматриваемые структуры являются близкими. Если для Q_D выполняется условие $\delta Q_D \leq \varepsilon_y$ для почти $\forall t \geq t^*$, то область Q_D будем называть областью S-синхронизируемости на множестве входов $\{u_h(t)\}$ или областью структурной идентифицируемости на множестве $\{S_h(u_h(t))\}$, где S_h — фазовый портрет системы (1).

Итак, представлены два критерия (7) и (10) существования незначимой структуры S_{ey} . В этом случае структура системы S_{ϕ} , а следовательно, и система (1) являются структурно неидентифицируемыми.

Пусть вход $u_h(t)$ синхронизирует множество \mathcal{D}_y . Если u(t) является S-синхронизирующим, то будем писать $u_h(t) \in S$. Заметим, что для системы (1) существует конечное множество $\{u_h(t)\} \in S$. Выбор оптимального $u_h(t)$ зависит от $d_{h, y}$ и выполнения условия (9). Обеспечение условия (9) является одной из предпосылок структурной идентифицируемости системы (1).

Определение 4. Структуру *S*_{ey} (систему (1)) будем называть структурно идентифицируе-

мой или h_{δ_h} -идентифицируемой, если S_{ey} является h-идентифицируемой и выполняются условия $||a'| - |a''|| \leq \delta_h$, (8).

Из этого определения следует, что если система (1) h_{δ_h} -идентифицируема, то структура S_{ev} имеет максимальный диаметр области \mathcal{D}_v .

Пусть структура *S* содержит *m* особенностей. Под особенностями функции $\varphi(y)$ будем понимать как потерю непрерывности на интервале I_y^j , так и точки перегиба функции или экстремумы. Эти особенности являются признаками нелинейности исследуемой функции.

Определение 5. Модель (4) будем называть *SM*-идентифицирующей, если структура S_{ey} является h_{δ_h} -идентифицируемой.

является h_{δ_h} -идентифицируемой. **Теорема 3** [17]. Пусть: 1) вход и(t) является постоянно возбуждаемым и обеспечивает S-синхронизацию системы (1); 2) фазовый портрет S системы (1) содержит т особенностей; 3) S_{ey} -структура является h_{δ_h} -идентифицируемой и содержит фрагменты, соответствующие особенностям фазового портрета S. Тогда модель (4) является SM-идентифицирующей.

Теорема 3 показывает, что если модель (4) не является *SM*-идентифицирующей, то необходимо менять структуру модели (4) или информационное множество для ее построения.

Рассмотрим структуру S_{ey} . Обозначим c_s — центр структуры S_{ey} на множестве $J_y = \{y(t)\}$, а c_{D_y} — центр области \mathcal{D}_y .

Теорема 4. Пусть на множестве U_S синхронизирующих входов системы (1): 1) существует такое $\varepsilon \ge 0$, что $|c_S - c_{D_y}| \le \varepsilon$; 2) выполняется условие $||a^l| - |a^r|| \le \delta_h$, где a^l , a^r — коэффициенты секущих (7). Тогда система (1) является h_{δ_h} -идентифицируемой, а вход $u_h(t) \in S$.

Доказательство теоремы 4. Рассмотрим вход $u_h(t) \in U_S$. Так как выполняется условие $||a^l| - |a^r|| \leq \delta_h$, то структура S_{ey} является симметричной относительно точки c_S на плоскости (y, e). Следовательно, диаметры областей определения фрагментов $(\mathcal{F}_{S_{ey}}^l, \mathcal{F}_{S_{ey}}^r) \subset S_{ey}$ совпадают с точностью до некоторой величины $\varepsilon_{\mathcal{F}} \ge 0$ на множестве $\{y(t)\}$, т. е.

$$\left| D_{\mathcal{F}_{\mathcal{S}}^{l}}(\mathcal{O}_{\mathcal{F}_{\mathcal{S}}^{l}}) - D_{\mathcal{F}_{\mathcal{S}}^{r}}(\mathcal{O}_{\mathcal{F}_{\mathcal{S}}^{r}}) \right| \leq \varepsilon_{\mathcal{F}}, \tag{11}$$

где $\mathcal{D}_{\mathcal{F}_{S}^{l}}, \mathcal{D}_{\mathcal{F}_{S}^{r}}$ — области определения $\mathcal{F}_{S_{ey}}^{l}, \mathcal{F}_{S_{ey}}^{r}$. Тогда центр структуры S_{ey} равен $c_{D_{y}} = 0,5(D_{\mathcal{F}_{S}^{l}} + D_{\mathcal{F}_{S}^{r}})$. Так как $D_{\mathcal{F}_{S}^{l}} + D_{\mathcal{F}_{S}^{r}} = D_{y}$, то существует такое $\varepsilon \ge 0$, что $\begin{vmatrix} c_{S} - c_{D_{y}} \end{vmatrix} \le \varepsilon$. Выполнение условий 1), 2) гарантирует, что $u(t) = u_h(t)$ и $d_{h,y} = \max D_y$. Следовательно, при $u_h(t)$ структура S_{ey} будет содержать все особенности, характерные для функции $\varphi(y)$. Отсюда следует, что $u_h(t) \in S$, а система (1) является h_{δ_h} - идентифицируемой.

Может существовать некоторое подмножество $\{u_{h,i}(t)\} \subset U_S \subseteq U$ $(i \ge 1)$, элементы которого обладают свойством S-синхронизируемости. Каждому $u_{h,i}(t)$ соответствует структура $S_{ey,i}(u_{h,i})$ с диаметром $D_{y,i}$ области определения $\mathcal{D}_{y,i}$. Так как $u_{h,i}(t) \in S$, то диаметры $D_{y,i}$ будут обладать свойством $d_{h,\Sigma}$ -оптимальности. Пусть гипотетическая структура S_{ey} (структура S_{ey}^{ref}) системы (1) имеет диаметр $d_{h,\Sigma}$.

Определение 6. Структура $S_{ey,i}$ обладает свойством $d_{h, \Sigma}$ -оптимальности на множестве U_h , если существует такое $\varepsilon_{\Sigma} > 0$, что $|d_{h,\Sigma} - D_{y,i}| \leq \varepsilon_{\Sigma} \quad \forall i = \overline{1, \# U_h}.$

Определение 7. Если существует подмножество входов $\{u_{h,i}(t)\} = U_h \subset U$ $(i \ge 1)$, элементы которого $u_{h,i}(t) \in S$ и соответствующие им структуры $S_{ey,i}(u_{h,i})$ обладают свойством $d_{h, \Sigma}$ -оптимальности, то структуры $S_{ey,i}(u_{h,i})$ являются структурно неразличимыми на множествах $\{u_{h,i}(t)\}, J_y(u(t) = u_{h,i}(t)).$

Из определений 6, 7 следует, что в случае существования множества U_h оценку h_{δ_h} - идентифицируемости можно получить по любому входу $u(t) \subset U_h$.

Определение 8. Структуры $S_{ey,i}(u_{h,i})$, обладающие свойством $d_{h, \Sigma}$ -оптимальности, будем называть локально структурно идентифицируемыми на множестве U_h .

Структуру $S_{ey,i}(u_{h,i})$, обладающую свойством $d_{h, \Sigma}$ -оптимальности, будем обозначать $S_{ey,i}^{\Sigma}$, а локально структурно идентифицируемую структуру $S_{ey,i}(u_{h,i}) - S_{ey,i}^{LSI}$.

Итак, из изложенного выше следует, что структура S_{ey} является локально структурно идентифицируемой на множестве $U_h \subseteq U_S$, если

$$(\exists u_h \in \mathbf{S}), \forall \mathbf{TO} \ (S_{ey} \cong S_{ey}^{\Sigma}) \rightarrow S_{ey} \cong S_{ey}^{LSI}.$$
 (12)

Замечание 4. Здесь рассматривается случай симметричных нелинейностей. Поэтому остаются справедливыми сделанные выше замечания и условия существования \mathcal{NS}_{ey} -структуры. Если нелинейная функция не обладает свойством симметрии, то требуется дальнейшее исследование данной проблемы.

Определение 9. Структуры $S_{ey,i}$ ($u_i \notin U_S$), не обладающие свойством $d_{h, \Sigma}$ -оптимальности, будем называть локально структурно неидентифицируемыми на множестве U_h .

Замечание 5. Изложенный подход применим к нелинейной системе с динамическим законом изменения нелинейности, где требуется многоуровневый анализ идентифицируемости структур.

Идентифицируемость системы S_y рассмотрена в работе [21].

О влиянии постоянства возбуждения на идентифицируемость системы

В работе [21] показано влияние условия постоянства возбуждения (ПВ) на оценку идентифицируемости системы. Отмечено, что не любой вход, обладающий свойством ПВ, гарантирует структурную идентифицируемость системы. Ниже приводятся результаты, позволяющие оценить влияние этого условия.

Рассмотрим вход $u \in \mathcal{P}E_{\alpha}$, где $\mathcal{P}E_{\alpha}$ — свойство постоянства возбуждения

$$\mathcal{P}\mathcal{E}_{\alpha}$$
: $u^{2}(t) \geq \alpha$

справедливо для $\exists \alpha > 0$ и $\forall t \ge t_0$ на некотором интервале T > 0.

Пусть вход u(t) системы (1) обладает свойством $u(t) \in \mathcal{P}E\mathcal{F}_{\alpha,\omega_k}$, где

$$u_{k}(t): (u \in \mathcal{P}E_{\alpha}) \& (u \in \mathcal{P}F_{\omega_{k}}) \& (\overline{u_{h} \in \mathbf{S}}),$$

$$\mathcal{P}F_{\omega_{k}}: u_{k}(t) = \mathcal{R}F_{k}(\Omega_{k}),$$
(13)

 $\mathcal{RF}(\Omega_k)$ — модель $u_k(t)$ на основе ряда Фурье, заданного на конечном множестве $\Omega_k = \{\omega_1, \omega_2, ..., \omega_k\}$ частот.

Полагаем, что $u_k \in U_k$, $U_k = U \setminus U_S$. Следовательно, $u_k \notin S$, т. е. вход u_k не является S-синхронизирующим. Для $u_h \in S$ справедливо

$$u_{h}(t): (u_{h} \in \mathcal{P}E_{\alpha}) \& (u_{h} \in \mathcal{P}F_{\omega_{h}}) \& (u_{h} \in \mathbf{S}),$$

$$\mathcal{P}F_{\omega_{h}}: u_{h}(t) = \mathcal{R}\mathcal{F}_{h}(\Omega_{h}),$$

(14)

где $\Omega_h \neq \Omega_k$.

Из условий (13), (14) следует, что

$$(\mathcal{RF}_{h}(\Omega_{h}) \neq \mathcal{RF}_{k}(\Omega_{k})) \Rightarrow S_{ey}^{h} \neq S_{ey}^{k} \Rightarrow S_{ey}^{k} = \mathcal{NS}_{ey}.$$
(15)

Из (15) получаем

$$(\mathcal{D}_{y}(\mathcal{S}_{ey}^{h}) \neq \mathcal{D}_{y}(\mathcal{S}_{ey}^{k})) \Rightarrow [D_{y}(\mathcal{S}_{ey}^{h}) \ge D_{y}(\mathcal{S}_{ey}^{k})]. (16)$$

Так как области определения структур S_{ey}^h, S_{ey}^k не совпадают, а S_{ey}^h является $d_{h, \Sigma}$ -оптимальной на множестве U_h , то из неравенства (16) следует выполнение условия (10). Это условие говорит о том, что структура нелинейной части системы (1) с u_k имеет показатели, отличающиеся от структурно идентифицируемых параметров системы (1) с u_h .

Итак, условие постоянства возбуждения входа существенно влияет на h_{δ_h} -идентифицируемость S_{ω} -системы, а следовательно, и системы (1).

Из вышеизложенного следует

Теорема 5. Пусть для системы (1): 1) вход u_k удовлетворяет условию (13); 2) входу u_k соответствует структура S_{ey}^k ; 3) существует такой вход $u_h \in S$, что выполняется условие (14); 4) выполняются условия (15), (16). Тогда S_{φ} -система является структурно неидетифицируемой по входу u_k , а структурные параметры S_{φ} -системы не соответствуют системе (1) с идентифицируемой структурой S_{ey}^h .

Как оценить степень неидентифицируемости S_{ϕ} -системы? В условиях априорной неопределенности это сделать непросто. Далее предлагается подход, позволяющий получить количественные оценки для этого показателя.

Пусть для системы (1) построен фазовый портрет *S*. Известно, что области определения структур *S* и *S*_{ey} совпадают. Поэтому диаметр $D(S_{ey})$ области определения *S*_{ey} известен. Рассмотрим множество входов {*u_i*(*t*)}, имеющих свойство $\mathcal{P}E_{\alpha}$. Для каждого *u_i*(*t*) построим структуру *S*_{ey, *i*} и определим *D*_{y, *i*}(*S*_{ey, *i*}). Положим $d_{h,y} = \max_{u_i} |D_y(\mathcal{D}(S_{ey,i}))|$ и соответствующий вход обозначим *u_h*. Для всех входов $\mathcal{U} = \{u_i(t)\} \setminus \{u_h\}$ найдем диаметры $d_{y,j} = |D_{y,j}(\mathcal{D}[S_{ey,j}(u_j \in \mathcal{U})])|$. Так как *u_h* \in S, то *d_{h,y}* > *D_{y,j}* $\forall j \ge 1$. Тогда степень неидентифицируемости можно оценить следующим образом:

$$SI_{j} = SI(S_{ey,j}) = \frac{d_{h,y} - d_{y,j}}{d_{h,y}}.$$
 (17)

Из соотношения (17) следует, что система (1) является структурно идентифицируемой, если $SI_j \rightarrow 0$. Область структурной идентифицируемости Q_D определяется условием (9).

Замечание 6. Если выделить фрагменты $\mathcal{F}_{S}^{l}, \mathcal{F}_{S}^{r}$ на фазовом портрете *S*, то предварительную оценку неидентифицируемости системы можно определить как

$$SI = SI(S) = \frac{d_y^l(\mathcal{F}_S^l)}{d_y^r(\mathcal{F}_S^r)},$$

где $d_y^l(\mathcal{F}_s^l), d_y^r(\mathcal{F}_s^r)$ — диаметры фрагментов $\mathcal{F}_s^l, \mathcal{F}_s^r$. Система (1) будет структурно идентифицируема, если $SI(s) \leq O(1)$, где O(1) — окрестность 1.

В отличие от линейных систем на СИ нелинейных систем может оказывать влияние амплитуда входа u(t). Модифицируем условия (13), (14):

$$u_{k}(t): (u \in \mathcal{P}E_{\alpha}) \& (u \in \mathcal{P}F_{\omega_{k}}) \& (\overline{u_{h} \in \mathbf{S}}), \\ \mathcal{P}F_{\omega_{k}}: u_{k}(t) = \mathcal{R}F_{k}(G_{k}, \Omega_{k});$$
(13a)

$$u_{h}(t): (u_{h} \in \mathcal{P}E_{\alpha}) \& (u_{h} \in \mathcal{P}F_{\omega_{h}}) \& (u_{h} \in \mathbf{S}),$$

$$\mathcal{P}F_{\omega_{h}}: u_{h}(t) = \mathcal{R}F_{h}(G_{h}, \Omega_{h}),$$
 (14a)

где G_k , G_h — векторы параметров моделей RF_k , RF_h .

Представим модели RF_k и RF_h в виде

$$\begin{split} & \operatorname{RF}_{h}(G_{h},\Omega_{h}) = g_{h}\widetilde{\operatorname{RF}_{h}}(\tilde{G}_{h},\Omega_{h}), \\ & \operatorname{RF}_{k}(G_{k},\Omega_{k}) = g_{k}\widetilde{\operatorname{RF}_{k}}(\tilde{G}_{k},\Omega_{k}), \end{split}$$

где $\widetilde{\mathrm{RF}}_{h}(\widetilde{G}_{h},\Omega_{h}), \quad \widetilde{\mathrm{RF}}_{k}(\widetilde{G}_{k},\Omega_{k}) - \mathrm{модифика-}$ ции моделей (13), (14); $g_{h} = \max_{i} g_{h,i}, \quad i = \overline{1,\#\Omega_{h}},$ $g_{h,i} - \mathfrak{I}$ элемент G_{h} ; $g_{k} = \max_{i} g_{k,i}, \quad i = \overline{1,\#\Omega_{k}},$ $g_{p} \ (p = k, h)$ будем называть обобщенной амплитудой входа.

Условие (15) преобразуем к виду

$$g_h \widetilde{\operatorname{RF}}_h(\widetilde{G}_h, \Omega_h) \neq g_k \widetilde{\operatorname{RF}}_k(\widetilde{G}_k, \Omega_k).$$

Так как вход $u_h \in S$, то $g_h \ge g_k$. Это следует из того, что

$$D_h(\mathcal{S}(u_h)) \ge D_k(\mathcal{S}(u_k)) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \left| \widetilde{\mathrm{RF}}_h(\widetilde{G}_h, \Omega_h) \right| \ge \left| \widetilde{\mathrm{RF}}_k(\widetilde{G}_k, \Omega_k) \right|,$$

а модель $\widetilde{\mathrm{RF}}_h(\widetilde{G}_h,\Omega_h)$ аппроксимирует вход, обеспечивающий S-синхронизацию системы (1).

Из $S(u_h) \Rightarrow S_{ey}^h$ получаем, что диаметр $D_h(S_{ey}^h)$ является $d_{h, \Sigma}$ -оптимальным. Структура S_{ey}^k в силу (14а) таким свойством не обладает. Следовательно, $D_k(S_{ey}^k)$ может давать только вход $u_k \notin S$, имеющий меньшую обобщенную амплитуду.

Теорема 6. Пусть для системы (1): 1) вход u_k удовлетворяет условию (13а); 2) входу u_k со-ответствует структура S_{ey}^k ; 3) существует

такой вход $u_h \in S$, что выполняется условие (14а); 4) выполняются условия (15), (16). Тогда S_{φ} -система является структурно неидетифицируемой по входу u_k , а структурные параметры S_{φ} -системы не соответствуют системе (1) с идентифицируемой структурой S_{ey}^h , если $g_h \ge g_k$.

Пример 1. Рассмотрим нелинейную систему с гистерезисом Бука—Вена (система *S*_{BW}) [20]

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x, z, t) = f(t),$$
 (18)

$$F(x, z, t) = \alpha k x(t) + (1 - \alpha) k dz(t), \qquad (19)$$

$$\dot{z} = d^{-1}(a\dot{x} - \beta |\dot{x}| |z|^n \operatorname{sign}(z) - \gamma \dot{x} |z|^n), \quad (20)$$

где m > 0 — масса; c > 0 — демпфирование; F(x, z, t) — восстанавливающая сила, $d > 0, n > 0, k > 0, \alpha \in (0, 1), u(t) = f(t)$ — возбуждающая сила; a, β, γ — некоторые числа; y = x — выход системы. Здесь (20) является уравнением Бука—Вена.

 S_{BW} -система моделировалась со следующими параметрами: n = 1,5; c = 2; m = 1; $\beta = 0,5$; $\alpha = 0,7$; k = 0,6; d = a = 1; x(0) = 1; $\dot{x}(0) = 0$; z(0) = 1. В результате было сформировано множество данных $I_o = \{u(t), y(t), t \in [0; t_e]\}$ ($t_e < \infty$) о системе. Рассматривались четыре варианта входа u(t):

$$u_{0}(t) = 2 - 2\sin(0, 15\pi t),$$

$$u_{1}(t) = 2 - 2\sin(0, 35\pi t),$$

$$u_{2}(t) = 2 - 2\sin(0, 5\pi t),$$

$$u_{3}(t) = 2 - 2\sin(0, 15\pi t) + 0, 2\sin(0, 35\pi t).$$

(21)

Обозначим S_i , где $i = \overline{0,3}$, — фазовые портреты системы с указанными входами. Область определения фазового портрета совпадает с областью определения гистерезиса (рис. 1 для случая S_0).

Вычислим диаметры области определения фазового портрета

$$D_{y,0}(s_0) = 3,75, D_{y,1}(s_1) = 1,728, D_{y,2}(s_2) = 1,08, D_{y,3}(s_3) = 3,967.$$
(22)

Эти результаты получены для установившегося режима работы система *S*_{BW}.

Анализ показал, что $u_0(t) \in S$. Поэтому систему S_{BW} с фазовым портретом S_0 принимаем за эталон и полагаем, что $d_{h,v} = D_{v,0}(S_0)$. Тогда



Рис. 1. Фазовый портрет и выход гистерезиса системы с u_0 Fig. 1. Phase portrait and hysteresis of system with u_0

для степени неидентифицируемости системы для различных *u_i* получаем

 $SI_1 = 0,549, SI_2 = 0,718, SI_3 = -0,035.$ (23)

Из (23) следует, что S_{BW} -система с входами u_1 , u_2 является структурно неидентифицируемой, а с входом u_3 — структурно неразличима с входом u_0 .

Итак, из (23) следует, что структуры $S_{ey,1}(u_1)$, $S_{ey,2}(u_2)$ являются структурами класса $\mathcal{N}S_{ey}$, а структура $S_{ey,3}(u_3)$ принадлежит классу S_{ey}^{LSI} .

Полученные результаты подтверждает рис. 2 (см. вторую сторону обложки). На нем в интегрированном виде представлены выходы *y_i* систе-





мы. Прямоугольные области представляют собой оценки диаметров в указанных пределах. Несмотря на некоторое отличие от результатов (22), они подтверждают оценки (23).

Итак, что частотные свойства входа существенно влияют на идентифицируемость системы. Особенно это актуально для нелинейной части, где даже незначительное изменение свойств входа сказывается на возможности оценки структурных параметров гистерезиса. Для подтверждения сделанных выводов на рис. 3 показаны выходы модели Бука—Вена (20) при различных входах. Из рис. 3 (см. вторую сторону обложки) следует, что *u*(*t*) изменяет наблюдаемые области определения и значений гистерезиса.

На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) показана область Q_D . Она подтверждает сделанные выше выводы. На рис. 4 применяются следующие обозначения: $1 - s_0$, $2 - s_2$, $3 - s_1$, $4 - s_3$.

О структурной идентифицируемости системы с двумя нелинейностями

Рассмотрим случай, когда система (1) содержит две нелинейности

$$B_{\phi}\phi(y) = B_{\phi,1}\phi_1(y) + B_{\phi,2}\phi_2(y), \qquad (24)$$

где $\varphi_i(y)$ удовлетворяет условию (2).

Этот случай, как и случай i > 2, является более сложным и имеет свои особенности. Предварительный анализ показывает, что в данном случае для принятия решения об идентифицируемости S_{ϕ} -системы можно применить подход, изложенный в разделе "Структурная идентифицируемость нелинейной системы". Но анализа свойств структуры S_{ey} может оказаться недостаточно. Кроме того, может возникнуть случай, когда S_{ey} является частично $\mathcal{N}_{S_{ey}}$ -структурой. Рассмотрим этот случай.

Пусть получена S_{ey} -структура (рис. 5 отражает установившееся состояние системы) для системы (1), (24) второго порядка. Применим теорему 2 и получим, что не выполняется условие (7). Следовательно, $S_{ey} = \mathcal{N}S_{ey}$.

Из рис. 5 следует, что одна нелинейность идентифицируема, а вторая нет. Для принятия решения рассмотрим отображение $\Gamma_{yk}: \{y\} \rightarrow \{k_{ey'}\}, \quad k_{ey'} = \frac{e}{y'}. \quad \Gamma_{yk}$ соответствует структура S_{ky} (рис. 6).

Из анализа S_{ky} следует, что нелинейность (обозначим ее φ_1) доминирует и является иден-



Рис. 6. Структура S_{ky} Fig. 6. Framework S_{ky}



Fig. 7. Frameworks S, S_{ey}

тифицируемой, а нелинейность φ_2 неидентифицируема. S_{ey} -структуру можно представить в виде $S_{ey} = S_{ey}^{id} \cup \mathcal{N}S_{ey}$, где $S_{ey}^{id} = S_{ey}(\varphi_1)$, $\mathcal{N}S_{ey} = S_{ey}(\varphi_2)$.

Определение 10. Система (1), (24) называется частично структурно идентифицируемой или идентифицируемой на уровне φ_1 при $u \notin S$, если фрагмент S_{ey}^{id} структуры $S_{ey} = S_{ey}^{id} \cup S_{ey}(\varphi_2)$ является *h*-идентифицируемым, и неидентифицируемой на уровне φ_2 , если $S_{ey}(\varphi_2) = \mathcal{N}S_{ey}$.

Определение 11. Подсистема S_{φ} системы (1), (24) называется идентифицируемой при $u \in S$, если фрагменты $S_{ey}(\varphi_1)$, $S_{ey}(\varphi_2)$ структуры $S_{ey} = S_{ey}(\varphi_1) \cup S_{ey}(\varphi_2)$ являются *h*-идентифицируемыми. **Определение 12.** Подсистема S_{φ} системы (1), (24) называется структурно идентифицируемой при $u \in S$, если фрагменты $S_{ey}(\varphi_1)$, $S_{ey}(\varphi_2)$ структуры $S_{ey} = S_{ey}(\varphi_1) \cup S_{ey}(\varphi_2)$ являются *h*-идентифицируемыми и выполняются условия теоремы 4 для каждого фрагмента $S_{ey}(\varphi_1)$, $S_{ey}(\varphi_2)$.

Для оценки идентифицируемости S_{φ} -системы следует выполнить фрагментацию структуры S_{ey} , применив операцию сглаживания на множестве определения фрагмента $S_{ey}(\varphi_1)$. В результате получим оценку $\hat{S}_{ey}(\varphi_2)$ структуры $S_{ey}(\varphi_2)$. Оценка структуры $S_{ey}(\varphi_1)$ формируется на основе применения операции $\hat{S}_{ey}(\varphi_1) = S_{ey} \setminus \hat{S}_{ey}(\varphi_2)$.

Анализ структурной идентифицируемости системы (1) представляет собой нетривиальную задачу, если нелинейности не удовлетворяют условию (24). В этом случае оценка h_{δ_h} - идентифицируемости системы требует расширения подхода, предложенного в предыдущих разделах. Покажем это на примере.

Пример 2. Рассмотрим систему, состоящую из нелинейного привода и управляемого объекта. Управляемый объект имеет линейное и квадратичное трение. Привод описывается нелинейной функцией с насыщением. Система уравнений имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -c_1 \varphi_1 (x_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ c \varphi_2 (u) \end{bmatrix}, \quad (25)$$
$$y = x_1,$$

где $\varphi_1(x_2) = -c_1 x_2^2 \operatorname{sign}(x_2)$ — квадратичное трение; $\varphi_2(u) = \operatorname{sat}(u)$ — сухое трение; $x = x_1$ угол поворота вала управляемого объекта; u ток возбуждения обмотки привода; y — выход; $c_1 = 2, c = 1$.

Для идентификации доступна информация $I_o = \{u(t), y(t), t = [0, t_k]\}, t_k < \infty$. Пусть $u(t) = 3\sin(0,1\pi t)$. Построим структуры *S*, *S*_{ev} (рис. 7).

Применение результатов раздела "Структурная идентифицируемость нелинейной системы" показывает, что система является структурно идентифицируемой. Но принять решение о структуре нелинейностей не удается. Задача усложняется тем, что вход является нелинейным. Анализ структуры *S* показывает, что вход $\varphi_2(u)$ на интервале $\overline{J}_y = [4; 8, 5]$ является постоянным и для него не выполняется условие ПВ. Из рис. 7 следует, что можно положить $\varphi_2(u) = \operatorname{sat}(u)$. В дельнейшем в качестве рабочего интервала по *y* будем использовать $J_y = [2; 4] \lor [8, 5; 10]$. С учетом этого можно отметить, что применение модели (4) (структура S_{ey}) является неэффективным. Поэтому перейдем к анализу зависимостей \dot{x}_2 от доступных переменных. Анализ показывает, что коэффициенты детерминации между \dot{x}_2 и x_2 , *y* соответственно равны $r_{x_2\dot{x}_2}^2 = 0,995$; $r_{y\dot{x}_2}^2 = 0,916$. Поэтому считаем, что существует зависимость между \dot{x}_2 и x_2 . Воспользуемся методом иерархического погружения для уточнения структурных связей [22]. Реализуем следующие этапы.

1. Исключение влияния функции $\varphi_2(u)$ на \dot{x}_2 . Пусть параметр выхода $\varphi_2(u)$ в область насыщения равен 1,8, а линейная часть на интервале [-1,8; 1,8] пропорциональна *и*. Обозначим полученную функцию $\hat{\varphi}_2(u)$:

$$\hat{\varphi}_2(u) = \begin{cases} 1, 8, & \text{если } u > 1, 8, \\ u, & \text{если } u \leq 1, 8, \\ -1, 8, & \text{если } u < -1, 8. \end{cases}$$

Математическая модель имеет вид

$$\hat{\dot{x}}_2 = 0.147 \hat{\phi}_2(u) + 0.433, \ r_{\hat{\phi}_2 \dot{x}_2}^2 = 0.99.$$
 (26)

2. Исключение влияния *у*. Введем невязку $\varepsilon = \dot{x}_2 - \hat{x}_2$ и получим модель

$$\hat{\varepsilon} = -0,2038y + 0,933, r_{\gamma\varepsilon}^2 = 0,95.$$
 (27)

3. Введем невязку $\pi = \varepsilon - \hat{\varepsilon}$ и аппроксимируем ее линейной моделью

$$\hat{\pi}_1 = 0,424x_2 - 0,559, \ r_{x_2\pi}^2 = 0,97.$$
 (28)

Из (28) следует, что модель является адекватной. Для повышения точности аппроксимации $\pi(t)$ применим модель

$$\hat{\pi}_2 = -0.37 |x_2| x_2 - 0.45, r_{|x_2|x_2,\pi}^2 = 0.97.$$
 (29)

Замечание 7. При реализации метода иерархического погружения на каждом этапе предварительно проверяется условие структурной идентифицируемости получаемой геометрической структуры, прежде чем синтезировать соответствующую модель. Этот этап является предпосылкой для получения адекватной модели.

Итак, проведенный анализ подтверждает возможность структурной идентификации

нелинейной части системы (25) и ее идентифицируемость на интервале J_y . Показано, что применение модели (4) зависит от структуры системы (структура S_{ey}). Поэтому предложить общий подход к выбору структуры модели в общем случае не удается. Ее вид во многом зависит от специфики рассматриваемой системы. Этот вывод иллюстрирует рассматриваемый пример. Он подтверждает многогранность и сложность рассматриваемой проблемы.

Заключение

Введено понятие S-синхронизируемости входа. Выполнение условия S-синхронизацируемости входа является основой структурной идентифицируемости и структурной идентификации нелинейной системы. Исследовано влияние входа на возможность оценки структурных параметров нелинейности. Введено понятие незначимой структуры и показана его роль в задаче оценки идентифицируемости системы. Получены условия локальной идентифицируемости и неидентифицируемости системы. Введена степень идентифицируемости системы и показана возможность ее оценки в условиях неопределенности. Исследовано влияние условия постоянства возбуждения входа на возможность структурной идентифицируемости системы. Предложен способ вычисления области идентифицируемости в условиях неопределенности. Рассмотрена структурная идентифицируемость системы с двумя нелинейностями. Приведены условия частичной структурной идентифицируемости нелинейной системы с двумя нелинейностями.

Список литературы

1. **Kalman R. E.** On the general theory of control systems // Proceeding first IFAC Congress on Automatic Control, Moscow, 1960; Butterworths, London, 1961. Vol. 1. P. 481–492.

2. Lee R. C. K. Optimal estimation, identification, and control. MIT Press, Cambridge, Mass, 1964. 176 p.

3. Elgerd O. I. Control systems theory. N. Y.: McGraw-Hill, 1967. 562 p.

4. **Walter E.** Identifiability of state space models. Berlin. Germany: Springer-Verlag, 1982. 197 p.

5. Audoly S., D'Angio L., Saccomany M. P., Cobelli C. Global identifiability of linear compartmental models – a computer algebra algorithm // IEEE Trans. Automat. Contr. 1998. Vol. 45. P. 36–47.

6. **Авдеенко Т. В.** Идентификация линейных динамических систем с использованием концепции сепараторов параметрического пространства // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1(3). С. 16—23.

7. **Бодунов Н. А.** Введение в теорию локальной параметрической идентифицируемости // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2012. № 2. 137 с.

8. Балонин Н. А. Теоремы идентифицируемости. СПб.: Изд-во "Политехника", 2010. 48 с.

9. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

10. Stigter J. D., Peeters R. L. M. On a geometric approach to the structural identifiability problem and its application in a water quality case study // Proceedings of the european control conference 2007 Kos, Greece, July 2–5. 2007. P. 3450–3456.

11. Chis O.-T., Banga J. R., Balsa-Canto E. Structural identifiability of systems biology models: a critical comparison of methods // PLOS ONE. Nov. 2011. Vol. 6, Iss. 4. P. 1–16.

12. Saccomani M. P., Thomaseth K. Structural vs practical identifiability of nonlinear differential equation models in systems biology. Bringing mathematics to life // Dynamics of mathematical models in biology. Ed. A. Rogato, V. Zazzu, M. Guarracino. Springer. 2010. P. 31–42.

13. Villaverde A., Barreiro A., Papachristodoulou A. Structural identifiability of dynamic systems biology models // PLOS Computational Biology. 2016. Vol. 12, N. 10. P. 1–22.

14. Raue A., Karlsson J., Saccomani M. P., Jirstrand M., Timmer J. Comparison of approaches for parameter identifiability analysis of biological systems // Bioinformatic. 2014. Vol. 30, N. 10. P. 1440–1448. 15. **Karabutov N.** About structural identifiability of nonlinear dynamic systems under uncertainty // Global journal of science frontier research: A Physics and space science. 2018. Vol. 18, Iss. 11 (vers. 1.0). P. 51-61.

16. **Karabutov N.** Structural identification of dynamic systems with hysteresis // International journal of intelligent systems and applications. 2016. Vol. 8, N. 7. P. 1-13.

17. **Karabutov N.** Structural methods of design identification systems // In Nonlinearity problems, solutions and applications. Vol. 1. Ed. L. A. Uvarova, A. B. Nadykto, A. V. Latyshev. New York. Nova Science Publishers, Inc. 2017. P. 233–274.

18. **Karabutov N.** Structural identification of nonlinear dynamic systems // International journal of intelligent systems and applications. 2015. Vol. 7, N. 9. P. 1-11.

19. Choquet G. L'enseignement de la geometrie. Paris: Hermann, 1964. 173 p.

20. **Ismail M., Ikhouane F., Rodellar J.** The hysteresis Bouc-Wen model, a survey // Arch Comput Methods Eng. 2009. Vol. 16. P. 161–188.

21. **Карабутов Н. Н.** S-синхронизация, структурная идентифицируемость и идентификация нелинейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 6 (2020). С. 323—336.

22. **Карабутов Н. Н.** Структурный анализ и модификации системы с гистерезисом Бука-Вена // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 16. № 2. 2020. С. 57—64.

On Role of S-Synchronizability and Excitation Constancy in Structural Identifiability Problem of Nonlinear Systems

N. N. Karabutov, kn22@yandex.ru,

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

Corresponding author: Karabutov Nikolay N., DTS, Professor, MIREA—Russian Technological University, Moscow,119454, Russian Federation, e-mail: kn22@yande.ru

Accepted on October 20, 2020

Abstract

A class of dynamical systems with a single nonlinearity considered. The S-synchronizability concept of input introduced. It is shown that S-synchronizability is a condition for the structural identifiability of a nonlinear system. The decisionmaking on structural identifiability based on the properties analysis for a special class of geometric frameworks. Geometric frameworks reflect properties of the nonlinear dynamic system. Requirements for the model allowed us to obtain a geometric structure based on the input and output data considered. The constant excitation effect of input on the structural identifiability of the system is studied. The constant excitation effect of input studied on the structural identifiability of the system. Nonfulfillment the constant excitation condition gives a nonsignificant geometric framework. Various types of structural identifiability based on structure analysis considered. The concept of d-optimality described properties of the geometric structure introduced. Conditions for non-identifiability of nonlinear system structure obtained if the d-optimality of the geometric framework does not hold for the given properties of the input. Methods for estimating identifiability of the system and determining the identifiability area under uncertainty proposed. The proposed approach is generalized to the system having two nonlinearities. Conditions for partial structural identifiability obtained. Structural identifiability features of this class systems noted. The method for estimating the structure of the system proposed when the condition of structural identifiability satisfied. It has shown how the phase portrait used to estimate the system non-identifiability. A method proposed for constructing the structural identifiability domain of the system. Proposed methods and procedures are applied to study systems with Bouc-Wen hysteresis and two nonlinearity.

Keywords: identifiability, geometric structure, structural identification, S-synchronizability, a system with double nonlinearity, degree of structural non-identifiability.

For citation:

Karabutov N. N. On Role of S-Synchronizability and Excitation Constancy in Structural Identifiability Problem of Nonlinear Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2021, vol. 22, no. 2, pp. 59–70.

DOI: 10.17587/mau.22.59-70

References

1. Kalman R. E. On the general theory of control systems. Proceeding first IFAC Congress on Automatic Control, Moscow, 1960; Butterworths, London, 1961, vol. 1, pp. 481–492.

2. Lee R. C. K. Optimal estimation, identification, and control, MIT Press, Cambridge, Mass, 1964. 176 p.

3. Elgerd O. I. Control systems theory, N. Y., McGraw-Hill, 1967. 562 p.

4. Walter E. Identifiability of state space models, Berlin, Germany, Springer-Verlag, 1982, 197 p.

5. Audoly S., D'Angio L., Saccomany M. P., Cobelli C. Global identifiability of linear compartmental models – a computer algebra algorithm, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1998, vol. 45, pp. 36–47.

6. Avdeenko T. V. Identification of linear dynamic systems with use parametrical space separators, *Automatics and Program Engineering*, 2013, no. 1(3), pp. 16–23 (in Russian).

7. **Bodunov N. A.** Introduction to the theory of local parametrical identifiability, *Differential Equations and Management Processes*, 2012, no. 2, 137 p.

8. **Balonin N. A.** *Theorems of identifiability.* St. Petersburg, Politekhnika publishing house, 2010, 49 p.

9. **Reference** book on automatic control theory, Ed. A. A. Krasovsky, Moscow, Nauka, 1987, 712 p.

10. Stigter J. D., Peeters R. L. M. On a geometric approach to the structural identifiability problem and its application in a water quality case study, *Proceedings of the European Control Conference 2007 Kos, Greece, July 2–5, 2007*, pp. 3450–3456.

11. Chis O.-T., Banga J. R., Balsa-Canto E. Structural identifiability of systems biology models: a critical comparison of methods, *PLOS ONE*, 2011, vol. 6, iss. 4, pp. 1–16.

12. Saccomani M. P., Thomaseth K. Structural vs practical identifiability of nonlinear differential equation models in systems

biology. Bringing mathematics to life, *Dynamics of Mathemati*cal Models in Biology. Ed. A. Rogato, V. Zazzu, M. Guarracino. Springer, 2010, pp. 31–42.

13. Villaverde A., Barreiro A., Papachristodoulou A. Structural identifiability of dynamic systems biology models, *PLOS Computational Biology*, 2016, vol. 12, no. 10, pp. 1–22.

14. Raue A., Karlsson J., Saccomani M. P., Jirstrand M., Timmer J. Comparison of approaches for parameter identifiability analysis of biological systems, *Bioinformatic*, 2014, vol. 30, no. 10, pp. 1440–1448.

15. **Karabutov N.** About structural identifiability of nonlinear dynamic systems under uncertainty, *Global Journal of Science Frontier Research: A Physics and Space Science*, 2018, vol. 18, iss. 11 (vers. 1.0), pp. 51–61.

16. **Karabutov N.** Structural identification of dynamic systems with hysteresis, *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2016, vol. 8, no. 7, pp. 1–13.

17. **Karabutov N.** Structural methods of design identification systems. In *Nonlinearity Problems, Solutions and Applications. Vol. 1.* Ed. L. A. Uvarova, A. B. Nadykto, A. V. Latyshev. New York. Nova Science Publishers, Inc. 2017, pp. 233–274.

18. **Karabutov N.** Structural identification of nonlinear dynamic systems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2015, vol. 7, no. 9, pp. 1–11.

19. Choquet G. L'enseignement de la geometrie. Paris: Hermann, 1964. 173 p.

20. Ismail M., Ikhouane F., Rodellar J. The hysteresis Bouc-Wen model, a survey, *Arch Comput Methods Eng*, 2009, vol. 16, pp. 161–188.

21. **Karabutov N. N.** S-synchronization structural identifiability and identification of nonlinear dynamic systems, *Mekhatronika, Av*-*tomatizatsiya, Upravlenie.* 2020, vol. 21, no. 6 (2020), pp. 323–336.

22. **Karabutov N. N.** Structural analysis and modifications of system with Bouc-Wen hysteresis, *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 57–64.

31 мая – 4 июня 2021 г., ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Международная научная мультиконференция

"КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ" "CYBER-PHYSICAL SYSTEMS DESIGN AND MODELLING" (CYBERPHY-2021) (SCOPUS, SPRINGER)

Секции

1. Cyber-Physical Systems: digital technologies and applications (Кибер-физические системы: цифровые технологии и приложения) 2. Cyber-physical systems: design and application for Industry 4.0 (Кибер-физические системы: проектирование и применение для

Индустрии 4.0)

3. Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control (Кибер-физические системы: моделирование и интеллектуальное управление)

4. Society 5.0: Cyberspace for advanced human-centered society (Общество 5.0: киберпространство для развитого общества, ориентированного на человека)

ХХХІV Международная научная конференция

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ - ММТТ-34 (РИНЦ, DOI)

Секции

1. Качественные и численные методы исследования дифференциальных и интегральных уравнений

2. Оптимизация, автоматизация и оптимальное управление технологическими процессами

3. Математическое моделирование технологических и социальных процессов

4. Математическое моделирование и оптимизация в задачах САПР, аддитивных технологий, цифрового производства

5. Математические методы в задачах радиотехники, радиоэлектроники и телекоммуникаций, геоинформатики, авионики и космонавтики

6. Математические методы и интеллектуальные системы в робототехнике и мехатронике

7. Математические методы в медицине, биотехнологии и экологии

8. Математические методы в экономике и гуманитарных науках

9. Информационные и интеллектуальные технологии в технике и образовании

10. Математические и инструментальные методы технологий Индустрии 4.0

11. Обсуждение квалификационных работ

Подача заявок на участие с 15 декабря 2020 г.

Подробная информация о конференции и условиях участия в ней размещается на сайте http://mmtt.sstu.ru/

В. И. Ловчаков, д-р техн. наук, проф., lovvi50@mail.ru, О. А. Шибякин, аспирант, yutiiop@gmail.com, Тульский государственный университет

Модифицированные фильтры Баттерворса в решении обратной задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов

Для линейных стационарных одномерных объектов управления рассматривается обратная задача аналитического конструирования оптимальных регуляторов (AKOP), которая состоит в определении весовых коэффициентов квадратичного функционала оптимальности процесса управления, обеспечивающих замкнутой системе регулирования заданные значения времени переходных процессов и перерегулирования. Время переходного процесса (время регулирования) синтезируемой системы понимается в смысле классической теории автоматического управления и определяется с использованием "трубки", значение которой принимается, в отличие от известных работ, равным требуемому (желаемому) небольшому значению перерегулирования системы в несколько процентов (2...5%). Равенство процентных величин, характеризующих "трубку" и желаемое перерегулирование синтезируемой системы, является необходимым условием максимального быстродействия линейных динамических систем и, соответственно, обеспечивает однозначность решения рассматриваемой обратной задачи АКОР в классе быстродействующих систем.

Предлагаемый способ решения предусматривает преобразование задачи AKOP к канонической форме, в которой объект управления описывается матричным дифференциальным уравнением в форме Фробениуса, а функционал качества определяется как интеграл от суммы произведений канонических фазовых координат объекта, а также квадрата сигнала управления с соответствующими весовыми коэффициентами. Показано, что решение обратной канонической задачи AKOP определяется значениями только трех ненулевых весовых коэффициентов критерия, причем один из них имеет единичное значение. Значения двух других коэффициентов предлагается находить в процессе моделирования синтезированной оптимальной системы управления из условий обеспечения для нее заданного времени регулирования и заданного перерегулирования.

Для получения числовых оценок двух основных весовых коэффициентов квадратичного критерия качества рассмотрено решение задачи АКОР при предельном увеличении значений этих весовых коэффициентов. Предельным решением задачи АКОР определены передаточные функции динамических систем с предельным (максимальным) быстродействием, которые имеют заданное перерегулирование 4,321 %. Динамические системы, описываемые данными передаточными функциями, названы модифицированными фильтрами Баттерворса в связи с тем, что известные фильтры Баттерворса получаются как их частный случай при нулевом значении определенной константы. Представлены параметры и показатели динамики этих фильтров до восьмого порядка. С использованием показателей фильтров Баттерворса установлены числовые оценки весовых коэффициентов квадратичного критерия качества. Передаточные функции модифицированных фильтров Баттерворса использовать в качестве эталонных передаточных функций синтезируемых быстродействующих систем управления.

Ключевые слова: линейный одномерный объект, быстродействие, перерегулирование, аналитическое конструирование оптимального регулятора, фильтры Баттерворса

Введение

Как известно [1-4], к линейно-квадратичным задачам управления, или задачам аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), относятся задачи структурно-параметрического синтеза линейных систем управления на основе минимизации интегрального квадратичного функционала (критерия) качества. Задачи данного типа впервые были рассмотрены и решены в работах Р. Э. Калмана [5] и А. М. Летова [6]. В настоящее время метод АКОР Калмана-Летова получил признание специалистов автоматического управления и стал уже классическим методом синтеза систем управления [3, 4]. Это явилось следствием широкого применения интегральных квадратичных критериев каче-

ства процессов управления, подынтегральная функция которых представляется как сумма произведений фазовых координат объекта с весовыми коэффициентами q_{ij} , i, j = 1, 2, ..., n(они образуют матрицу Q), а также квадрата сигнала управления с коэффициентом г. Подробный анализ "безраздельного господства" методологии линейно-квадратичной оптимизации проведен в работе [3], в которой оно связывается с такими очевидными достоинствами данной методологии, как 1) логическая завершенность и принципиальная математическая простота, 2) законченность и аналитический характер получаемых решений, 3) применимость к широкому классу линейных стационарных и нестационарных динамических объектов как с конечным, так и с бесконечным временем функционирования. В работе [3] одновременно

критикуется данное чрезмерное "безраздельное господство" методологии линейно-квадратичной оптимизации в теории управления. Критика в главном сводится к следующим положениям: 1) квадратичные функционалы качества не имеют ясного физического смысла, и их широкое распространение в основном предопределяется простотой вычисления и удобством использования в аналитических исследованиях; 2) в теории АКОР не решена проблема выбора значений весовых коэффициентов квадратичного функционала и их связи с общепринятыми в инженерной практике первичными показателями качества синтезируемых систем (временем переходного процесса, перерегулированием, статической ошибкой регулирования и др.).

Впервые задача связи между весовыми коэффициентами Q, r квадратичного критерия и динамическими свойствами оптимизируемых процессов управления, именуемая задачей обращения или обратной задачей АКОР, была поставлена в работах Р. Калмана [8], Р. Беллмана и Р. Калабы [9]. Сложность решения этой задачи вызвана недостаточной информативностью квадратичных функционалов качества, поскольку их значения определяются не только коэффициентами Q, r, но также и параметрами объекта управления. До настоящего времени предпринимаются многочисленные попытки решения этой задачи. Здесь выделим, прежде всего, работы отечественных ученых А. М. Летова, А. А. Красовского, А. Г. Александрова, Я. Курцвейля, Ю. Б. Попова, Ю. П. Плотникова, В. Н. Романенко, Ч. П. Даса, Р. Т. Янушевского, В. А. Подчукаева, В. В. Григорьева, В. Д. Фурасова, Л. И. Кожинской, Н. В. Кухаренко, Г. А. Крыжановского и др. Однако необходимо подчеркнуть, что зависимость между весовыми коэффициентами критерия и инженерными показателями качества системы является сложной, и ее определение остается основной проблемой современной теории АКОР. Для ее решения предложены отдельные подходы и рекомендации [2, 10-14], которые имеют часто эвристический, эмпирический характер, и процедура нахождения весовых коэффициентов, как правило, сводится многократному моделированию проектируемой системы управления с использованием цифровой вычислительной техники при выбранных некоторым способом значениях искомых коэффициентов. Если процессы в си-

стеме управления в каком-либо отношении не удовлетворяют проектировщика, то проводится целенаправленная корректировка весовых коэффициентов критерия качества и повторное определение оптимальных, скорректированных управлений. При необходимости этапы этого итерационного процесса решения задачи АКОР повторяются необходимое число раз. Каждая такая итерация сопряжена с большим объемом вычислений по определению n(n + 1)/2 элементов симметричной матрицы Q и весового коэффициента r. Для уменьшения числа итераций могут применяться методы математического программирования [14]. В данной работе в целях дальнейшего уменьшения объема вычислений применительно к одномерным стационарным объектам решается задача установления наименьшего числа ненулевых элементов матрицы Q, достаточных для обеспечения проектируемой системе управления заданных значений первичных показателей качества, а именно времени переходного процесса и перерегулирования системы. Для ненулевых весовых коэффициентов q_{ii} предлагается приближенная, но относительно точная численная оценка.

Постановка задач управления и исследования

Исследуемый класс линейных стационарных объектов управления описывается матричным дифференциальным уравнением

$$\dot{Z}(t) = A_Z Z(t) + B_Z U(t), \qquad (1)$$

где Z(t) — вектор координат состояния объекта; u(t) — его управляющее воздействие; A_Z , B_Z — постоянные матрицы параметров объекта размерностей $n \times n$, $n \times 1$ соответственно. Предполагается, что координаты $z_i(t)$ вектора состояния объекта имеют физический смысл отклонений от заданного режима его работы. Также предполагается, что в состав объекта управления (1) входит интегрирующее звено (оно или имеется реально или включается дополнительно), которое обеспечивает астатизм проектируемой системы стабилизации выходной координаты. На этом основании в дальнейшем не проводится анализ статической точности проектируемой системы управления.

Рассмотрим классическую стационарную задачу АКОР Калмана—Летова с интеграль-

ным квадратичным критерием оптимальности процесса управления

$$I = \int_{0}^{\infty} (Z^{\mathrm{T}}(t)QZ(t) + ru^{2}(t))dt, \qquad (2)$$

где Q — симметричная положительно определенная матрица, составленная из весовых коэффициентов q_{ij} . В критерии (2) принимается значение коэффициента r = 1 на том основании, что значение одного весового коэффициента функционала качества без изменения решения задачи АКОР можно задавать произвольно.

Соответственно, задача АКОР формулируется следующим образом [7, 15]: необходимо найти закон обратной связи $U(t) = F_0[Z(t)]$, образующий совместно с исходным объектом (1) асимптотически устойчивую замкнутую систему, доставляющую минимум функционалу качества (2) при переводе объекта управления из начального положения $X(0) = X_0$ в конечное нулевое.

Как известно [15—17], решением задачи (1), (2) является линейный алгоритм управления

$$U(t) = -r^{-1}B_Z^{T}PZ(t) = -KZ(t), \quad K = r^{-1}B_Z^{T}P, \quad (3)$$

в котором матрица *P* находится как положительно определенное решение матричного уравнения Риккати

$$PA_{Z} + A_{Z}^{T}P - r^{-1}PB_{Z}B_{Z}^{T}P + Q = 0.$$
 (4)

Соответственно, задача исследования ставится следующим образом: для объекта (1) с конкретными числовыми матрицами параметров требуется с использованием решения (3), (4) определить такие значения матрицы весовых коэффициентов Q, при которых замкнутая система с управлением (3) имела бы для выделенного режима работы заданное (желаемое) значение времени переходных процессов (времени регулирования) $t_{\rm p} = t_{\rm pz}$ и заданное перерегулирование $\sigma = \sigma_z = 4,321$ %. Напомним, что в классической теории автоматического управления временем регулирования t_р называют наименьшее время отработки системой ступенчатого воздействия $x_z \cdot 1(t) (x_z - сиг$ нал задания регулятора), по истечении которого отклонение выходной переменной объекта от установившегося значения не превышает принятого значения ∆ "трубки" [15, 19]. Завершая постановку задачи управления, особо подчеркнем, что в данной работе для обеспечения единственности решения сформулированной задачи принимается $\Delta = \sigma_z = 4,321$ %, где заданное значение перерегулирования системы принято равным перерегулированию колебательного звена с коэффициентом демпфирования $\sqrt{2}/2$ — фильтру Баттерворса второго порядка [15, 18].

Решение задачи при отсутствии ограничения на перерегулирование

Предварительно найдем решение более простой задачи при отсутствии ограничения на перерегулирование, которое в дальнейшем укажет направление поиска решения сформулированной задачи исследования.

В целях упрощения решений рассматриваемых обратных задач АКОР осуществим преобразование фазовых координат $Z(t) = D \cdot X(t)$ объекта (1) с использованием такой невырожденной матрицы *D*, при которой описание объекта принимает каноническую форму Фробениуса

$$\dot{X}(t) = A_X X(t) + B_X U(t),$$

$$A_X = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1 & a_2 & \dots & a_n \end{pmatrix}, B_X = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ b \end{pmatrix}.$$
(5)

Как известно, матрица перехода *D*, обладающая указанным свойством, может быть найдена разными способами. Один из способов основан на использовании матриц управляемости объекта в новом и старом базисах [12]:

$$D^{-1} = \left\| B_X, A_X B_X, A_X^2 B_X, ..., A_X^{n-1} B_X \right\| \times \\ \times \left\| B_Z, A_Z B_Z, A_Z^2 B_Z, ..., A_Z^{n-1} B_Z \right\|^{-1}.$$
(6)

Нетрудно видеть, что для полностью управляемого объекта (1) это матрица является неособенной: det $D \neq 0$.

Необходимо отметить, что, во-первых, компоненты вектора состояния *X* объекта в канонической форме Фробениуса имеют ясный математический и физический смысл:

$$x_1(t) = x_z - x(t), \quad x_2(t) = \dot{x}_1(t), x_3(t) = \dot{x}_2(t), \dots, x_n(t) = \dot{x}_{n-1}(t)$$

 смысл отклонения выходной переменной объекта от заданного режима и его производных. Во-вторых, данное каноническое описание объекта можно представить в форме дифференциального уравнения *n*-порядка

$$A(p)x(t) = bu(t), \tag{7}$$

где $A(p) = p^n + a_n p^{n-1} + a_{n-1} p^{n-2} + ... + a_2 p + a_1$ — полином от оператора дифференцирования p = d/dt.

Соответственно, функционал качества (2) также будем рассматривать в каноническом фазовом пространстве

$$I = \int_{0}^{\infty} (X^{\mathrm{T}}(t)D^{\mathrm{T}}QDX(t) + ru^{2}(t))dt =$$

$$\equiv \int_{0}^{\infty} (X^{\mathrm{T}}(t)\overline{Q}X(t) + ru^{2}(t))dt.$$
(8)

С использованием модели (7) можно доказать **теорему 1**: решение задачи АКОР (7), (8) определяет замкнутую систему управления с заданным временем регулирования t_{pz} в случае, если матрица Q имеет всего один ненулевой элемент с достаточно большим значением $\bar{q}_{11} = q_1 \gg 0$. При предельных значениях весового коэффициента $q_1 \rightarrow \infty$ описание оптимальной замкнутой системы приближается к передаточной функции (ПФ) фильтра Баттерворса *n*-го порядка, из которой следует оценка весового коэффициента

$$q_1 \ge \frac{r}{\alpha^{2n} b^2}, \ \alpha = \frac{t_{\rm pz}}{\tau_{\rm p}}, \tag{9}$$

где τ_p — время регулирования фильтра Баттерворса, описываемого ПФ, нормированной по Вышнеградскому [15, 20].

Для доказательства воспользуемся известным результатом [10], утверждающим, что характеристический полином G(s) оптимальной системы управления объектом (7) по критерию (8) удовлетворяет уравнению

$$G(s)G(-s) = A(s)A(-s) + q_1b^2/r.$$
 (10)

В этом случае говорят, что функция G(s) определяется операцией факторизации полинома правой части выражения (10). Напомним, что ПФ оптимальной системы описывается дробью $W_0(s) = 1/G(s)$.

Проведем нормирование по Вышнеградскому [15, 20] полинома (10), который предварительно представим в стандартной форме

$$A(s)A(-s) + q_1b^2/r =$$

$$A_{2n}s^{2n} + A_{2n-1}s^{2n-1} + \dots + A_1s + A_0,$$
(11)

с соответствующими коэффициентами A_k , причем

=

$$A_0 = a_1^2 + q_1 b^2 / r$$
, $A_{2n} = (-1)^n$.

Напомним, что нормированной передаточной функцией (НПФ), или передаточной функцией в форме Вышнеградского, называется ПФ, у которой в знаменателе свободный член и коэффициент при старшей степени равны единице. Произвольная ПФ

$$W(s) = \frac{B_m(s)}{A_n(s)} =$$

= $\frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_n},$ (12)
 $m \le n-1,$

может быть преобразована в нормированную заменой переменной *s* новой переменной $q = \alpha s$, $a = \sqrt[n]{a_0/a_n}$:

$$\overline{W}(q) = \frac{\overline{b_0}q^m + \overline{b_1}q^{m-1} + \overline{b_2}q^{m-2} + \dots + \overline{b_m}}{q^n + \overline{a_1}q^{n-1} + \overline{a_2}q^{n-2} + \dots + \overline{a_{n-1}}q + 1}, (13)$$

где

$$\overline{b_i} = \frac{b_i}{a_n \alpha^{m-i}}, \overline{a_k} = \frac{a_k}{a_n \alpha^{m-k}},$$

$$i = 0, 1, \dots, m; \quad k = 1, 2, \dots, n-1.$$

Соответственно, коэффициенты ненормированной ПФ (12) связаны с коэффициентами НПФ соотношениями

$$b_i = \alpha^{m-i} \overline{b_i}, \ i = 0, 1, 2, ..., m;$$
 (14 a)

$$a_0 = \alpha^n$$
; $a_n = 1$; $a_k = \alpha^{n-k} \overline{a_k}$, $i = 1, 2, ..., n-1$. (14 б)

Между свойствами систем с ПФ (12) и (13) существует тесная связь [19—21]: характер их переходных процессов (монотонность, апериодичность, перерегулирование, показатели точности в установившемся режиме) совпадает. Исключение составляет только длительность переходных процессов систем — время регулирования t_p системы (12) и время регулирования τ_p системы (13) отличаются и связаны соотношением

$$\alpha = t_{\rm p}/\tau_{\rm p}.$$
 (15)

Воспользовавшись заменой переменной *s* Лапласа новой переменной

$$q = \alpha s \operatorname{при} \alpha = \sqrt[2n]{r/q_1 b^2}, \qquad (16)$$

найдем значения коэффициентов \overline{A}_k , k = 0, 1, ..., 2n, преобразованного полинома после их умножения на константу $r/q_1b^2 = \alpha^{2n}$ (данное умножение не изменяет характеристического уравнения системы и соответственно ее свойства):

$$\overline{A}_{k} = A_{k} \alpha^{2n-k} = A_{k} (r/q_{1}b^{2})^{\frac{2n-k}{2n}}, \quad (17)$$

$$k = 0, 1, \dots, 2n.$$

Проанализируем значения коэффициентов (17) при предельном увеличении весового коэффициента $q_1 \rightarrow \infty$, что физически означает аналогичное увеличение коэффициента передачи регулятора (3) и, соответственно, повышение быстродействия устойчивой системы управления. Этот физический вывод непосредственно следует из уравнения (4), указывающего на увеличение по модулю значений элементов матрицы *P*, если матрица *Q* имеет вид

$$Q = q_1 \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \equiv q_1 J_1.$$
(18)

Такой же вывод вытекает также из управления (3) при значении $r = 1/q_1$, получаемом при выносе коэффициента q_1 из-под знака интеграла критерия (8).

Рассматривая предельные значения коэффициентов (17) при $q_1 \to \infty$, убеждаемся, что они приближаются к нулю, за исключением коэффициента $\overline{A}_{2n} = (-1)^n$ при k = 2n и $\overline{A}_0 = A_0 \left(\frac{r}{q_1 b^2}\right) = \left(a_1^2 + \frac{q_1 b^2}{r}\right) \left(\frac{r}{q_1 b^2}\right) = a_1^2 \frac{r}{q_1 b^2} + 1 \to 1$

при k = 0. Подчеркнем, что при четном *n* предельные значения крайних коэффициентов полинома $\overline{A}_0 = \overline{A}_{2n} = 1$, т.е. предельный, преобразованный указанным образом полином (8), является нормированным по Вышнеградскому. Соответственно при больших значениях параметра $q_1 \to \infty$ корни характеристического полинома G(q) оптимальной замкнутой системы управления стремятся к устойчивым корням двучлена

$$G(q)G(-q) = (-1)^n q^{2n} + 1,$$
(19)

которые на комплексной плоскости q совпадают с вершинами правильного 2n-угольника, вписанного в окружность единичного радиуса. В литературе такое распределение корней известно как распределение (размещение) Баттерворса порядка n [15, 16, 18].

Устойчивые корни этого распределения (корни с отрицательными вещественными частями) определяют полюсы динамических систем, называемых фильтрами Баттерворса. Они описываются $\Pi \Phi W_B(q) = 1/D_n(q)$, где полиномы Баттерворса имеют вид [15]:

$$D_{1}(q) = q + 1, \quad D_{2}(q) = q^{2} + 1,4142q + 1,$$

$$D_{3}(q) = (q + 1)(q^{2} + q + 1),$$

$$D_{4}(q) = (q^{2} + 0,7654q + 1)(q^{2} + 1,8478q + 1),$$

$$D_{5}(q) = (q + 1)(q^{2} + 0,6180q + 1) \times (q^{2} + 1,6180q + 1),$$

$$D_{6}(q) = (q^{2} + 0,5176q + 1) \times (20) \times (q^{2} + 1,4142q + 1)(q^{2} + 1,9319q + 1),$$

$$D_{7}(q) = (q + 1)(q^{2} + 1,8019q + 1) \times (q^{2} + 1,2469q + 1)(q^{2} + 0,4450q + 1),$$

$$D_{8}(q) = (q^{2} + 1,9615q + 1)(q^{2} + 1,1111q + 1).$$

Соответственно, переходные характеристики ($h_i(\tau)$, i = 1, 2, ..., 8) этих фильтров показаны на рис. 1 в нормированном времени τ

Результаты, представленные на рис. 1, можно рассматривать как графическое доказательство теоремы 1, наглядно показывающее существование решения обратной задачи АКОР.



Рис. 1. Переходные характеристики фильтров Баттерворса Fig. 1. Transient characteristics of Butterworth filters

В частности, используя графики рис. 1, возможно для исследуемого фильтра Баттерворса приближенно определить время регулирования τ_p , определяющее оценку весового коэффициента (9).

Эта оценка непосредственно следует из соотношения (16) для коэффициента преобразования полинома (10). Для нас важно, что этот коэффициент преобразования одновременно относится и к полиному знаменателя G(s) ПФ оптимальной системы, определяемого соотношением (10). Действительно, факторизация нормированного полинома (10) дает нормированный полином G(s). На этом основании из формулы (16) получается оценка (9).

Необходимо подчеркнуть, что теорема 1 описывает решение обратной задачи АКОР для канонического объекта в форме Фробениуса. Используя это решение и преобразование координат $X(t) = D^{-1}Z(t)$ с матрицей (6), запишем решение обратной задачи АКОР для исходного объекта (1):

$$Q = q_1 (D^{-1})^{\mathrm{T}} J_1 D^{-1}, \qquad (21)$$

где матрица J_1 определяется выражением (18).

Отметим, что согласно рис. 1 фильтры Баттерворса (20) порядка n = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 имеют значения перерегулирования $\sigma_2 = 4,321$, $\sigma_3 = 8,147$, $\sigma_4 = 10,828$, $\sigma_5 = 12,777$, $\sigma_6 = 14,251$, $\sigma_7 = 15,412$, $\sigma_8 = 16,349$ %, и при дальнейшем увеличении *n* перерегулирование также увеличивается, но с уменьшающейся скоростью [15, 19]. Следовательно, все фильтры Баттерворса, за исключением фильтра второго порядка, имеют большее перерегулирование, чем заданное $\sigma_z = 4,321$ %. В следующем разделе учитывается имеющееся ограничение на перерегулирование системы управления.

Решение задачи при заданном перерегулировании системы

Очевидно, что для обеспечения проектируемой системе управления желаемого значения перерегулирования необходимо одному или нескольким весовым коэффициентам критерия, которые ранее были нулевыми, придать положительные значения. Вначале имеет смысл ограничиться одним коэффициентом $\bar{q}_{22} = q_2 > 0$. Выбор данного весового коэффициента физически можно обосновать следующим образом. Заметим, что большее значение перерегулирования системы, описываемой в фазовом пространстве с каноническим вектором состояния $X = (x, \dot{x}, ..., x^{(n-1)})^{\mathrm{T}}$, определяется большим значением скорости системы $\dot{x}(t)$ в момент времени нарастания [1, 21]. Следовательно, перерегулирование системы возможно уменьшить ограничением указанной скорости и, соответственно, введением в функционал качества (8) слагаемого $q_2 \dot{x}^2(t) = \overline{q}_{22} x_2^2(t)$ с определенным значением весового коэффициента $q_2 > 0$.

Проведем математический анализ предложенного способа выбора

$$q_1 > 0, q_2 > 0, q_3 = \dots = q_{n-1} = 0, r = 1$$
 (22)

значений коэффициентов квадратичного критерия качества. По аналогии с фильтрами Баттерворса найдем предельное при $q_1 \rightarrow \infty$ решение задачи АКОР для объекта (7) по критерию (8) с весовыми коэффициентами (22). Согласно работе [10] характеристический полином G(s)рассматриваемой оптимальной системы управления будет удовлетворять уравнению

$$G(s)G(-s) =$$

= $A(s)A(-s) - s^2(q_2b^2/r) + q_1b^2/r.$ (23)

Как и ранее, с использованием замены переменной (16) проведем нормирование полинома (23), представив предварительно его в стандартной форме (11). Значения коэффициентов преобразованного полинома после их умножения на величину $q_1b^2/r = \alpha^{2n}$ определяются также выражением (17), и, соответственно, они при предельном уменьшении времени переходных процессов системы (увеличении $q_1 \rightarrow \infty$) приближаются к нулю, за исключением коэффициентов $\overline{A}_0 = 1$, $\overline{A}_{2n} = (-1)^n$ и

$$\overline{A}_2 = A_2 \alpha^{2n-2} = A_2 \left(\frac{r}{q_1 b^2}\right)^{\frac{n-1}{n}} =$$
$$= \left(2a_1 a_3 - a_2^2 - \frac{q_2 b^2}{r}\right) \left(\frac{r}{q_1 b^2}\right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

Заметим, что соответствующим выбором весового коэффициента q_2 критерия можно при $q_1 \rightarrow \infty$ обеспечить значение $\overline{A}_2 = a = \text{const}$, если положить

$$\left(\frac{q_2b^2}{r}\right)\left(\frac{r}{q_1b^2}\right)^{\frac{n-1}{n}} = a.$$

Это равенство выполняется при

$$q_2 = c(q_1)^{\frac{n-1}{n}}, \quad c = a/\sqrt[n]{b^2}$$
 (24)

с коэффициентом пропорциональности *с*. В данном случае и при $q_1 \to \infty$ корни полинома G(q) оптимальной системы управления будут приближаться к устойчивым корням полинома

$$G(q)G(-q) = (-1)^n q^{2n} - aq^2 + 1, \quad a > 0.$$
(25)

Таким образом, здесь возникает следующая задача: факторизацией полинома (25) определить функцию G(q) и соответствующую ей нормированную ПФ оптимальной системы

$$W_0(q) = 1/G(q) =$$

= 1 / (qⁿ + g_{n-1}qⁿ⁻¹ + g_{n-2}qⁿ⁻² + ... + g₁q + 1) (26)

при таком значении параметра *a*, при котором динамическая система (26) имела бы перерегулирование, равное $\sigma_z = 4,321$ %.

Данную задачу можно решить с использованием системы компьютерной математики MathCAD 15, в которой имеется процедура, позволяющая в режиме аналитических вычислений находить все 2*n* решений алгебраического уравнения

$$(-1)^n q^{2n} - aq^2 + 1 = 0 (27)$$

при произвольном численном значении параметра a > 0. С этой целью была разработана программа, выполняющая следующие операции:

1) расчет всех решений p_i , i = 1, 2, ..., 2n, алгебраического уравнения (27) при выбранном положительном значении параметра a;

2) выбор решений p_i , i = 1, 2, ..., n, имеющих отрицательные вещественные части, и расчет с их использованием коэффициентов нормированного полинома

$$G(q) = \prod_{i=1}^{n} (q + p_i) =$$

= $q^n + g_{n-1}q^{n-1} + g_{n-2}q^{n-2} + \dots + g_1q + 1;$

 нахождение переходной функции динамической системы (26) и определение для нее перерегулирования σ и длительности переходных процессов;

N	а	Коэффициенты G(q)	Корни <i>G</i> (<i>q</i>)	T_i	ζί	σ, %	τ _p
2	0	$g_1 = \sqrt{2}$	$p_{1,2} = -\sqrt{2}/2 \pm \sqrt{2}/2 i$	1	$\zeta_1 = \sqrt{2}/2 = 0,707107$	4,3213	2,9744
3	0,4760	$g_1 = 2,150236$ $g_2 = 2,073758$	$p_1 = -0.918078$ $p_{2,3} = -0.57784 \pm 0.869099i$	$T_1 = 1,089232$ $T_2 = 0,958164$	$\zeta_1 = 1$ $\zeta_2 = 0,553665$	4,32090	3,8124
4	0,79572	$g_1 = 2,850881 g_2 = 3,665902 g_3 = 2,707730$	$p_{1,2} = -0,461477 \pm 0,966015i$ $P_{3,4} = -0,892388 \pm 0,275923i$	$T_1 = 0.9340713 T_2 = 1.070582$	$\zeta_1 = 0,431054$ $\zeta_2 = 0,955374$	4,32102	4,5736
5	1,06233	$g_1 = 3,541902 g_2 = 5,741368 g_3 = 5,598041 g_4 = 3,346055$	$p_1 = -0,858401$ $p_{2,3} = -0,372580 \pm 1,010266i$ $P_{4,5} = -0,871247 \pm 0,495656i$	$T_1 = 1,164957 T_2 = 0,928695 T_3 = 0,997635$	$\begin{aligned} \zeta_1 &= 1 \\ \zeta_2 &= 0,346013 \\ \zeta_3 &= 0,869187 \end{aligned}$	4,32095	5,3220
6	1,29958	$g_1 = 4,227217$ $g_2 = 8,284891$ $g_3 = 9,99870$ $g_4 = 7,946964$ $g_5 = 3,986719$	$p_{1,2} = -0,887857 \pm 0,114812i$ $P_{3,4} = -0,796768 \pm 0,665763i$ $P_{5,6} = -0,308735 \pm 1,030546i$	$T_1 = 1,117007$ $T_2 = 0,963107$ $T_3 = 0,929542$	$\begin{aligned} \zeta_1 &= 0.991742 \\ \zeta_2 &= 0.767373 \\ \zeta_3 &= 0.286982 \end{aligned}$	4,32100	6,0633
7	1,51678	$g_1 = 4,908248$ $g_2 = 11,287063$ $g_3 = 16,216913$ $g_4 = 15,897742$ $g_5 = 10,711177$ $g_6 = 4,628428$	$p_{1} = -0.795343$ $p_{2,3} = -0.262160 \pm 1.040079i$ $P_{4,5} = -0.943263 \pm 0.313527i$ $P_{6,7} = -0.711118 \pm 0.774845i$	$T_1 = 1,257318$ $T_2 = 0,932305$ $T_3 = 1,006031$ $T_4 = 0,950840$	$\zeta_{1} = 1$ $\zeta_{2} = 0,244413$ $\zeta_{3} = 0,948952$ $\zeta_{4} = 0,676160$	4,32105	6,7984
8	1,71897	$g_1 = 5,585856$ $g_2 = 14,741411$ $g_3 = 24,551222$ $g_4 = 28,484998$ $g_5 = 23,705809$ $g_6 = 13,889418$ $g_7 = 5,270563$	$p_1 = -0,768324$ $p_2 = -0,970457$ $P_{3,4} = -0,227153 \pm 1,044473i$ $P_{5,6} = -0,904804 \pm 0,483353i$ $P_{7,8} = -0,633932 \pm 0,844771i$	$T_1 = 1,301532$ $T_2 = 1,030441$ $T_3 = 0,935550$ $T_4 = 0,974832$ $T_5 = 0,946811$	$\zeta_{1} = 1 \zeta_{2} = 1 \zeta_{3} = 0,212514 \zeta_{4} = 0,882032 \zeta_{5} = 0,600214$	4,32103	7,5279

Параметры и показатели систем с ПФ $W_0(q)$ Parameters and indicators of systems with the NTFs $W_0(q)$

4) если значение σ системы управления отличается от $\sigma_z = 4,321$ % более, чем на 0,001 %, то уточняется значение параметра *a* и осуществляется переход к операции 1.

Результаты вычислений по данной программе при значениях n = 2, ..., 8 представлены в таблице, в которой параметры T_i , ζ_i соответствуют постоянным времени и коэффициентам демпфирования последовательно соединенных звеньев апериодического и колебательного характера, которые можно выделить в системе с ПФ $W_0(q)$.

Необходимо подчеркнуть, что ПФ $W_0(q)$ описывает динамическую систему, которая в соответствии со своим принципом получения должна иметь заданное значение перерегулирования $\sigma_z = 4,321$ %. Этот вывод был проверен и подтвержден построением для этих систем переходных функций ($h_i(\tau)$, i = 1, 2, ..., 8), представленных на рис. 2.

Динамические системы с ПФ $W_0(q)$, имеющие фиксированное значение перерегулирования σ_z = 4,321 %, были названы модифицированными фильтрами Баттерворса, поскольку стандартные фильтры Баттерворса получаются как их частный случай при значении параметра a = 0.

Результаты, представленные на рис. 2, можно рассматривать как графическое доказательство следующей **теоремы 2**: решение задачи АКОР (7), (8) определяет замкнутую систему управления с заданными значениями времени регулирования t_{pz} и перерегулирования $\sigma_z = 4,321$ %



Рис. 2. Переходные характеристики модифицированных фильтров Баттерворса Fig. 2. Transient characteristics of modified Butterworth filters

в том случае, если матрица весовых коэффициентов Q имеет два ненулевых элемента с достаточно большими значениями $\overline{q}_{11} = q_1 \gg 0$ и $\overline{q}_{22} = q_2 \gg 0$. При предельных значениях весовых коэффициентов $q_1 \rightarrow \infty$ и $q_2 = c(q_1)^{\frac{n-1}{n}} \rightarrow \infty$ (c = const) описание оптимальной замкнутой системы приближается к ПФ модифицированного фильтра Баттерворса *n*-го порядка, из которой следует оценка коэффициентов

$$q_{1} \simeq \frac{r}{b^{2}} \left(\frac{1}{\alpha^{2n}} - a_{1}^{2} \right), \quad \alpha = \frac{t_{pz}}{\tau_{p}},$$

$$q_{2} \simeq a(q_{1})^{\frac{n-1}{n}} / \sqrt[n]{b^{2}},$$
(28)

где параметры a, τ_p определяются с использованием таблицы исходя из порядка n применяемого модифицированного фильтра Баттерворса.

Необходимо отметить, что теорема 2, также как и теорема 1, описывает решение обратной задачи АКОР для канонического объекта в форме Фробениуса. Используя это решение и преобразование координат $X(t) = D^{-1}Z(t)$ с матрицей (6), несложно найти решение исходной обратной задачи АКОР

$$Q = (D^{-1})^{\mathrm{T}} \begin{pmatrix} q_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_2 & \cdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} D^{-1}$$
(29)

для исходного объекта (1).

Пример. Пусть ПФ объекта управления имеет вид

$$W_0(p) = 1/p(0, 1p^3 + 0, 8p^2 + 1, 7p + 1)$$
 (30)

(такой объект рассматривался в работах [20, 23]). Для этого объекта решим задачу АКОР с критерием качества, имеющим весовые коэффициенты (28), и проверим, действительно ли они обеспечивают для синтезируемой системы, как ожидается согласно теореме 2, близкие к желаемым значения перерегулирования $\sigma_z = 4,321$ % и времени переходных процессов, например, $t_{pz} = 0,75$. Это значение соответствует времени регулирования системы управления, рассмотренной в работе [20].

Решение задачи осуществим в фазовом пространстве с координатами

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x_z - x(t), \quad x_2(t) = \dot{x}_1(t), \\ x_3(t) &= \dot{x}_2(t), \quad x_4(t) = \dot{x}_3(t). \end{aligned}$$

Непосредственно по П Φ (30) в данном пространстве определяем матрицы описания объекта в форме Фробениуса

$$A_{X} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_{1} & -a_{2} & -a_{3} & -a_{4} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -10 & -17 & -8 \end{pmatrix}; B_{X} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$
(31)

Предварительно для определения весовых коэффициентов (28) квадратичного критерия рассчитаем параметр $\alpha = t_{pz}/t_p = 0.75/4.5736 = 0.164$, где значение нормированного времени τ_p взято из таблицы в соответствии с порядком n = 4 фильтра Баттерворса.

По формулам (28) рассчитываем весовые коэффициенты

$$q_1 \simeq \frac{r}{b^2} \left(\frac{1}{\alpha^{2n}} - a_1^2 \right) =$$

= $\frac{1}{1^2} \left(\frac{1}{0,164^8} - 0, 0 \right) = 1,91095 \cdot 10^6,$
 $q_2 \simeq a(q_1)^{\frac{n-1}{n}} / \sqrt[n]{b^2} =$
= 0,79572(1,91095 \cdot 10^6)^{3/4} = 4,08975 \cdot 10^4.

Здесь значение параметра *а* также выбрано из таблицы в соответствии с порядком n = 4 фильтра Баттерворса. Составляем матрицу весовых коэффициентов

Далее решаем задачу АКОР с матрицами (31) и (32), используя функцию $[K, P] = lqr(A_X, B_X, Q, r)$ пакета МАТLAB. Данная функция рассчитывает матрицу коэффициентов обратных связей *К* закона управления (3), минимизирующего квадратичный критерий (2). В дополнение к матрице коэффициентов обратных связей функция возвращает решение *P* уравнения Риккати (4). Применение данной функции дало:

$$K = 1 \cdot 10^{3} \times (1,3824 \quad 0,6565 \quad 0,1289 \quad 0,0099);$$

$$P = 1 \cdot 10^{5} \times \begin{pmatrix} 9,2139 & 2,0163 & 0,2479 & 0,0138 \\ 2,0163 & 0,7225 & 0,1049 & 0,0066 \\ 0,2479 & 0,1049 & 0,0182 & 0,0013 \\ 0,0138 & 0,0066 & 0,0013 & 0,0001 \end{pmatrix}.$$
(33)

Построив моделированием переходную функцию системы управления с коэффициентами обратной связи (33), определяем показатели качества регулирования $t_p = 0,891$, $\sigma = 1,361$ %. Полученное время регулирования системы больше заданного на $(0,891-0,75)\cdot100/0,75 = 18,8$ %. Для приближения времени переходных процессов к требуемому значению на столько же процентов уменьшим коэффициент $\alpha =$ $= 0,614\cdot0,812 = 0,1332$, предположив линейную зависимость. Повторив предыдущий расчет с данным коэффициентом, получаем

$$q_{1} = 1,0091743 \cdot 10^{7}; \quad q_{2} = 142473,768;$$

$$K = 1 \cdot 10^{3} \times (3,1768 \quad 1,2212 \quad 0,1991 \quad 0,0135);$$

$$P = 1 \cdot 10^{6} \times \begin{pmatrix} 3,9112 \quad 0,6866 \quad 0,0683 \quad 0,0032\\ 0,6866 \quad 0,1976 \quad 0,0232 \quad 0,0012\\ 0,0683 \quad 0,0232 \quad 0,0033 \quad 0,0002\\ 0,0032 \quad 0,0012 \quad 0,0002 \quad 0,0000 \end{pmatrix}.$$
(34)

Оптимальная система управления с параметрами (34) имеет показатели качества $t_p = 0,708$, $\sigma = 1,91$ %, достаточно близкие к требуемым значениям: время регулирования отличается только на 5,6%, а перерегулирование не превышает заданное $\sigma_z = 4,321$ %. При необходимости, выполняя следующую вторую итерацию приближения, можно получить практически желаемые значения качества управления. Таким образом, оценки (28) теоремы 2 позволяют достаточно эффективно решать обратную задачу АКОР.

Завершая статью, акцентируем внимание на том факте, что модифицированные фильтры Баттерворса, определяющие решение рассматриваемой обратной задачи АКОР, получены при выполнении следующих двух условий. Вопервых, равенство значения "трубки", используемой при определении времени переходного процесса системы управления, перерегулированию этой системы. Равенство указанных величин, как установлено в работе [22], является необходимым условием максимального быстродействия линейных динамических систем. Во-вторых, ПФ модифицированных фильтров Баттерворса получены как предельное решение задачи АКОР при больших значениях весового коэффициента критерия $q_1 \rightarrow \infty$, что физически соответствует аналогичному увеличению коэффициента передачи оптимального регулятора, приводящему к повышению быстродействия устойчивой системы управления.

По указанным условиям (причинам) модифицированные фильтры Баттерворса имеют предельное (максимальное) быстродействие в сравнении с другими фильтрами, описываемыми НПФ. Свойство максимального быстродействия фильтров Баттерворса детально проанализировано и подтверждено в работе [23]. В связи с данным свойством ПФ модифицированных фильтров Баттерворса, характеризуемых параметрами табл. 1, аналогично стандартным ПФ [15, 19, 21], рекомендуются к выбору в качестве эталонных ПФ при синтезе быстродействующих систем управления алгебраическим методом [19—21] или методом модального управления [15—17].

Заключение

В работе предложен способ решения обратной задачи АКОР, которая состоит в определении весовых коэффициентов квадратичного функционала оптимальности процесса управления, обеспечивающих замкнутой системе заданные значения времени переходных процессов и перерегулирования. При этом время переходных процессов (время регулирования) понимается в смысле классической теории автоматического управления и определяется с использованием значения "трубки" $\Delta = \sigma_r =$ = 4,321 %, равного заданному (желаемому) значению перерегулирования синтезируемой системы. Данный способ предусматривает преобразование задачи АКОР к канонической форме, в которой объект управления описывается матричным дифференциальным уравнением в форме Фробениуса, а функционал качества определяется как интеграл от суммы квадратов канонических фазовых координат объекта с весовыми коэффициентами q_i , i = 1, 2, ..., n, а также квадрата сигнала управления с коэффициентом *г*. В форме теоремы сформулировано утверждение, что решение обратной канонической задачи АКОР находится при r = 1, $q_3 = q_4 = ... = q_n = 0$ и некоторых положительных значениях коэффициентов q_1 , q_2 квадратичного критерия качества. Значения этих двух коэффициентов предлагается выбирать в процессе моделирования оптимальной системы управления соответственно из условий обеспечения заданных значений времени регулирования и перерегулирования системы.

Предельным решением задачи АКОР при $q_1 \to \infty$ и $q_2 = c(q_1)^{\frac{n-1}{n}} \to \infty$ (c = const) определены ПФ динамических систем с предельным (максимальным) быстродействием, которые при определенных значениях константы c имеют перерегулирование $\sigma_z = 4,321$ %. Данные динамические системы названы модифицированными фильтрами Баттерворса в связи с тем, что известные фильтры Баттерворса получаются аналогичным образом при константе c = 0. С использованием найденных ПФ фильтров Баттерворса получены числовые оценки весовых коэффициентов квадратичного качества.

ПФ модифицированных фильтров Баттерворса рекомендуется использовать в качестве эталонных ПФ синтезируемых быстродействующих систем.

Список литературы

1. **Красовский А.** А. и др. Справочник по теории автоматического управления. М.: Наука, 1987. 712 с.

2. **Красовский А. А.** Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. М.: Наука, 1973. 558 с.

3. **Филимонов Н. Б.** Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 2—10.

4. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Динамическая коррекция процессов регулирования методом линейно-квадратичной оптимизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 9—14.

5. Kalman R. E. Contributions to the Theory of Optimal Control // Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana. 1960. V. 5, N. 1. P. 102–119.

6. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. I, II, III // Автоматика и телемеханика. 1960. № 4. С. 406-411; № 5. С. 561-568; № 6. С. 661-665.

7. **Летов А. М.** Математическая теория процессов управления. М.: Наука, 1981. 256 с.

8. **Калман Р. Э.** Когда линейная система управления является оптимальной? // Труды Америк. об-ва инж. механиков. 1964. Т. 86, Сер. D. № 1. С. 69—84.

9. Белман Р., Калаба Р. Обратная задача программирования в автоматическом управлении // Механика: Сб. перев. иностр. статей. 1964. Т. 88, № 6. С. 3.

10. Абдулаев Н. Д., Петров Ю. П. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с. 11. Александров А. Г. Синтез регуляторов многомерных систем. М.: Машиностроение, 1986. 272 с.

12. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высшая школа, 1989. 264 с.

13. **Кухаренко В. Н.** Выбор коэффициентов квадратичных функционалов при аналитическом конструировании регуляторов // Изв. вузов. Электромеханика. 1978. № 4. С. 411–417.

14. Дегтярев Г. Л., Ризаев И. С. Синтез локально-оптимальных алгоритмов управления. М.: Машиностроение, 1991. 304 с.

15. Пупков К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 3 тт. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. Т. 2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. 736 с.

16. Квакернак Х. Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977. 650 с.

17. Kawasaki N., Kobayashi H., Shimemura E. Relation between pole assignment and LQ-regulator // Int. J. Contr. 1998. Vol. 47, N. 4. P. 947–951. 18. **Miroslav D. Lutovac.** Filter Design for Signal Processing using MATLAB and Mathematica. New Jersey, USA.: Prentice Hall, 2001.

19. Гайдук А. Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). М.: Физматлит, 2012. 360 с.

20. Ким Д. П. Синтез оптимальных по быстродействию непрерывных линейных регуляторов // АиТ. 2009. № 3. С. 5—16.

21. Ким Д. П. Алгебраические методы синтеза САУ. М.: Физматлит, 2014, 164 с.

22. Ловчаков В. И. Необходимые условия максимального быстродействия линейных динамических систем // Меха-троника, автоматизация, управление. 2017. № 6. С. 376—382.

23. **Ловчаков В. И.** Синтез линейных систем управления с максимальным быстродействием и заданным перерегулированием // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 9. С. 499—510.

Modified Butterworth Filters in Solving the Inverse Problem of Analytical Design of Optimal Controllers

V. I. Lovchakov, lovvi50@mail.ru, O. A. Shibyakin, yutiiop@gmail.com, Tula State University, Tula, 300600, Russian Federation

> Corresponding author: Lovchakov Vladimir I., D. Sc., Full Professor, Tula State University, Department of electrical engineering and electrical equipment, Tula, 300600, Russian Federation, e-mail: lovvi50@mail.ru

> > Accepted on November 10, 2020

Abstract

In this work, for linear stationary one-dimensional control objects, the inverse problem of analytical design of optimal controllers (ADOC) is considered, which consists in determining the weight coefficients of the quadratic functional of the optimality of the control process that provide the closed-loop control system with the specified values of the time of transient processes and overshoot. The time of the transient process (regulation time) of the synthesized system is understood in the sense of the classical theory of automatic control and is determined using a "tube", the value of which is taken, in contrast to known works, equal to the required (desired) small value of the system overshoot of a few percent (2-5 %). The equality of the percentage values characterizing the "tube" and the desired overshoot of the synthesized system is a necessary condition for the maximum response rate of linear dynamic systems and, accordingly, ensures the unambiguity of the solution of the considered inverse ADOC problem in the class of fast-response systems. The proposed solution method provides for the transformation of the ADOC problem to the canonical form, in which the control object is described by a matrix differential equation in the Frobenius form, and the quality functional is defined as the integral of the sum of the products of the object's canonical phase coordinates, as well as the square of the control signal with appropriate weight coefficients. It is shown that the solution of the inverse canonical ADOC problem is determined by the values of only three nonzero weight coefficients of the criterion, and one of them has a single value. The values of the other two coefficients are proposed to be found in the process of modeling the synthesized optimal control system from the conditions of providing for it a given control time and a given overshoot. To obtain numerical estimates of the two main weight coefficients of the quadratic quality criterion, the solution of the ADOC problem is considered with the limiting increase in the values of these weight coefficients. By the limiting solution of the ADOC problem, the transfer functions of dynamic systems with the limiting (maximum) speed are determined, which have a given overshoot of 4.321 %. The dynamical systems described by these transfer functions are called modified Butterworth filters due to the fact that the well-known Butterworth filters are obtained as their special case with a zero value of a certain constant. The parameters and indicators of the dynamics of these filters up to the sixth order are presented in the table. Using the indicators of Butterworth filters, numerical estimates of the weight coefficients of the quadratic quality criterion are established. Transfer functions of modified Butterworth filters are recommended to be used as reference transfer functions of synthesized high-speed control systems.

Keywords: linear one-dimensional plant, speed, overshoot, analytical design of an optimal controller, Butterworth filters

For citation:

Lovchakov V. I., Shibyakin O. A. Modified Butterworth Filters in Solving the Inverse Problem of Analytical Design of Optimal Controllers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2021, vol. 22, no. 2, pp. 71–82.

DOI: 10.17587/mau.22.71-82

References

1. **Krasovskii A. A.** et al. Handbook on the theory of automatic control, Moscow, Nauka Publ., 1987, 712 p.(in Russian).

2. Krasovskii A. A. Automatic flight control systems and their analytical design, Moscow, Nauka Publ., 1973. 558 p. (in Russian).

3. Filimonov N. B. The problem of the quality of management processes: a change in the optimization paradigm, *Mekhatronika*, *Avtomatizatsiia*, *Upravlenie*, 2010, no. 12, pp. 2–10 (in Russian).

4. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Dynamic Correction of Regulation Processes by Method of Linear-Square Optimization, *Mekhatronika, Avtomatizatsiia, Upravlenie,* 2011, no. 5, pp. 9–14 (in Russian).

5. Kalman R. E. Contributions to the Theory of Optimal Control, *Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana*, 1960, vol. 5, no. 1, pp. 102–119.

6. Letov A. M. Analytical design of regulators. I, II, III, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1960, no. 4, pp. 406–411; no. 5, pp. 561–568; no. 6, pp. 661–665 (in Russian).

7. Letov A. M. Mathematical theory of control processes, Moscow, Nauka Publ., 1981, 256 p. (in Russian).

8. **Kalman R. E.** When is a linear control system optimal?, *Tpudy Amepik. ob-va inzh.-mekhanikov*, vol. 86, ser. D, 1964, no. 1, pp. 69–84 (in Russian).

9. Bellman R., Kalaba R. Inverse programming task in automatic control, *Mekhanika: Sb. pepev. inostp. Statej*, 1964, vol. 88, no. 6, pp. 3.

10. **Abdulaev N. D.** Theory and methods of designing optimal controllers, Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1985, 240 p. (in Russian).

11. Aleksandrov A. G. Synthesis of regulators of multidimensional systems, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 272 p. (in Russian).

12. Aleksandrov A. G. Optimal and adaptive systems, Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1989, 264 p. (in Russian).

13. Kuharenko V. N. Choice of coefficients of quadratic functionals in the analytical design of controllers, *Izv. vuzov. Ele-ktromekhanika*, 1978, no. 4, pp. 411–417 (in Russian).

14. **Degtyarev G. L.** Synthesis of locally optimal control algorithms, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, 304 p. (in Russian).

15. **Pupkov K. A.** Methods of classical and modern control theory: 3 vol., Moscow, MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2000, 736 p. (in Russian).

16. **Kvakernak H., Sivan R.** Linear Optimal Control Systems, Moscow, Mir Publ., 1977, 650 p. (in Russian).

17. Kawasaki N., Kobayashi H., Shimemura E. Relation between pole assignment and LQ-regulator, *Int. J. Contr.*, 1998, vol. 47, no. 4, pp. 947–951.

18. **Miroslav D. Lutovac.** Filter Design for Signal Processing using MATLAB and Mathematica, New Jersey, USA, Prentice Hall, 2001.

19. **Gajduk A. R.** Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems, Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 360 p. (in Russian).

20. Kim D. P. The synthesis of optimal speed of response continuous linear controller, AiT Publ., 2009, no. 3, pp. 5–16 (in Russian).

21. **Kim D. P.** Algebraicheskie metody sinteza SAU [Algebraic methods of ACS synthesis]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014. 164 p. (in Russian).

22. Lovchakov V. I. Necessary conditions of the maximum speed of response of linear dynamic systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiia, Upravlenie*, 2017, no. 6, pp. 376–382 (in Russian).

23. Lovchakov V. I. Synthesis of Linear Control Systems with Maximum Speed and Given Overshoot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiia, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 9, pp. 499–510 (in Russian).



РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 612.843.72

DOI: 10.17587/mau.22.83-93

Р. Н. Яковлев, мл. науч. сотр., iakovlev.r@mail.ru, **Ю. И. Рубцова,** мл. науч. сотр., julia_rubik@mail.ru, **А. А. Ерашов,** программист, quietIsaac@yandex.ru,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

"Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук" (СПб ФИЦ РАН),

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,

г. Санкт-Петербург, Россия

Сравнительная оценка подходов к определению точек захвата объектов робототехническим средством

Настоящее исследование посвящено сравнительной оценке современных методов определения точек захвата объектов сцены с использованием средств технического зрения. В работе исследуемые методы определения точек захвата объектов применяются совместно с методом построения карт глубины, основанном на нейросетевой модели ResNet-50, что позволяет отказаться от использования специализированных датчиков глубины в процессе проведения экспериментов. В исследовании представлены зависимости оценок вероятности успешного захвата от типов целевых объектов. Усредненные по типам объектов оценки вероятности успешности захвата для исследуемых методов GPD, 6-DOF GraspNet, VPG составили соответственно 0.690, 0.741, 0.613. Также были исследованы зависимости оценок вероятности успешного захвата от размеров целевых объектов, расстояний между объективом фиксирующей видеокамеры и целевыми объектами сцен, уровней освещенности сцены, а также от углов наблюдения сцены по вертикальной оси. Для рассмотренных методов GPD, 6-DOF GraspNet, VPG выявлены нелинейные возрастающие зависимости усредненных по типам объектов вероятностей успешного захвата от уровня освешенности сиены. Также было установлено, что зависимости усредненной вероятности успешного захвата объекта для всех остальных параметров носят нелинейный характер и являются немонотонными. В работе определены диапазоны значений исследованных параметров сцены, на которых достигаются наибольшие значения вероятностей успешного захвата объектов для данных методов. По результатам проведенной экспериментальной оценки решение 6-DOF GraspNet продемонстрировало наилучшее качество работы на подавляющем большинстве комбинаций рассмотренных параметров сцены. Использование данного метода является предпочтительным для решения задачи определения точек захвата объектов при использовании подходов, обеспечивающих восстановление карты глубины без применения специализированных устройств.

Ключевые слова: точки захвата объекта, карта глубины, робототехнические средства, нейронные сети, GPD, 6-DOF GraspNet, VPG, ResNet-50

Введение

Современные запросы коллаборативной, ассистивной и промышленной робототехники требуют существенного повышения качества функционирования промышленных манипуляторов и сервисных роботов, а также значительного расширения их функциональных возможностей. Для выполнения производственных и бытовых задач робототехническими средствами (РС) необходимо обеспечить их взаимодействие с окружающим пространством и объектами различных типов, размеров, формы и материала: возможность захватывать, перемещать, позиционировать объекты в пространстве и т.д. Таким образом, разработка подходов к универсализации средств взаимодействия промышленных и сервисных роботов с объектами различных форм и размеров является актуальной научной задачей, поскольку способствует расширению функциональности РС и возможностей автоматизации в области промышленности и сервиса.

Одной из центральных задач при разработке подходов к автоматизированному перемещению объектов является обеспечение захвата целевого объекта (ЦО) посредством РС [1, 2]. При захвате объектов любого типа важно обеспечить, с одной стороны, сохранение целостности объекта, с другой — надежное сцепление с ним, что предполагает учет геометрии контакта захватного механизма РС с ЦО, а также управление силой захвата для обеспечения его устойчивости. Смена типа объекта манипуляций, как правило, требует дополнительной программной настройки РС, что не всегда представляется возможным. Универсализация подходов к оперированию ЦО различного типа, таким образом, предполагает снижение требований к учету свойств ЦО при реализации программных средств взаимодействия с ними, что касается в том числе и процесса захвата ЦО посредством РС как основы для дальнейших манипуляций.

В целом для обеспечения захвата ЦО рабочим органом РС (схватом манипулятора) необходимо решить следующий комплекс задач технического зрения: 1) детектирование ЦО; 2) локализация ЦО на сцене; 3) определение точек захвата ЦО; 4) отслеживание траектории движения исполнительного механизма; 5) определение соответствия точек рабочей поверхности исполнительного механизма точкам схвата на ЦО; 6) детектирование успешного захвата ЦО. Предметом настоящего исследования является анализ методов решения задачи определения точек захвата объекта (ТЗО), обеспечивающих возможность осуществления надежного захвата для последующего оперирования ЦО.

ТЗО представляют собой центр сжатия объекта посредством РС [3]. При реализации методов определения ТЗО основная сложность заключается в наличии некоторой функциональной зависимости между положением ТЗО и такими свойствами ЦО, как: размер, геометрические особенности, свойства материала, упругость, жесткость. Отсутствие априорной информации о данных свойствах ЦО, а также о виде и параметрах соответствующей зависимости накладывает значительные ограничения на перспективы разработки универсальных математических моделей, обеспечивающих определение ТЗО. Таким образом, при решении задачи определения ТЗО целесообразным представляется применение нейросетевых моделей и иных средств машинного обучения для обеспечения универсальности подходов к определению ТЗО.

Многие существующие нейросетевые методы определения ТЗО основаны на анализе информации о положении и пространственных характеристиках окружающих объектов, получаемой с помощью специальных датчиков глубины, таких как LIDAR [4] и Kinect [5]. Сканирующие лидары и RGB-D-камеры формируют карту глубины сцены, на основе которой и определяются положение и характеристики захватываемых объектов. Однако такая аппаратура обладает крайне высокой стоимостью в сравнении с бытовыми видео- и фотокамерами. Разработка подходов к определению ТЗО, не предполагающих применение специализированных устройств, требует использования альтернативных подходов к построению карт глубины сцены. Интеграция соответствующих решений в киберфизические системы, где РС выступают в качестве агентов [6—8], позволит расширить спектр задач, подлежащих автоматизации, и тем самым расширить функциональность систем данного класса без необходимости в установке дополнительного дорогостоящего оборудования.

Данная работа посвящена сравнительной оценке качества работы существующих методов определения ТЗО при использовании подходов, обеспечивающих восстановление карты глубины без применения специализированных устройств.

Состояние исследований

Рассмотрим современные методы решения задачи определения ТЗО с использованием нейронных сетей (НС). В работе [9] представлена модель HC GPD для определения T3O. Процесс определения ТЗО с использованием ланного метода включает в себя несколько основных этапов. На первом этапе происходит преобразование входного RGB-D-изображения в облако точек, а также вокселизация и оптимизация полученного облака точек в целях устранения шумов и статистических выбросов. Далее на основе обработанного облака точек идентифицируется область интереса (ROI), на которой необходимо провести захват ЦО. Далее определяются положения потенциальных ТЗО (кандидатов) на идентифицированной области интереса. На третьем этапе полученные данные о так называемых кандидатах поступают на вход четырехслойной сверточной нейронной сети (CNN). Данная НС решает задачу бинарной классификации и на основе полученной оценки принимает решение о возможности захвата ЦО для каждого из кандидатов. На заключительном шаге осуществляется выбор оптимального кандидата и выполняется непосредственно сам захват объекта посредством РС. В данной работе была проведена экспериментальная оценка полученного решения на 16 объектах цилиндрической формы и 29 объектах кубической формы. Вероятность успешного захвата ЦО посредством РС с использованием данного метода в среднем составляет 84 %.

В работе [10] предлагается модель HC 6-DOF GraspNet, предназначенная для определения T3O для различного класса объектов посредством PC. В соответствии с предложенной авторами моделью на первом этапе из полученной на вход карты глубины извлекается облако точек ЦО, затем разработанная авторами НС Grasp Sampler Network принимает на вход это облако точек и определяет расположение потенциальных ТЗО. На заключительном этапе осушествляется оптимизация полученных результатов с использованием стохастического градиентного спуска. В данной работе апробация модели осуществлялась с использованием коллаборативного робота Franka Panda со встроенной RGB-D-камерой. В качестве ЦО выступали объекты различных форм и размеров: коробки, цилиндры, глубокие миски и кружки. Согласно результатам экспериментов успешный захват ЦО с использованием данного метода был осуществлен в среднем в 88 % случаев.

В работе [11] предлагается метод обучения роботизированных агентов Visual Pushing and Grasping (VPG) на основе сверточной нейронной сети Fully Convolutional Network (FCN) [12], предназначенный для обеспечения захвата объектов и дальнейшего манипулирования ими с использованием РС. Авторами используется метод Q-обучения, он позволяет роботизированному агенту формировать стратегию собственного поведения в среде, опираясь на опыт предшествующих взаимодействий с ЦО. В данной работе была проведена экспериментальная оценка полученного решения на коллаборативном манипуляторе UR5 с захватным устройством RG2. В качестве ЦО использовались игрушечные блоки небольшого размера. Результаты экспериментов показали, что вероятность успешного захвата ЦО с использованием данного метода в среднем составляет 83,3 %, однако стоит отметить, что данное решение было протестировано авторами только на объектах, имеющих небольшой вес и простую геометрическую форму.

В работе [13] представлена модель HC PointNetGPD, которая предназначена для решения задачи локализации T3O и принимает на вход необработанное облако точек сцены. Данная модель основана на HC PointNet [14] и обучена на наборе данных, представленном в работе [15], включающем объекты различных форм, размеров и текстур. В данной работе были проведены эксперименты по захвату ЦО с помощью коллаборативного манипулятора UR5 и роботизированного захватного устройства 3-Finger Adaptive Robot Gripper. В качестве ЦО использовались различные предметы, включая: коробки, жестяные банки, муляжи фруктов и овощей. В результате экспериментальной оценки было выявлено, что вероятность успешного захвата ЦО с использованием данного метода в среднем составляет 82 %.

Авторами работы [16] предложена модель HC, позволяющая определять T3O с использованием PC. Данная модель основана на остаточной нейронной сети ResNet [17]. Подаваемая на вход карта глубины сцены делится на фрагменты размером 168х168 пикселей. Сеть Region Prediction Networks [16] принимает на вход полученные фрагменты и выдает карту вероятности успеха захвата. Результаты проведенных экспериментов показали, что в 82,17 % случаев захват ЦО манипулятором был успешным, однако стоит также отметить, что предложенная модель HC тестировалась только на объектах, имеющих простую цилиндрическую форму, а также небольшой вес и маленький размер.

По результатам проведенного анализа методов и подходов к определению ТЗО для проведения дальнейшей сравнительной оценки были выбраны решения, представленные в работах [9—11], характеризующиеся наибольшими вероятностями успешного захвата ЦО. Рассмотрим далее существующие подходы, обеспечивающие восстановление карты глубины без применения специализированных устройств.

В общем случае методы построения карт глубины условно можно разделить на две группы: аппаратные [4, 5] и программные методы, в частности, основанные на использовании нейросетевых моделей [18-27]. Последние не требуют применения специального оборудования и позволяют осуществить восстановление карты глубины сцены по 2D-изображению, полученному с обыкновенной монокулярной камеры. В частности, авторами работы [18] предложен метод, в соответствии с которым проблема восстановления карты глубины формулируется как задача дискретно-непрерывной оптимизации, где непрерывные переменные кодируют глубину суперпикселей во входном 2D-изображении, а дискретные переменные представляют собой отношение между соседними суперпикселями. Авторы используют многочастичный алгоритм распространения доверия для вывода графической модели. В рамках экспериментальной оценки данного метода авторами было получено значение среднеквадратичной ошибки (СКО) восстановления карты глубины, равное 1,06...1,08. В более позднем исследовании достигнуто значение СКО, равное 0,824 [19].

В работе [20] представлен метод построения карты глубины посредством обработки RGB-изображения с использованием глубокой HC.

Процесс построения карты глубины с использованием данного метода можно разделить на два этапа: на первом этапе происходит оценка глубины на основании всего изображения, а на втором этапе полученная карта глубины оптимизируется в целях устранения статистических выбросов, что позволяет на выходе НС получить карту глубины с более четкими границами объектов. СКО предсказания глубины с применением данного метода составляет 0,871.

В работе [21] предлагается метод построения карты глубины посредством обработки трехканального изображения глубокой HC. Данная HC основана на архитектуре сверточной нейронной сети VGG [22] и обучена на наборе данных NYU Depth с применением метода Transfer Learning [21]. В рамках экспериментальной оценки данного метода авторами было получено значение СКО восстановления карты глубины, равное 0,833.

В работе [23] предложена глубокая сверточная нейронная сеть, предназначенная для выполнения ряда задач: прогнозирования глубины, оценки поверхности и семантической маркировки. Данная модель изначально основана на архитектуре, представленной в работе [24], но с некоторыми улучшениями: увеличено число сверточных слоев, а также повышено разрешение третьего слоя свертки. По данным, представленным в исследовании, СКО восстановления глубины с использованием данного метода составляет 0,641.

В работе [25] архитектура предложенной авторами НС построена на основе остаточной нейронной сети ResNet-50 [26] и дополняет ее Upsampling слоями, которые повышают точность восстановления карт глубины. Авторы работы [25] провели экспериментальную оценку качества работы данной архитектуры в сравнении с моделями AlexNet [27] и VGG [22]. Данные нейросетевые модели были протестированы на обучающих наборах данных NYU Depth и Make3D. Результаты сравнения моделей показали, что предложенная архитектура значительно превосходит аналогичные решения в задаче построения карты глубины по входному RGB-изображению. В рамках экспериментальной оценки авторами было получено значение СКО восстановления карты глубины с использованием разработанной модели, равное 0,573.

На основе проведенного анализа методов построения карты глубины с использованием глубоких нейронных сетей была выбрана модель HC, представленная в работе [25], поскольку она обладает меньшим числом обучающих параметров и, следовательно, требует меньшего объема данных для обучения. Кроме того, данная модель характеризуется наименьшим значением СКО, а значит, обладает наибольшей точностью предсказания выходной карты глубины в сравнении с другими рассмотренными решениями.

Далее перейдем к проведению сравнительной оценки выбранных подходов к определению ТЗО: GPD [9], 6-DOF GraspNet [10], VPG [11]. В качестве входных данных будем использовать карту глубины исследуемой сцены, полученную с использованием HC [25].

Экспериментальная оценка подходов к осуществлению захвата различных классов объектов с использованием робототехнических средств

В рамках настоящего исследования сравнительная оценка выбранных подходов к определению ТЗО [9—11] проводилась на основе тестового набора данных, включающего в себя 33 000 изображений различных сцен, смоделированных в программной среде gazebo [28]. Каждому изображению I_i из тестового набора данных соответствует набор значений параметров P_i :

1. Тип ЦО *Т.* Включает в себя 12 классов объектов: прямоугольные коробки (1), банки цилиндрической формы (2), кружки цилиндрической формы (3), чашки сферической формы (4), миски (5), глубокие миски (6), кувшины (7), вазы сложной формы (8), муляжи фруктов (яблоко (9), банан (10)) и овощей (морковь (11), перец (12)).

2. Размер ЦО *l* (см). В качестве данного параметра используется среднее значение длин проекций объекта на каждую из осей координат. Каждый целевой объект был отнесен к одной из следующих категорий исходя из значения *l*: 1 — [2, 4], 2 — (4, 5.5], 3 — (5.5, 7], 4 — (7, 9], 5 — (9, 12].

3. Расстояние между объективом фиксирующей видеокамеры и ЦО сцены *d* (м). Для тестового набора данных изображения снимались при дискретных значениях *d* в промежутке от 0,3 м до 1,2 м с шагом в 0,05 м.

4. Уровень освещенности сцены *lum*. Тестовый набор данных включает в себя изображения, сформированные при различных уровнях освещенности сцены: от 100 до 50 % с шагом в 5 %, где за 100 % взят нормативный уровень освещенности для офисных помещений [29]. 5. Угол наблюдения сцены по вертикальной оси α. Данный угол определяется как угол отклонения оптической оси видеокамеры от вертикального направления. При формировании тестового набора данных изображения снимали при дискретных значениях α в промежутке от 0 до 60° с шагом в 3°.

Для всех тестовых сцен в качестве стандартного был выбран набор значений параметров $\mathbf{P}_{base} = \{l_{base} = 3, d_{base} = 0,75, lum_{base} = 100\%, \alpha_{base} = 36^\circ\}$, данный набор значений параметров не зависит от типа ЦО. Базовая тестовая сцена представляет собой плоскую горизонтальную поверхность, на которой размещается шестизвенный манипулятор [30], а также ЦО размера *l_{base}*. На рабочий орган РС устанавливается видеокамера, посредством которой получается соответствующее тестовое изображение исследуемого участка сцены. ЦО при этом размещается по центру поля зрения видеокамеры таким образом, чтобы дистанция между объективом видеокамеры и ЦО составляла d_{base}, а угол наблюдения сцены по вертикальной оси был равен а_{base}. Освещенность моделируемой сцены в стандартных условиях составляет 100 %. В процессе формирования тестового набора данных Img для каждого отдельного ЦО осуществлялось последовательное варьирование значений параметров Р_і. Таким образом было получено множество изображений, отличающихся как типами, так и размерами ЦО, дистанциями между объективом фиксирующей видеокамеры и ЦО сцены, уровнями освещенности сцены и углами наблюдения сцены по вертикальной оси. Пример тестового изображения, полученного видеокамерой при стандартных значениях параметров сцены (\mathbf{P}_{base}), представлен на рис. 1, *a*.

С помощью метода построения карт глубины [25] на основе изображений **Img** был получен результирующий набор карт глубины **Depth**. Применение рассматриваемых подходов к определению T3O [9—11] к данному набору карт глубины позволило сформировать оценки качества работы соответствующих решений в зависимости от параметров сцены и характеристик ЦО. Для оценки качества работы данных решений использовалась вероятность успешного захвата S — доля успешных попыток захвата ЦО при использовании предлагаемых данными методами T3O в рамках моделирования соответствующих процессов.

Рассмотрим полученные оценки качества работы данных методов в зависимости от типа ЦО *T*. В рамках данного эксперимента для проведения оценки использовались лишь те карты глубины **Depth**_{*i*}, которые были получены из изображений сцен **Img**_{*i*} со стандартными значениями параметров ($\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_{base}$). Полученные оценки *S* для каждого из рассматриваемых методов представлены на рис. 2.

Из данных, представленных на рис. 2, можно заключить, что наилучшие результаты для всех типов ЦО демонстрирует подход 6-DOF GraspNet [10]. Усредненная по типам объектов оценка вероятности успешности захвата для данного решения составила 0,741. Несколько худшее качество показывает метод GPD [9], полученная усредненная оценка в данном случае составила 0,690. Наихудшие результаты в рамках данного эксперимента продемонстрировал подход VPG [11], усредненная оценка *S*



a — тестовое изображение, полученное видеокамерой; δ — общий вид смоделированной сцены

Fig. 1. Examples of the simulated environment:

a – test image, obtained with camera; δ – general view of the simulated environment



Fig. 2. Performance quality assessment of the methods under consideration depending on the type of target object T in default experimental setup $(\forall P_i = P_{base})$

для данного метода составила 0,613. Следует отметить, что ни одно из представленных решений в данном эксперименте не достигло тех уровней показателей качества работы, которые в процессе апробации были получены авторами соответствующих исследований. Данные результаты могут быть объяснены следующими факторами: для восстановления карт глубины из тестовых изображений в данной работе использована нейросетевая модель из работы [25], которая обладает меньшей точностью в сравнении с аппаратными методами восстановления карт глубины; в работе рассматривается более широкий набор типов ЦО, включающий классы объектов, обладающие сложной нестандартной формой. Важно отметить, что для всех рассматриваемых подходов усредненная вероятность успешного захвата превысила значение 0,8 для таких классов объектов, как коробки прямоугольной формы (1) и жестяные банки цилиндрической формы (2). Данные типы объектов характеризуются простой геометрической формой и использовались авторами соответствующих подходов в процессе их апробации. Полученные для данных классов объектов значения показателей успешного захвата в целом соответствуют значениям, полученным авторами соответствующих подходов в исследованиях [9—11]. В то же время для таких нестандартных классов, как кувшины (7) и вазы сложной формы (8), все рассматриваемые подходы продемонстрировали значительно более низкое качество работы. В частности, для типа объектов (8) полученные оценки составили 0,474; 0,557 и 0,365 для методов из работ [9], [10] и [11] соответственно. Таким образом, можно заключить, что снижение качества работы рассматриваемых подходов в данном эксперименте обусловливается в первую очередь именно многообразием рассматриваемых типов ЦО, а не использованием нейросетевой модели, представленной в работе [25], для восстановления карт глубины.

Далее перейдем к оценке влияния размеров ЦО / на качество работы рассматриваемых решений. В процессе формирования соответствующего набора тестовых изображений на исследуемых сценах осуществлялось варьирование размеров ЦО каждого типа, остальные параметры принимали стандартные

значения из набора **P**_{base}. Результаты проведенной серии экспериментов для каждой категории размера ЦО представлены на рис. 3

Из графиков, представленных на рис. 3, можно заметить, что для всех категорий размера ШО наилучшие результаты по-прежнему в среднем демонстрирует подход 6-DOF GraspNet [10], чуть худшие значения S демонстрирует подход GPD [9], а самые низкие — метод VPG [11]. Наблюдаемые зависимости вероятности успешного захвата от типа ЦО имеют схожий вид для всех рассмотренных категорий размера ЦО. Во всех случаях наилучшие результаты характерны для объектов классов (1) и (2), а наихудшие — для объектов класса (8). Следует отметить, что наибольшие усредненные оценки успешности захвата наблюдаются для категории размера объектов l = 3 и равны 0,69; 0,741; 0,613 для методов [9-11] соответственно. При переходе как к меньшим, так и к большим размерам ЦО наблюдается снижение данных усредненных оценок, при этом минимальные значения усредненных оценок вероятности успешности захвата были получены для категории l = 1 и составляют соответственно 0,63; 0,682; 0,515. Данное снижение при применении рассматриваемых методов к ЦО более мелких размеров может быть объяснено снижением точности выделения сегмента объекта на изображении в процессе восстановления карты глубины при уменьшении размера ЦО. Увеличение размеров ЦО до определенного предела не оказывает столь значимого влияния на качество восстановления карты глубины, в данном случае снижение качества работы методов, представленных в работах [9–11], является не столь



Рис. 3. Оценка влияния размеров ЦО / на качество работы исследуемых методов:

a - l = 1; $\delta - l = 2$; e - l = 3; e - l = 4; $\partial - l = 5$; e -усредненная по T оценка вероятности успешного захвата ЦО в зависимости от l

Fig. 3. Assessment of influence of target object dimensions *l* on the performance of the methods under consideration: a - l = 1; $\delta - l = 2$; e - l = 3; e - l = 4; $\partial - l = 5$; e - T-averaged probability estimate of successful grip of target object depending on *l*

сильным и объясняется повышением сложности процесса поиска оптимальной ТЗО в связи с увеличением числа потенциальных ТЗО. Значения усредненной оценки вероятности успешности захвата для l = 5 составили соответственно 0,679; 0,728; 0,584 для методов [9—11]. Для проведения оценки влияния остальных описанных ранее параметров на качество работы рассматриваемых решений был выбран тестовый набор данных, где тип ЦО T = (1), (2), (7) и (8). Данные классы были выбраны, поскольку на них по результатам проведен-

ных выше экспериментов исследуемые метолы демонстрируют наилучшее для T = (1), (2) и наихудшее для T = (7), (8) качество работы соответственно. На рис. 4 (см. третью сторону обложки) представлены полученные зависимости вероятности успешного захвата в зависимости от *d*, *lum* и α для классов объектов (1) и (8): а) вероятность успешного захвата S для типов ЦО (1), (8) в зависимости от d; б) усредненные по Т оценки вероятности успешного захвата ЦО в зависимости от d; в) вероятность успешного захвата S для типов ЦО (1), (8) в зависимости от *lum*; Γ) усредненные по *T* оценки вероятности успешного захвата ЦО в зависимости от *lum*; д) вероятность успешного захвата S для типов ЦО (1), (8) в зависимости от α ; е) усредненные по Т оценки вероятности успешного захвата ЦО в зависимости от α. В приведенных экспериментах усреднение по Т проводилось для классов {1, 2, 7, 8}. Отметим, что при варьировании каждого параметра остальным параметрам были присвоены стандартные значения из набора Р_{base}.

Как можно заметить, все представленные на рис. 4. а (см. третью сторону обложки) зависимости обладают схожей структурой независимо от используемого метода определения ТЗО и типа ЦО Т. при значительном отклонении от стандартного значения параметра d как в большую, так и в меньшую сторону наблюдается устойчивое снижение качества работы всех рассматриваемых методов на всех типах ЦО. Рассматривая усредненные по T оценки S, представленные на рис. 4, б, можно заметить, что оптимальные S для всех методов достигаются при значениях параметра d в диапазоне от 0,6 до 0,8 м. При дальнейшем увеличении d у всех методов наблюдается плавное устойчивое снижение вероятности успешного захвата ЦО. Данный эффект может быть объяснен тем, что при удалении ЦО в процессе построения карты глубины из исследуемого изображения сцены удается извлечь меньше информации о характеристиках ЦО, что негативным образом сказывается на качестве работы рассматриваемых решений. В то же время при уменьшении *d* до значений менее 0,5 м также наблюдается значительный рост темпа падения качества работы рассматриваемых методов [9—11]. Это может объясняться тем, что при слишком малых значениях d объект занимает слишком большую область изображения, что не позволяет осуществить корректное построение карты глубины исследуемой сцены и, соответственно, приводит к значительным погрешностям в работе рассматриваемых методов.

На всем рассматриваемом диапазоне d метод 6-DOF GraspNet [10] демонстрирует наилучшие усредненные показатели качества работы, результирующая оценка S_{Td} вероятности успешного захвата усредненная по T и d для данного метода составила 0,685, несколько более низкие результаты демонстрирует решение GPD [9] $S_{Td} = 0,629$, а самые слабые показатели вновь характерны для решения VPG [11] $S_{Td} = 0,552$.

По результатам исследования зависимостей вероятности успешного захвата от уровня освещенности сцены lum для типов ЦО (1) и (8) (рис. 4, в), а также аналогичных зависимостей, усредненных в разрезе каждого метода по типам ЦО Т (рис. 4, г), можно сделать вывод о схожести данных зависимостей независимо от используемого метода определения ТЗО и типов ЦО. При снижении уровня освещенности, начиная с некоторого момента, оценки вероятностей успешного захвата начинают сушественно снижаться. в частности, при понижении уровня освещенности с 60 до 55 % усредненные по Т оценки вероятности успешного захвата на всех методах дополнительно снижаются более чем на 35 %. Более того, для ЦО типа (8) оценки вероятности успешного захвата для всех методов при уровне освещенности уже в 50 % обращаются в ноль. Данный эффект может быть объяснен тем, что значительное снижение уровня освещенности оказывает критическое влияние на качество работы используемого метода построения карты глубины сцены, а низкое качество полученных карт глубины, в свою очередь, значительно снижает точность определения потенциальных ТЗО или же вовсе не позволяет методам успешно реализовать данный процесс.

На основе полученных экспериментальных оценок можно сделать вывод о том, что на всем исследованном диапазоне уровней освещенности сцен метод 6-DOF GraspNet [10] демонстрирует наилучшие усредненные показатели качества работы в сравнении с другими рассматриваемыми решениями [9, 11]. Результирующие оценки S_{Tlum} вероятности успешного захвата усредненные по T и *lum* составили 0,547; 0,597; 0,476 для методов из работ [9—11] соответственно.

Аналогичным образом была исследована зависимость оценки вероятности успешного захвата ЦО от α . Полученные значения данных оценок для типов ЦО (1) и (8) в разрезе каждого рассматриваемого метода представлены на рис. 4, ∂ (см. третью сторону обложки), а соответствующие усредненные по *T* зависимости представлены на рис. 4, е. Следует отметить, что полученные зависимости характеризуются несколько более высокой вариабельностью результатов при снижении и увеличении α. Тем не менее, во всех представленных случаях наблюдаются четкие тренды снижения оценок S при отклонении α от стандартного значения как в большую, так и в меньшую сторону. Полученные зависимости объясняются тем, что при изменении α на изображениях сцены фиксируются разные участки объекта: при малых α на изображении фиксируется лишь одна сторона ШО, что негативно сказывается на качестве определения структуры ЦО и не позволяет рассматриваемым методам выявить значительную долю потенциальных ТЗО. При больших α на изображениях сцены фиксируется лишь поверхность, на которой непосредственно установлен ЦО, и сам ЦО захвата, что может привести к снижению точности построения карт глубины на основе таких изображений исследуемых сцен. Это и является предполагаемой причиной снижения оценок вероятности успешного захвата ЦО в данном случае. На всем рассматриваемом диапазоне α метод 6-DOF GraspNet [10], как правило, демонстрирует наилучшие усредненные показатели качества работы, несколько более низкие результаты демонстрирует решение GPD [9], а самые низкие показатели вновь характерны для решения VPG [11]. Результирующие оценки $S_{T\alpha}$ вероятности успешного захвата, усредненные по T и α , составили 0,579; 0,631; 0,506 для методов [9-11] соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что представленные в работе стандартные значения параметров сцены $\mathbf{P}_{base} = \{l_{base} = 3, d_{base} = 0.75, lum_{base} = 100 \%, \alpha_{base} = 36^\circ\}$ являются одними из оптимальных с точки зрения максимизации вероятности успешного захвата ЦО каждым из рассмотренных методов [9-11]. По результатам проведенной экспериментальной оценки решение 6-DOF GraspNet [10] демонстрирует наилучшие показатели качества работы для подавляющего большинства комбинаций рассмотренных параметров сцены, и его использование является предпочтительным для решения задачи определения ТЗО при использовании подходов, обеспечивающих восстановление карты глубины без применения специализированных устройств.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что рассмотренные методы GPD [9], 6-DOF GraspNet

[10]. VPG [11] достигают наибольших значений показателей качества своей работы на объектах простой геометрической формы, например, на прямоугольных коробках и банках цилиндрической формы. Анализ зависимости оценок вероятности успешного захвата от размера ЦО и параметров сцены позволил определить факторы, негативным образом сказывающиеся на качестве работы рассматриваемых решений и определить набор параметров, при которых достигаются наилучшие результаты. Модель НС 6-DOF GraspNet [10] демонстрирует наилучшие показатели качества работы для подавляющего большинства комбинаций рассмотренных параметров сцены. Ее использование является предпочтительным для решения задачи определения ТЗО при использовании подходов, обеспечивающих восстановление карты глубины без применения специализированных устройств.

Список литературы

1. Cutkosky M. R., Howe R. D. Human grasp choice and robotic grasp analysis // Dextrous robot hands. Springer, New York, NY. 1990. P. 5–31.

2. Morales A., Asfour T., Azad P., Knoop S., Dillmann R. Integrated grasp planning and visual object localization for a humanoid robot with five-fingered hands // 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE. 2006. P. 5663–5668.

3. Лесков А. Г., Илларионов В. В., Калеватых И. А., Морошкин С. Д., Бажинова К. В., Феоктистова Е. В Аппаратно-программный комплекс для решения задач автоматического захвата объекта манипуляторами // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. Т. 1, № 37.

 Fernald F. G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments // Applied optics. 1984. Vol. 23, N. 5. P. 652–653.
 Zhang Z. Microsoft kinect sensor and its effect // IEEE multimedia. 2012. Vol. 19, N. 2. P. 4–10.

6. **Ronzhin A., Saveliev A., Basov O., Solyonyj S.** Conceptual model of cyberphysical environment based on collaborative work of distributed means and mobile robots // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2016. P. 32–39.

7. Яковлев Р. Н., Ватаманюк И. В. Алгоритмическая модель распределенной системы корпоративного информирования в рамках киберфизической системы организации // МОИТ. 2019. Т. 7, № 4. С. 32—33.

8. **Левоневский** Д. Архитектура облачной системы распределения контента в киберфизических системах // МОИТ. 2019. Т. 7, № 4. С. 16—17.

9. ten Pas A., Gualtieri M., Saenko K., Platt R. Grasp pose detection in point clouds // The International Journal of Robotics Research. 2017. Vol. 36, N. 13–14. P. 1455–1473.

10. Mousavian A., Eppner C., Fox D. 6-dof graspnet: Variational grasp generation for object manipulation // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2019.

11. Zeng A., Song S., Welker S., Lee J., Rodriguez A. Learning synergies between pushing and grasping with self-supervised deep reinforcement learning // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE. 2018. P. 4238–4245.

12. Li B. 3d fully convolutional network for vehicle detection in point cloud // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017. P. 1513–1518.

13. Liang H., Ma X., Li S., Görner M., Tang S., Fang B., Sun F., Zhang J. Pointnetgpd: Detecting grasp configurations from point sets // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE. 2019. P. 3629–3635.

14. Qi C. R., Su H., Mo K., Guibas L. J. Pointnet: Deep learning on point sets for 3d classification and segmentation // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017. P. 652–660.

15. Calli B., Singh A., Walsman A., Srinivasa S., Abbeel P., Dollar A. M. The ycb object and model set: Towards common benchmarks for manipulation research // 2015 international conference on advanced robotics (ICAR). IEEE. 2015. P. 510–517.

16. Shao Q., Hu J., Wang W., Fang Y., Liu W., Qi J., Ma J. Suction Grasp Region Prediction using Self-supervised Learning for Object Picking in Dense Clutter // 2019 IEEE 5th International Conference on Mechatronics System and Robots (ICMSR). IEEE. 2019. P. 7–12.

17. Szegedy C., Ioffe S., Vanhoucke V., Alemi A. A. Inception-v4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning // Thirty-first AAAI conference on artificial intelligence. 2017.

18. Liu M., Salzmann M., He X. Discrete-continuous depth estimation from a single image // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. P. 716–723.

19. Liu F., Shen C., Lin G. Deep convolutional neural fields for depth estimation from a single image // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015. P. 5162–5170.

20. Eigen D., Puhrsch C., Fergus R. Depth map prediction from a single image using a multi-scale deep network // Advances in neural information processing systems. 2014. P. 2366–2374.

21. Zhu J., Ma R. Real-time depth estimation from 2D images. 2016.

22. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // arXiv preprint arXiv:1409.1556. 2014.

23. Eigen D., Fergus R. Predicting depth, surface normals and semantic labels with a common multi-scale convolutional architecture // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015. P. 2650–2658.

24. Geiger A., Lenz P., Stiller C., Urtasun R. Vision meets robotics: The kitti dataset // The International Journal of Robotics Research. 2013. Vol. 32, N. 11. P. 1231–1237.

25. Laina I., Rupprecht C., Belagiannis V., Tombari F., Navab N. Deeper depth prediction with fully convolutional residual networks // 2016 Fourth international conference on 3D vision (3DV). IEEE. 2016. P. 239–248.

26. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 770–778.

27. Iandola F. N., Han S., Moskewicz M. W., Ashraf K., Dally W. J., Keutzer K. SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and < 0.5 MB model size // arXiv preprint arXiv:1602.07360. 2016.

28. **Koenig N., Howard A.** Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator // 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No. 04CH37566). IEEE. 2004. Vol. 3. P. 2149–2154.

29. ГОСТ Р. 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий // Нормы и методы измерений. 2013.

30. Funabashi H., Horie M., Kubota T., Takeda Y. Development of spatial parallel manipulators with six degrees of freedom // JSME international journal. Ser. 3, Vibration, control engineering, engineering for industry. 1991. Vol. 34, N. 3. P. 382–387.

Comparative Evaluation of Approaches for Determination of Grasp Points on Objects, Manipulated by Robotic Systems

 R. N. lakovlev, iakovlev.r@mail.ru, J. I. Rubtsova, julia_rubik@mail.ru, A. A. Erashov, quietIsaac@yandex.ru, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Iakovlev R. N., Junior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Accepted on October 21, 2020

Abstract

This paper considers comparative evaluation of recent methods for grip point determination for manipulations with objects in the scene. This research is aimed to compare and evaluate the modern approaches of grip point determination, when this process is aided by computer vision. The methods of object gripping, considered in this paper, are employed in connection with depth map composition, backed by neural network model ResNet-50, which allowed to omit application of specific depth sensors in the course of experiments. This research shows dependencies of successful grip probability from the things being manipulated. Probability scores, averaged over different types of objects for the methods GPD, 6-DOF GraspNet, VPG, were, accordingly, 0.690, 0.741, 0.613. The paper also considers dependencies of successful grip probability from object sizes, distances from the capturing camera and target objects in the scene, luminosity levels, as well from the angles of scene inspection along the vertical axis. In terms of the considered methods GPD, 6-DOF GraspNet, VPG, non-linear increasing dependencies are revealed for object type-averaged probabilities of successful grip from luminosity level of the scene. It was also discovered, that the dependencies of successful grip for all the other parameters are non-linear and non-monotonic. The ranges of the values for scene parameters under consideration are defined in this paper, which ensure the highest probability values for object grip in these approaches. Upon the results of the performed experimental evaluation, the 6-DOF GraspNet solution showed the best performance for the vast majority of the considered parameters of the scene. The approach, presented in this paper, is the preferable way for solution of grip point problem, in context of methods, which assume depth map reconstruction without specific equipment.

Keywords: object grip points, depth map, neural networks, GPD, 6-DOF GraspNet, VPG, ResNet-50, robotic systems

For citation:

Iakovlev R. N., Rubtsova J. I., Erashov A. A. Comparative Evaluation of Approaches for Determination of Grasp Points on Objects, Manipulated by Robotic Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2021, vol. 22, no. 2, pp. 83–93.

DOI: 10.17587/mau.22.83-93

References

1. **Cutkosky M. R., Howe R. D.** Human grasp choice and robotic grasp analysis, *Dextrous Robot Hands*, Springer, New York, NY, 1990, pp. 5–31.

2. Morales A., Asfour T., Azad P., Knoop S., Dillmann R. Integrated grasp planning and visual object localization for a humanoid robot with five-fingered hands, 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2006, pp. 5663–5668.

3. Leskov A. G., Illarionov V. V., Kalevatykh I. A., Moroshkin S. D., Bazhinova K. V., Feoktistova E. V. Hardware-software complex for solving the task of automatic capture of the object with manipulators, *Inzhenernyj Zhurnal: Nauka i Innovacii*, 2015, vol. 1, no. 37 (in Russian).

4. Fernald F. G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments, *Applied optics*, 1984, vol. 23, no. 5, pp. 652–653.

5. Zhang Z. Microsoft kinect sensor and its effect, *IEEE multimedia*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 4–10.

6. Ronzhin A., Saveliev A., Basov O., Solyonyj S. Conceptual model of cyberphysical environment based on collaborative work of distributed means and mobile robots, *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, Springer, Cham, 2016, pp. 32–39 (in Russian).

7. Vatamaniuk I. V., Yakovlev R. N. Algorithmic model of a distributed corporate notification system in context of a corporate cyber-physical system, *MOIT*, vol. 7, no. 4, pp. 32–33 (in Russian).

8. Levonevskiy D. K. Architecture of a cloud system for distributing mutimedia content in cyber-physical systems, *MOIT*, vol. 7, no. 4, pp. 16–17 (in Russian).

9. ten Pas A., Gualtieri M., Saenko K., Platt R. Grasp pose detection in point clouds, *The International Journal of Robotics Research*, 2017, vol. 36, no. 13–14, pp. 1455–1473.

10. Mousavian A., Eppner C., Fox D. 6-dof graspnet: Variational grasp generation for object manipulation, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2019.

11. Zeng A., Song S., Welker S., Lee J., Rodriguez A. Learning synergies between pushing and grasping with self-supervised deep reinforcement learning, 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2018, pp. 4238–4245.

12. Li B. 3d fully convolutional network for vehicle detection in point cloud, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2017, pp. 1513–1518.

13. Liang H., Ma X., Li S., Görner M., Tang S., Fang B., Sun F., Zhang J. Pointnetgpd: Detecting grasp configurations from point sets, 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2019, pp. 3629–3635.

14. Qi C. R., Su H., Mo K., Guibas L. J. Pointnet: Deep learning on point sets for 3d classification and segmentation,

Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017, pp. 652–660.

15. Calli B., Singh A., Walsman A., Srinivasa S., Abbeel P., Dollar A. M. The ycb object and model set: Towards common benchmarks for manipulation research, *2015 international conference on advanced robotics (ICAR)*, IEEE, 2015, pp. 510–517.

16. Shao Q., Hu J., Wang W., Fang Y., Liu W., Qi J., Ma J. Suction Grasp Region Prediction using Self-supervised Learning for Object Picking in Dense Clutter, 2019 IEEE 5th International Conference on Mechatronics System and Robots (ICMSR), IEEE, 2019, pp. 7–12.

17. Szegedy C., Ioffe S., Vanhoucke V., Alemi A. A. Inception-v4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning, *Thirty-first AAAI conference on artificial intelligence*, 2017.

18. Liu M., Salzmann M., He X. Discrete-continuous depth estimation from a single image, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 716–723.

19. Liu F., Shen C., Lin G. Deep convolutional neural fields for depth estimation from a single image, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 5162–5170.

20. Eigen D., Puhrsch C., Fergus R. Depth map prediction from a single image using a multi-scale deep network, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014, pp. 2366–2374.

21. Zhu J., Ma R. Real-time depth estimation from 2D images, 2016.

22. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, arXiv preprint arXiv: 1409.1556. 2014.

23. Eigen D., Fergus R. Predicting depth, surface normals and semantic labels with a common multi-scale convolutional architecture, *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2015, pp. 2650–2658.

24. Geiger A., Lenz P., Stiller C., Urtasun R. Vision meets robotics: The kitti dataset, *The International Journal of Robotics Research*, 2013, vol. 32, no. 11, pp. 1231–1237.

25. Laina I., Rupprecht C., Belagiannis V., Tombari F., Navab N. Deeper depth prediction with fully convolutional residual networks, 2016 Fourth international conference on 3D vision (3DV), IEEE, 2016, pp. 239–248.

26. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770–778.

27. Iandola F. N., Han S., Moskewicz M. W., Ashraf K., Dally W. J., Keutzer K. SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and< 0.5 MB model size, arXiv preprint arXiv:1602.07360, 2016.

28. Koenig N., Howard A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator, 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No. 04CH37566), IEEE, 2004, vol. 3, pp. 2149–2154.

29. GOST R. 55710-2013 Lighting of workplaces inside buildings, Norms and methods of measurements, 2013 (in Russian).

30. Funabashi H., Horie M., Kubota T., Takeda Y. Development of spatial parallel manipulators with six degrees of freedom, *JSME International Journal, Ser. 3, Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry*, 1991, vol. 34, no. 3, pp. 382–387. А. Д. Московский, инженер-исследователь, moscowskyad@gmail.com,

Е. В. Бургов, инженер-исследователь, burgov.ev@yandex.ru,

E. E. Овсянникова, инженер-исследователь, eeovsyan@gmail.com,

Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва

Об одном подходе к распознаванию сцен группой роботов на основе локального взаимодействия¹

Рассматривается подход к коллективному распознаванию группой аниматов — модельными агентами с некоторой степенью биоинспирированности. Биологической основой для формирования группы является семья муравьев. Смоделированы гнездо, часть семьи, занимающаяся добычей пищи (фуражировкой), кормовые объекты и вражеские особи. Важным биологически инспирированным механизмом является кинопсис — "язык поз". С его помощью муравьи некоторых видов передают друг другу сигналы (угроза, добыча и т.д.).

Группа аниматов решает задачу сбора пищи и противодействия вражеским особям. Каждый анимат выбирает действие на основе наблюдаемой им сцены. Первый предложенный алгоритм описывает механизм зрительной памяти, который позволяет аниматору запоминать увиденные объекты в течение некоторого времени. Во втором алгоритме реализуется групповое распознавание объектов. С помощью средств локальной связи аниматы способны обмениваться информацией о наблюдаемой ими сцене, представленной в виде графа. Анимат, получая такую информацию от соседей, способен расширить свою картину мира и более корректно выбирать свое поведение на основе распознанной ситуации, чем если бы располагал только собственными данными. Предложенные алгоритмы были проверены на тестовой задаче в разработанной среде симуляции и показали, что их добавление способствует увеличению эффективности группы.

Эффективность группы определялась по количеству пищи, собранному за отведенный период времени. Аниматы, использовавшие зрительную память, показали повышение эффективности по всем исследуемым параметрам. Зависимость не монотонна: существует определенное значение, при котором достигается максимальная эффективность действий группы. Использование алгоритма группового распознавания также показало повышение эффективности по сравнению с базовой конфигурацией. Также проводилось исследование дистанции локального взаимодействия аниматов. Комбинация обоих алгоритмов также дает интересные результаты.

Ключевые слова: коллективное распознавание, групповая робототехника, анимат, зрительный анализатор, анализ сцен, локальная связь

Введение

В настоящее время активно исследуется групповой подход в области мобильной робототехники. С помощью группы роботов решаются задачи, которые нередко проблематично было бы решить одному роботу, даже более сложному с точки зрения конструкции и программного обеспечения. Одну из приоритетных задач можно определить как групповое визуальное распознавание: группа роботов способна покрыть большую территорию, имеет возможность одновременно наблюдать целевой объект или сцену с разных ракурсов, а далее действовать исходя из наиболее полной картины окружающей среды. Первой областью, где появилось групповое распознавание, можно считать системы распределенного наблюдения. Таким системам посвящено достаточное число работ, например [1-5]. Представленные в них подходы схожи в том, что системы распределенного видеонаблюдения не являются мобильными, а также имеют один вычислительный центр, агрегирующий выходные данные от нескольких камер. Однако в рамках групповой робототехники такой подход не всегда применим, поскольку часто в группах роботов "центральный" вычислительный узел отсутствует. Такие группы, называемые в литературе децентрализованными [6], имеют ряд преимуществ перед централизованным подходом, одним из которых является независимость от работоспособности центра и канала связи с ним. Отсутствие центрального вычислительного узла во многих случаях приводит к тому, что роботы способны передавать информацию только на локальном уровне, т.е. между ближайшими соседями, как например робот DrYARP, изображенный на рис. 1, роботы проекта Swarmrobot [7] и многие другие.

¹Работа выполнена при частичном финансировании грантов РФФИ № 16-29-04412 офи_м (Обзор существующих решений, Постановка задачи, Визуальная память анимата, Коллективное распознавание, Эксперименты) и РФФИ № 17-29-07083 офи_м (Моделируемые объекты и механизмы, Описание демонстрационной задачи).



Рис. 1. Робот DrYARP группы роботов Курчатовского института, оснащенный системой инфракрасной локальной связи Fig. 1. Robot DrYARP of the group of robots of the Kurchatov Institute, equipped with an infrared local communication system

В рамках данной работы будет рассматриваться именно такая группа.

Обзор существующих решений

Несмотря на большой интерес к групповой робототехнике в целом задача группового распознавания недостаточно хорошо освешена в литературе. Показательно, что, например, в книге Handbook of Collective Robotics [8], где собраны основные результаты исследований в области групповой робототехники, отсутствуют разделы, посвященные этому вопросу. Возможно, это объясняется тем, что роботыагенты в группе часто создаются заведомо простыми в плане конструкции и часто не оснащаются видеокамерами. Среди немногих работ, посвященных коллективному распознаванию объектов, следует отметить следующие. В работе [9] группа роботов определяет жесты оператора, наблюдая их с разных углов. Работа [10] посвящена распознаванию с помощью агентов, оснащенных разными сенсорами. Авторы обеих работ провели эксперименты, показывающие увеличение эффективности распознавания коллективом в целом при увеличении числа агентов. В работе [11] группа роботов распознает препятствия в окружающей среде, однако в силу ограниченности сенсоров не каждый робот в одиночку способен точно определить пре-

пятствие. В связи с этим предложен алгоритм, позволяющий роботам быстро получать помощь от соседей и иметь взвешенное решение касательно каждого препятствия. Все перечисленные работы сосредоточены на вопросе индивидуального распознавания отдельных объектов окружающей среды и препятствий. В то же время гораздо более актуальным является вопрос распознавания сцен. Распознавание сцен является основой для задачи определения и классификации ситуации, в которую попал робот: на основе распознанной ситуации происходит выбор реакции или действия. Действия и реакции определяют поведение в целом, что является ключевым вопросом поведенческой или интеллектуальной робототехники.

Постановка задачи

Говоря о поведении в групповой робототехнике, часто апеллируют к так называемым биоинспирированым подходам, которые в той или иной мере воспроизводят механизмы, функционирующие в биологических системах. Это касается как вопросов воспроизведения морфологических признаков, так и заимствования моделей поведения, вплоть до реализации элементов социального взаимодействия [6]. При этом одним из направлений при создании биоинспирированных систем является создание моделей и механизмов организации сигнального взаимодействия между членами группы.

Одним из таких заимствованных у природы механизмов является кинопсис — "язык поз", позволяющий муравьям — основным модельным объектам групповой робототехники передавать информацию визуально. Кинопсис также можно отнести к локальному взаимодействию особей. Имплементация данного механизма в виде зрительного анализатора анимата описана в работе [12]. Под термином анимат [13] может пониматься как абстрактная модель, так и техническое устройство, однако в обоих случаях подразумевается некая биологическая инспирированность. Исходя из наблюдаемой сцены, частью которой могут быть дружественные особи, принявшие тот или иной визуальный сигнал, анимат выбирает сценарий поведения. В настоящей работе данный подход получает свое дальнейшее развитие: анимат при выборе поведения опирается не только на свои визуальные данные, но и на данные, полученные от ближайших соседей по локальной связи. Также стоит отметить, что несмотря на то, что кинопсис имеет узкий набор передаваемых сигналов и может быть полностью заменен локальной связью, его достоинствами является помехозащищенность. Инфракрасная локальная связь в свою очередь не гарантирует передачу данных, поэтому для повышения надежности предлагается использовать оба подхода.

Моделируемые объекты и механизмы

Концепция устройства группы, основные моделируемые механизмы взаимодействия между индивидами, объекты окружающей среды имеют биологическую основу. В качестве модельного объекта для создания группы аниматов в данной работе используются муравьи. Они достигают высшего уровня развития социальных структур в мире насекомых [14]. Использование муравьев в качестве модельного объекта обусловлено, в том числе, необходимостью создания универсальной системы организации группы агентов, которая могла бы решать задачи разведки, добычи ресурсов, охраны территории.

Социум муравьев по своему устройству и происхождению является семьей [15], основной элемент инфраструктуры семьи муравьев — гнездо. Это укрытие, дом, основное место концентрации, коммуникации индивидов [16]. В гнезде локализованы расплод и самки, которые создают систему стимулов для рабочих муравьев. Фуражировка применительно к муравьям — снабжение семьи ресурсами (пищей и строительными материалами) [14]. Семьи муравьев в ассоциациях муравейников вступают в конкурентные взаимодействия, которые нередко включают прямые боевые столкновения [17, 18].

Для ориентации и коммуникации муравьи используют различные каналы получения и передачи информации: зрительный [19], ольфакторный (запаховый) [20], тактильный [21], звуковой [22]. Для многих муравьев зрительные сенсорные системы играют ключевую роль в обследовании среды и взаимодействия между индивидами. Так, у многих муравьев существует система передачи зрительных сигналов (при смене поз) — кинопсис ("язык поз"). С его помощью возможно предупреждение об опасности, привлечение к источнику пищи, координация других индивидуальных и групповых взаимодействий [23]. Зрительный канал позволяет муравьям передавать сигналы очень быстро, указывать друг другу направление опасности. Но объем передаваемой таким образом информации, по-видимому, относительно невелик. Больший объем информации муравьи могут передавать при индивидуальных контактах, используя одновременно различные коммуникационные каналы [21]. Необходимо отдельно подчеркнуть, что у механизма обмена визуальными данными между аниматами в реальном времени, повидимому, отсутствуют биологические аналоги. Но, однако, не стоит недооценивать возможности коммуникационных систем муравьев.

В настоящей работе моделируются следующие объекты: 1) группа индивидов; 2) гнездо; 3) пищевые объекты 4) "вражеские" особи. Гнездо является областью первоначального расположения индивидов и приоритетно охраняется группой. Пищевые объекты, как и "вражеские" особи, случайным образом распределяются по территории. Внутри группы индивиды могут обмениваться информацией визуально (аналог кинопсиса) с помощью системы распознавания, а также индивидуально с помощью средств локальной связи.

Визуальная память анимата

В основе зрительного анализатора, описанного в работе [12], лежит система распознавания сцен на основе анализа на графах [24]. В данном подходе сцена S, наблюдаемая аниматом, представляется в виде графа, в котором вершины O соответствуют объектам, а ребра R — отношениям между объектами:

$$S := (O, R). \tag{1}$$

Распознаваемые сцены, которые описывают возможные ситуации, также представимы в виде графов. Процесс распознавания требуемой сцены сводится к задаче поиска изоморфных подграфов. Когда сцена распознана и отнесена к определенному классу ситуаций, например "опасность", анимат выбирает соответствующее поведение. Однако в таком случае анимат очень быстро изменяет свое поведение, так как оно зависит от тех объектов, которые анимат перемещается в пространстве, то меняется и наблюдаемая им сцена. Для решения данной проблемы был предложен алгоритм ви-

зуальной памяти, позволяющий помнить объекты и отношения между ними в течение заданного числа тактов работы анимата. Разница между базовым зрительным анализатором и анализатором с визуальной памятью может быть проиллюстрирована схемой на рис. 2.

На рис. 2 анимат движется по траектории, обозначенной серой стрелкой. штриховой линией обозначена область видимости анимата. В положении 1 анимат наблюдает только вражескую особь (обозначена пятиугольником), в этом случае его состояние спокойное, так как нет повода для конфликта за пишу или действующего столкновения. В состоянии 2 в область видимости также попадет маркер пищи (обозначен треугольником), в этом случае анализатор переключает состояние на беспокойное, поскольку происходит конфликт с вражеской особью за ресурс. В положении 3 из зоны видимости анимата пропадает вражеская особь, и базовый анализатор сразу переключит состояние в спокойное и приступит к сбору пищи несмотря на фактическое нахождение противника. Модифицированный анализатор "помнит" о нахождении вражеского агента поблизости и будет поддерживать беспокойное состояние.

Для реализации данного подхода анимат создает стек, в котором хранит N последних графов текущего наблюдения и для задачи распознавания сцен объединяет элементы стека в один граф.

Алгоритм	1.	Визуальная	память	анимата
----------	----	------------	--------	---------

```
Входные данные: M —массив сохраненных графов,

N —размер визуальной памяти в тактах робота,

S — граф текущего наблюдения.

Вспомогательная функция add\_graph(s1,s2) до-

бавляет элементы одного графа к другому

Function visual_animat_memory(M, N, S):

Begin

S поместить в M

if размер M > N

удалить из M первый элемент

for each s in M

S = add\_graph(S,s)

return S

End
```

Функция add_graph в алгоритме визуальной памяти требует отдельного рассмотрения. Существуют различные способы объединять графы друг с другом, в данном случае, когда объекты двух графов были распознаны одной системой распознавания, объекты уникально именованы и имена совпадают на одинаковых



Рис. 2. Разница между базовым зрительным анализатором и анализатором с визуальной памятью. В положении 3 аниматом был выбран разный тип состояния.

Fig. 2. Difference between a basic visual analyzer and a visual memory analyzer. In position 3, a different type of state was chosen by the animat.

объектах, принадлежащим разным графам, поэтому можно использовать алгоритм именованного объединения.

Алгоритм 2. Именованное объедине	ние
----------------------------------	-----

Входные данные: S ₁ , S ₂ — графы сцен (1)
Вспомогательная функция add(S, E) возвраща-
ет граф S с добавленным к нему элементом Е (вер-
шиной или ребром)
Function named_union(S_1, S_2):
Begin
$S = S_1$
for each O in S_2
if O is not in S_1
$S = add(S, O)$ for each R in S_2
if R is not in S_1
S = add(S, R) return S
End

Приведенные алгоритмы позволяют сформировать граф, который соответствует полному наблюдению анимата за последние *N* тактов его работы.

Применение метода распознавания сцен к объединенному графу вместо графа текущего наблюдения позволит сделать поведение анимата более инерциальным (в том смысле, что анимат поддерживает более приоритетное состояние).

Коллективное распознавание

Благодаря локальной связи аниматы, находясь на небольшом расстоянии друг от друга, могут свободно обмениваться информацией, объем которой зависит от пропускной способности канала. В данном случае такой информацией является текущий граф наблюдения S. Соответственно, попадая в радиус взаимодействия с другими роботами, агент располагает собственным графом S и набором графов других роботов $\{S_i\}$. Требуется определить операцию "склеивания" нескольких графов в один, по которому в дальнейшем нужно будет определить класс текущей ситуации методом поиска изоморфных подграфов и выбрать соответствующее ей поведение.

На рис. 3 анимат 1 наблюдает сцену, состоящую из двух маркеров пищи, соответственно его состояние нейтральное. Анимат 2 наблюдает вражескую особь рядом с аниматом 1 и маркером пищи. Проводя обмен графами текущего наблюдения по локальной связи и объединяя их (результат изображен на рис. 3 снизу), аниматы способны выбирать более корректное поведение.

В работе сделано существенное допущение, что система распознавания аниматов позволяет однозначно определить соответствия между объектами одинакового типа. Задача определения соответствия между объектами на разных кадрах является важной и очень сложной. Существуют некоторые подходы, решающие задачу с похожей формулировкой [25]. Когда соответствия определены, можно воспользоваться приведенным выше алгоритмом именованного объединения.

Подход коллективного распознавания можно использовать вкупе с подходом визуальной



Рис. 3. Иллюстрация подхода коллективного распознавания сцен, два наблюдаемых разными аниматами графа были объединены в один

Fig. 3. An illustration of a collective scene recognition approach, two graphs observed by different animats were combined into one

памяти, для этого вместо графа текущего наблюдения можно передавать объединенный граф памяти анимата, а затем объединять этот граф с графами, полученными от соседей.

Алгоритм 3. Коллективное распознавание

Входные данные: M —массив сохраненных графов, N —размер визуальной памяти в тактах робота, $S_{current}$ — граф текущего наблюдения.

Вспомогательная функция $tell_neighbours(S)$ передает по локальной связи граф S, вспомогательная функция $ask_neigbours()$ возвращает массив графов, полученных по локальной связи.

```
Function collective_recognition(M, N, S_{current}):

Begin

S_{total} = S_{current}

foreach S in M

S_{total} = named\_union(S_{total}, S)

tell_neighbours(S_{total})

\{S_{others}\} = ask\_neighbours()

foreach S in \{S_{other}\}

S_{current} = named\_union(S_{current}, S)

S_{total} = named\_union(S_{total}, S)

visual_animat_memory(M, N, S_{current})

return S_{total}

End
```

Предложенный алгоритм позволяет сохранять в визуальной памяти информацию, полученную от соседей, но при этом избегает "вечного" запоминания объектов, которое может возникнуть, если запоминать объеденный граф *S*_{total}.

Описание демонстрационной задачи

Для проверки предложенных механизмов и оценки их влияния на работу аниматов была сформулирована следующая задача. Группа аниматов, стартуя из "гнезда", перемещается по некоторой территории, на которой случайным образом располагаются статичные маркеры "пищи" и "противников" (враждебных агентов). Находясь рядом с маркером пищи, анимат в течение некоторого времени его уничтожает. После полного уничтожения маркер снова появляется в случайной точке поля. Однако, если анимат начинает собирать пищу в радиусе действия противника, то он обездвиживается и получает "урон". Получив некоторое число единиц урона (например, будучи трижды атакованным), анимат не способен дальше функционировать ("убит"). Для эмуляции заслонения объектов друг другом анимат способен видеть не более десяти ближайших

Состояния анимата в тестовой задаче

States of the animat in the test problem

Состояние и цве- товая кодировка	Описание и поведение анимата
Спокойное Оранжевый	Анимат случайно перемещается по территории, собирая пищу
Беспокойное Фиолетовый	Анимат двигается мимо вражеских агентов, не собирая одиночные пищевые объекты, или ждет подкре- пления, если обнаружил большое скопление пищевых объектов
Агрессивное Красный	Анимат двигается к ближайшему вражескому агенту и атакует его или двигается за ближайшим дружеским агентом в агрессивном состоя- нии, если сам не видит вражеских агентов. Скорость движения в этом случае уменьшается
Возбужденное Голубой	Анимат движется к большому скоплению пищевых объектов, не занятых противником
Ассистирование Желтый	Анимат движется с увеличенной скоростью к возбужденному друже- ственному анимату
Обездвижен Серый	Анимат стоит на месте, пока к нему не подойдет дружественный анимат и не освободит
Спасение Синий	Анимат двигается к ближайшему обездвиженному дружескому анима- ту и освобождает его

объектов перед собой на определенном расстоянии и при заданном угле обзора. Анимат может менять свои состояния, которые могут быть распознаны другими аниматами (табл. 1).

В табл. 2 представлены сцены, которые способны распознавать аниматы, и соответствующие им состояния.

В табл. 2 сцены представлены в приоритетном порядке, т. е. анимат сначала пытается распознать сцены сверху вниз таблицы, и, как только была распознана какая-то сцена, анимат переходит в соответствующее состояние. На этом моменте распознавание прекращается.

Эксперименты

Был проведен ряд экспериментов для разных конфигураций аниматов в разработанной среде симуляции, изображенной на рис. 4.

Для каждой серии экспериментов по числу собранных маркеров пищи определяли эффек-

Сцены, распознаваемые аниматом

Scenes recognized by the animat

Описание ситуации	Состояние		
Наблюдает вражеского анимата ря- дом с гнездом	Агрессивное		
Наблюдает дружественного анима- та в агрессивном состоянии рядом с противником	Агрессивное		
Наблюдает группу от двух и более дружественных аниматов в агрессив- ном состоянии	Агрессивное		
Наблюдает группу от трех и более дружественных аниматов в беспо- койном состоянии	Агрессивное		
Наблюдает обездвиженного друже- ственного анимата	Спасение		
Наблюдает маркер еды рядом с вра- жеским агентом	Беспокойное		
Наблюдает группу из двух аниматов в беспокойном состоянии	Беспокойное		
Наблюдает скопление от трех и бо- лее маркеров пищи	Возбужденное		
Наблюдает возбужденного дружеско- го анимата	Ассистирование		
Остальное	Спокойное		

тивность группы. Также находили устоявшуюся скорость сбора пищи группой и интегрированный показатель за весь промежуток симуляции.

Первая серия экспериментов была посвящена влиянию длины визуальной памяти на эффективность группы при отсутствии локального взаимодействия.

На графиках на рис. 5 представлены усреднения по десяти экспериментам, отмечена медиана, стандартное отклонение (для графика скорости) и первый и третий квартили (для графика интегрированного показателя). Из графиков видно, что увеличение памяти положительно сказывается на эффективности группы, так как аниматы дольше помнят о вражеских агентах и не подставляются под удар. Однако, как можно заметить, после некоторого значения эффективность падает, поскольку агенты становятся очень инерциальными и долго сохраняют беспокойное и агрессивное состояние вместо того, чтобы собирать пищу.

Вторая серия экспериментов была посвящена коллективному распознаванию и вилянию



Рис. 4. Среда симуляции, в которой проводились эксперименты с предложенными алгоритмами. Подробно о среде симуляции рассказано в приложенном к работе видео

Fig. 4. The simulation environment in which experiments were carried out with the proposed algorithms. Details about the simulation environment are described in the video attached to the work



Рис. 5. Устоявшаяся скорость сбора пищи (a), интегрированный показатель собранной пищи за все время симуляции (б) в зависимости от показателя памяти аниматов в тактах

Fig. 5. Steady-state speed of information collection (a) integrated indicator of collected food for the entire simulation time (b) depending on the indicator of animat memory in ticks



Рис. 6. Интегрированный показатель эффективности группы для значений памяти 5 (*a*) и 10 (δ) тактов (по оси *X* откладывается радиус локального взаимодействия, по оси *Y*—интегрированный показатель пищи за весь промежуток времени) Fig. 6. Integrated indicator of group efficiency for memory values of 5 (*a*) and 10 (*b*) ticks (the X-axis is the radius of local interaction, the Y-axis is the integrated food indicator for the entire time interval)

радиуса взаимодействия по локальной связи (расстояния, на котором аниматы способны обмениваться данными) на эффективность группы. Из графиков на рис. 6 следует, что обмен графами наблюдения по локальной связи по-разному влияет на группы аниматов с разными показателями памяти. Так, например, для группы аниматов с показателем памяти, равным пяти тактам, наблюдается увеличение эффективности, в то время как для группы аниматов с показателем памяти, равным десяти тактам, эффективность снижается.

Для аниматов с памятью, равной пяти тактам, любое добавление локального взаимодействия положительно сказывается на эффективности, также виден некоторый порог, после которого эффективность начинает падать. Для памяти, равной десяти тактам, наблюдается небольшое увеличение эффективности при малых радиусах взаимодействия, однако в дальнейшем наблюдается сильное падение эффективности. В обоих случаях падение эффективности после определенного порога ожидаемо, так как анимат начинает реагировать на события, которые слишком далеки от него, вместо того чтобы реагировать на собственное окружение.

Рис. 7 показывает, насколько увеличилась или упала эффективность группы при добавлении алгоритмов коллективного распознавания



Рис. 7. Разница между эффективностью группы без алгоритмов коллективного распознавания и с их использованием. По оси X — показатель памяти анимата в тактах, по оси Y — разница интегрированных показателей собранной пищи группы с коллективным распознаванием и без, числами рядом с маркерами отмечен радиус локального взаимодействия

Fig. 7. The difference between the effectiveness of a group without collective recognition algorithms and using them. On the X-axis — the indicator of the animat's memory in bars, on the Y-axis — the difference in the integrated indicators of the collected food of the group with and without collective recognition, the numbers next to the markers indicate the radius of local interaction

с различными радиусами для разных показателей памяти. Как видно, при небольшом размере памяти анимата предложенные алгоритмы положительно влияют на эффективности группы. Для аниматов с большой собственной памятью предложенные алгоритмы, при определенных радиусах взаимодействия, работают во вред.

Демонстрационное видео с фрагментами проведенных экспериментов и их анализом доступно по ссылке https://youtu.be/7OJiGuXm22U.

Заключение

В работе была предложена модель группы аниматов, использующих зрительные анализаторы, а также алгоритмы коллективного распознавания сцен. Использование этих алгоритмов в группе аниматов на демонстрационной задаче показало, что наблюдается повышение эффективности группы. Однако и для размера визуальной памяти, и для радиуса локального взаимодействия существуют определенные значения, на которых достигается максимум эффективности. Зависимость эффективности добычи ресурсов и охраны территории от размера памяти и радиуса локального взаимодействия не является прямой. При одновременном использовании алгоритмов было замечено, что чем меньше прошедших тактов запоминает анимат, тем больший вклад в эффективность группы вносит использование алгоритма коллективного распознавания. Дальнейшие исследования в этой области будут посвящены разработке и исследованию алгоритма, определяющего соответствия между объектами, наблюдаемыми разными агентами, усложнению демонстрационной задачи и отработке алгоритмов на реальной группе роботов.

Список литературы

1. Sankaranarayanan A. C., Veeraraghavan A., Chellappa R. Object detection, tracking and recognition for multiple smart cameras // Proc. IEEE, 2008. Vol. 96, N. 10. P. 1606–1624.

2. Zervos M. Multi-Camera Face Detection and Recognition Applied to People Tracking // Sch. Comput. Commun. Sci. Ec. Polytech. Fédérale Lausanne. 2013. January.

3. **Yamashita A. et al.** Human tracking with multiple cameras based on face detection and mean shift // 2011 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2011. 2011. P. 1664–1671.

4. **Harguess J., Hu C., Aggarwal J. K.** Fusing face recognition from multiple cameras // 2009 Work. Appl. Comput. Vision, WACV 2009. 2009.

5. An L., Kafai M., Bhanu B. Face recognition in multicamera surveillance videos using dynamic Bayesian network // 2012 6th Int. Conf. Distrib. Smart Cameras, ICDSC 2012. 2012. 6. Карпов В. Э., Карпова И. П., Кулинич А. А. Социальные сообщества роботов. М.: УРСС, 2019. 352 р.

7. SwarmRobot. Официальный сайт проекта SwarmRobot [Electronic resource]. 2016. URL: http://www.swarm-bots.org (дата обращения: 03.03.2020).

8. **Kernbach S.** Handbook Of Collective Robotics // Handbook of Collective Robotics — Fundamentals and Challenges. 2013. Vol. 2, N 2000. P. 978–981.

9. Giusti A. et al. Cooperative sensing and recognition by a swarm of mobile robots // IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst. 2012. P. 551–558.

10. **Stegagno P., Massidda C., Bülthoff H. H.** Object Recognition in Swarm Systems: Preliminary Results // Workshop on the Centrality of Decentralization in Multi-Robot Systems: Holy Grail or False Idol? (IEEE ICRA 2014). 2014. P. 1–3.

11. Maghami M., Koval M. C., Georgiopoulos M., Rubinoff A. E. A Social Network Analysis for Automatic Target Recognition in Swarm Robotics // International Conference on Robotics and Automation 2010 (ICRA 2010). 2010.

12. Московский А. Д., Бургов Е. В., Овсянникова Е. Е. Зрительный анализатор анимата как основа семантики сенсорной системы робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Vol. 5, N. 19. Р. 336—345.

13. Meyer J. A., Wilson S. Simulation of Adaptive Behavior: from Animals to Animats. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.

14. **Захаров А. А.** Муравьи лесных сообществ, их жизнь и роль в лесу. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 404 р.

15. Forel A. The social world of ants. Bradford, 1928.

16. **Topoff H.** An ant nest hat facilitates removing at all stages at development // Ann. Entomol. Soc. Amer. 1975. Vol. 68, N. 1. P. 182–183.

17. Резникова Ж. И. Межвидовые взаимоотношения у муравьев. Новосибирск: Наука, 1983. 208 р.

18. **Бургов Е. В.** Многовидовая ассоциация муравейников: переход из неполной в полную ассоциацию // Зоологический журнал. 2015. Vol. 94, № 10. Р. 1200—1210.

19. **Cammaerts M.-C.** Colour vision in the ant Myrmica sabuleti MEINERT, 1861 (Hymenoptera: Formicidae) // Myrme-cological News. Österreichische Gesellschaft für Entomofaunistik, 2007. Vol. 10. P. 41–50.

20. **Cammaerts M.-C. et al.** Use of olfactory and visual cues for orientation by the ant Myrmica ruginodis (Hymenoptera: Formicidae) // Myrmecological News. Österreichische Gesellschaft für Entomofaunistik, 2012. Vol. 16. P. 45–55.

21. **Hölldobler B.** Multimodal signals in ant communication // J. Comp. Physiol. A. 1999. Vol. 184. P. 129–141.

22. Федоссева Е. Б. Технологический подход к описанию групповой фуражировки муравьев *Муrmica rubra* // Зоол. журн. 2015. Vol. 94, N. 10. P. 1163—1178.

23. Длусский Г. М. Муравьи рода Формика. М.: Наука, 1967. 233 р.

24. Московский А. Д. Графы как инструмент для решения задачи распознавания сцен // Четвертый Всероссийский научно-практический семинар "Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта" (БТС-ИИ-2017, 5—6 октября 2017 г., г. Казань, Республика Татарстан, Россия) тр. семинара. 2017. Р. 56—64.

25. **Карпов В. Э.** Об одном механизме реконструкции сцен // VI-ая Международная научно-практическая конференция "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте", Сб. науч. трудов. В 2-т., Т.1, М. Физматлит. 2011. Р. 407—415.

An Approach to Scene Recognition Based on the Local Interaction of a Group of Robots

A. D. Moskovsky, moscowskyad@gmail.com, E. V. Burgov, burgov.ev@yandex.ru, E. E. Ovsyannikova, eeovsyan@gmail.com,

National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation

Corresponding author: Moskovsky A. D., Engineer-Researcher, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation, e-mail: moscowskyad@gmail.com

Accepted on September 09, 2020

Abstract

The paper considers a group of animates (bio-inspired abstract models or technical devices) that use the visual analyzer described by the authors earlier. The visual analyzer recognizes the scene observed by the animat, determines the class of the situation and selects the corresponding behavior. The analyzer is based on the" language of poses", borrowed from some species of ants, which allows them to visually inform other individuals of their condition. The first proposed algorithm describes a visual memory mechanism that allows an animat to remember seen objects for some time and select its behavior in a more stable way compared to a basic visual analyzer. The second algorithm describes a group recognition approach. Robots are able to exchange information about the scene they are observing presented in the form of a graph using local communication. The robot, receiving such information from its neighbors, is able to expand its picture of the world and more correctly choose its behavior based on the recognized situation than if it only had its own data. A demonstration task was set to test the efficiency, approximately simulating a colony of ants that gather food in a certain area. Colony, nest, food, and enemy individuals are modeled in the developed simulation environment. Group efficiency was defined as the amount of food collected over the allotted time period. Animates using the visual memory algorithm showed an increase in efficiency for all the studied memory parameters. Moreover, the dependence is not monotonic, and there is a certain value at which maximum efficiency is achieved. The use of the group recognition algorithm also showed an increase in efficiency compared to the basic visual analyzer. The experiments were carried out for different distances of local interaction. As with memory, there is a value of interaction distance at which the maximum efficiency is achieved. The combination of both algorithms also has interesting results. The experiments showed that the smaller the memory of the robot, the greater the increase in efficiency from using the collective recognition algorithm.

Keywords: collective recognition, a group of robots, animat, visual analyzer, scene analysis, local communication

Acknowledgements: This work was supported, in part, by the Russian Foundation for Basic Research, grant ofi-m 16-29-04412 (which funded sections overview of existing solutions, problem statement, visual animat memory, collective recognition, experiments), and by the Russian Foundation for Basic Research, grant ofi-m 17-29-07083 (which funded sections simulated objects and mechanisms, description of the demonstration task).

For citation:

Moskovsky A. D., Burgov E. V., Ovsyannikova E. E. An approach to scene recognition based on the local interaction of a group of robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2021, vol. 22, no. 2, pp. 94–103.

DOI: 10.17587/mau.22.94-103

References

1. Sankaranarayanan A. C., Veeraraghavan A., Chellappa R. Object detection, tracking and recognition for multiple smart cameras, *Proc. IEEE*, 2008, vol. 96, no. 10, pp. 1606–1624.

2. Zervos M. Multi-Camera Face Detection and Recognition Applied to People Tracking, Sch. Comput. Commun. Sci. Ec. Polytech. Fédérale Lausanne, 2013, January.

3. Yamashita A. et al. Human tracking with multiple cameras based on face detection and mean shift, 2011 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2011, 2011, pp. 1664–1671.

4. Harguess J., Hu C., Aggarwal J. K. Fusing face recognition from multiple cameras, 2009 Work. Appl. Comput. Vision, WACV 2009, 2009.

5. An L., Kafai M., Bhanu B. Face recognition in multicamera surveillance videos using dynamic Bayesian network, 2012 6th Int. Conf. Distrib. Smart Cameras, ICDSC 2012, 2012.

6. Karpov V. E., Karpova I. P., Kulinich A. A. Social community robots, Moscow, URSS, 2019, 352 p.

7. **SwarmRobot.** The official website of the project Swarm-Robot, 2016, available at: http://www.swarm-bots.org (accessed: 03.03.2020).

8. Kernbach S. Handbook Of Collective Robotics, *Handbook of Collective Robotics – Fundamentals and Challenges*, 2013, vol. 2, no. 2000, pp. 978–981.

9. Giusti A. et al. Cooperative sensing and recognition by a swarm of mobile robots, *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, 2012, pp. 551–558.

10. Stegagno P., Massidda C., Bülthoff H. H. Object Recognition in Swarm Systems: Preliminary Results, *Workshop on the Centrality of Decentralization in Multi-Robot Systems: Holy Grail or False Idol? (IEEE ICRA 2014)*, 2014, pp. 1–3. 11. Maghami M., Koval M. C., Georgiopoulos M., Rubinoff A. E. A Social Network Analysis for Automatic Target Recognition in Swarm Robotics, *International Conference on Robotics and Automation 2010 (ICRA 2010)*, 2010.

12. Moskovsky A. D., Burgov E. V., Ovsyannikova E. E. Visual analyzer of the animat as a semantic basis of robot sensoric system, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 5, pp. 336–345 (in Russian).

13. **Meyer J. A., Wilson S.** Simulation of Adaptive Behavior: from Animals to Animats, Cambridge, MA, MIT Press, 1991.

14. **Zaharov A. A.** Ants of forest communities, their life and role in the forest, Moscow, Tovarishhestvo nauchnyh izdanij KMK, 2015, 404 p. (in Russian).

15. Forel A. The social world of ants, Bradford, 1928.

16. **Topoff H.** An ant nest hat facilitates removing at all stages at development, *Ann. Entomol. Soc. Amer.*, 1975, vol. 68, no. 1, pp. 182–183.

17. **Reznikiva J. I.** Interspecific relationships in ants, Novosibirsk, Nauka, 1983, 208 p. (in Russian).

18. **Burgov E. V.** Multi-species association of anthills: transition from incomplete to full association, *Zoologicheskij zhurnal*, 2015, vol. 94, no. 10, pp. 1200–1210 (in Russian)..

19. **Cammaerts M.-C.** Colour vision in the ant Myrmica sabuleti MEINERT, 1861 (Hymenoptera: Formicidae), *Myrmecological News. Österreichische Gesellschaft für Entomofaunistik*, 2007, vol. 10, pp. 41–50.

20. Cammaerts M.-C. et al. Use of olfactory and visual cues for orientation by the ant Myrmica ruginodis (Hymenoptera: Formicidae), *Myrmecological News. Österreichische Gesellschaft für Entomofaunistik*, 2012, vol. 16, pp. 45–55.

21. Hölldobler B. Multimodal signals in ant communication, J. Comp. Physiol. A., 1999, vol. 184, pp. 129-141.

22. **Fedoseeva E. B.** A technological approach to the description of group foraging of ants Myrmica rubra, *Zool. Journal*, 2015, vol. 94, no. 10, pp. 1163–1178 (in Russian).

23. Dlusskij G. M. Formica ants, Moscow, Nauka, 1967, 233 p. (in Russian).

24. Moskovsky A. D. Graphs as a tool for solving the problem of scene recognition, *Fourth All-Russian Scientific and Practical Seminar "Unmanned vehicles with elements of artificial intelligence"* (UBS-AI-2017), workshop proceedings, 2017, pp. 56–64 (in Russian).

25. **Karpov V. E.** About one scene reconstruction mechanism, *VI-th International Scientific and Practical Conference "Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence", collection of scientific papers*, vol. 1, Moscow, Fizmatlit, 2011, pp. 407–415 (in Russian).

S. S. Gavruishin^{1,2}, gss@bmstu.ru, V. P. Bui¹, phuongbv1991@gmail.com,
V. B. Phung³, phungvanbinh@lqdtu.edu.vn, H. M. Dang⁴, danghoangminh@iuh.edu.vn,
V. D. Nguyen⁵, ducnv@tlu.edu.vn, Vu. C. Thanh⁶, thanhvch@gmail.com,
¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
²Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334, Russian Federation,
³Le Quy Don State Technical University, Hanoi, Vietnam,
⁴Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh, Vietnam,
⁵Thuyloi University, 175 Tay Son, Dong Da, Hanoi, Vietnam,
⁶Radar Institute, Academy of Military Science and Technology, Hanoi, Vietnam

Corresponding author: Bui V. P., Postgraduate, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: phuongbv1991@gmail.com

Accepted on October 08, 2020

Improving the Visual Interactive Analysis Method for Automation and Control of the Decision-Making Process in Multi-Criteria Design of Complex Mechanical Systems

Abstract

For multi-criteria design problems of complex mechanical systems with a large number of control parameters, technical constraints, and quality criteria, the search for Pareto solution domain takes quite a lot of time varying from hours to days. In fact, the decision-maker (DM) desires to examine a small number of reasonable Pareto optimal solutions in order to understand the problem itself and control the decision-making in a simple manner. This paper presents the improvement of a visual interaction analysis method or VIAM developed by the authors with the aim of providing a tool for DM to define the optimal and mutually-agreed solutions in the multi-criteria decision making (MCDM). Indeed, VIAM allows for evaluating the distribution domain of the Pareto optimal solutions defined by the genetic algorithm, which supports the DM to set additional thresholds for the objectives to filter the desired solutions and suggest to shrink or expand the threshold to control the search. In case of mutually-agreed solution non-existence, VIAM allows for providing instruction to reestablish the multi-objective problem that new Pareto solution domains can be found as desired by the DM. Based on VIAM, a visual interaction analysis tool or VIAT was developed by means of Matlab. VIAT was then used for the multi-criteria design of slider-crank mechanism for an innovative fruit vegetable washer with three objectives. Comparative study on the obtained results from VIAT with the existing design option and the obtained solution from the traditional method "concession by priority" has shown the effectiveness of the method proposed in this paper. VIAT is actually a very user-friendly tool that makes the multi-criteria design more practical especially for the mechanical system.

Keywords: automation, decision-making, multi-objective optimization, visual interaction analysis method, trade-off-based method

For citation:

Gavruishin S. S., Bui V. P., Phung V. B., Dang H. M., Nguyen V. D., Thanh Vu. C. Improving the Visual Interactive Analysis Method for Automation and Control of the Decision-Making Process in Multi-Criteria Design of Complex Mechanical Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 2, pp. 104–112.

DOI: 10.17587/mau.22.104-112

УДК 65.011.56: 621.01

DOI: 10.17587/mau.22.104-112

С. С. Гаврюшин ^{1,2}, д-р техн. наук, проф., gss@bmstu.ru, В. Ф. Буй ¹, аспирант, phuongbv1991@gmail.com, В. Б. Фунг ³, канд. техн. наук, phungvanbinh@lqdtu.edu.vn, Х. М. Данг ⁴, канд. техн. наук, danghoangminh@iuh.edu.vn, В. Д. Нгуен ⁵, канд. техн. наук, ducnv@tlu.edu.vn, В. Ч. Тхань⁶, канд. техн. наук, thanhvch@gmail.com ¹Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, ²Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, ³Государственный технический университет имени Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам, ⁴Индустриальный университет имени Хошимина, Хошимин, Вьетнам, ⁵Тхуилой университет, Ханой, Вьетнам, ⁶Радарный институт, Академия военных наук и технологий, Ханой, Вьетнам

Совершенствование метода визуально-интерактивного анализа для автоматизации и управления процессом принятия решений при многокритериальном проектировании сложных механических систем

При решении сложных задач многокритериальной оптимизации процесс нахождения области Парето-решения часто занимает много времени. В большинстве практических случаев лицо, принимающее решение (ЛПР), желает протестировать небольшое число разумных Парето-вариантов, чтобы облегчить понимание и управление процессом принятия решений. В данной статье рассмотрен метод визуально-интерактивного анализа (Visual Interactive Analysis Method — VIAM), разработанный авторами с целью предоставить ЛПР инструмент для управления процессом поиска рациональных оптимальных вариантов в задаче принятия решений при нескольких критериях. VIAM позволяет экспертам анализировать области Парето-решений, найденных с помощью генетического алгоритма; дает возможность ЛПР устанавливать дополнительные пороговые значения критериев для фильтрации желаемых решений. При необходимости повторно решается многокритериальная задача в целях нахождения новых лучших областей Парето-решений. На основе метода VIAM реализирована авторская программа VIAT (Visual Interactive Analysis Tool) на языке МАТLAB. VIAT применяется в задаче многокритериальной оптимизации кривошипно-шатунного механизма, использованного в моечной машине нового типа для овощей и фруктов. Сравнение результатов, полученных VIAT и традиционным методом последовательных уступок, показало эффективность метода, предложенного авторами. Необходимо отметить, что VIAM также может быть применен для автоматизации и управления процессом принятия решений в многокритериальных задачах оптимизации широкого спектра других механических конструкций.

Ключевые слова: автоматизация, принятие решений, многокритериальная оптимизация, визуально-интерактивный анализ, компромисс

Introduction

Today, multi-objective optimization methods in the field of machine design have evolved immensely around the world to respond to increasingly complex problems such as large scale, highly nonlinearity, large scale, a large number of quality criteria and constraints [1]. This raises the need to consider many aspects of the multi-objective mathematical model simultaneously. In fact, the application of multi-objective algorithms including a priori methodology, progressive methodology, a posteriori methodology, etc allows for having a multi-dimensional Pareto front used for selection of design options based on axiomatic methods or interactive man-machine (IMM) procedures [2–5]. Fig. 1 illustrates the interaction between DM and machine in IMM. DM desires to define the most favourable solution based on selections, while the machine represents an algorithm and search method, in other words the machine itself is an optimization algorithm.

However, in many cases, determination of the rational option from the set of Pareto solutions is not easy, because some of objective functions are con-





tradictory one to another [6]. In this contradiction, the value of one function is considered to deteriorate when the value of another is improved. In other words, there is no simultaneous optimal solution for all of them. Therefore, the multi-objective optimization problem most of the time comes to the choice situation, the decision must trade the advantage of one or several criteria to get that of other criteria. Decision-making techniques, or simply tools that help to make decisions, are an increasingly-evolving field that provide interesting and successful solutions. Over the last few decades, many interactive support systems have appeared on the basis of decision-making methods such as: a visual design method based on Rasmussen's abstraction-aggregation hierarchy [7], decision-making spheres based on the even swap concept [8], PriEsT [9], AHP-GAIA [10], VIDEO [11] etc. One of the most effective decision-making techniques is trade-off-based method, which has been used based on value comparison of objective functions. In general, trade-off means that on the basis of a reference objective function, DM needs to quantify the increment of the rest function to compensate for the reduction of the reference one. Thus, a trade-off can provide an exact search direction for determination of a desirable solution. There are many IMM methods based on the trade-off such as Even Swap method [12], interactive step exchange method based on slope GRIST [13], PROJECT method [14], IMO method driven by evolutionary algorithm (T-IMO-EA) [15] etc. Methods in different classes have their strengths and weaknesses and for that reason different approaches are needed. Overlapping and combinations of classes are possible and some methods can belong to more than one class depending on different interpretations. Selection of the appropriate method depends on the size (number of objectives, constraints, and parameters), mathematical models, the need and DM interoperability, computational cost (programs calculation, time consumption), and others. Although there are many interactive methods used for solving the multi-objective optimization problem in case of designing mechanical systems, their disadvantages are following: i) it needs to have intuitive interactive interfaces that requires specialized software programs, leading to problems with software licensing or funding; ii) secondly, in complex mathematical models, it takes a lot of time to determine the Pareto optimal solutions (POS), this may require to purchase supercomputers with fast computing capabilities. When there is a long timespending, the interaction with the DM becomes inconvenient.

In order to deal with the above mentioned limitations, this paper presents the visual interactive analysis method or VIAM that helps DM to define the optimal and mutually-agreed solutions in MCDM. VIAM allows for evaluating the distribution domain of the POS defined by the genetic algorithm, which in turn supports DM to set additional thresholds for objective function to filter the desired solutions. In case of mutually-agreed solution nonexistence, VIAM provides the direction to reestablish the multi-objective problem, so that new Pareto solution domains can be established as desired by the DM. Based on VIAM, a visual interactive analysis tool or VIAT is developed on the basis of Matlab. VIAT is then used for the multi-criteria design of slider-crank mechanism for a new type of fruit vegetable washer with three objectives. Comparative study on the obtained results from VIAT with the initial design plan and the one from the traditional method "concession by priority" is carried out in order to prove the effectiveness of the method proposed in this paper.

The visual interactive analysis method

VIAM has had many remarkable research achievements in the field of multi-criteria design optimization of mechanical systems. It was first developed in 2013 in the doctoral thesis of H. M. Dang (VIAM1) by using parameter space investigation algorithms in combination with single-objective optimization in order to find manufacturing technology solutions for compression cylinders made of composite materials [16]. In 2017, V. B. Phung [17, 18] developed VIAM2 on the basis of a single-objective optimization algorithm and priority selection method for the multi-criteria design of an innovative frame saw machine. While VIAM3 is proposed in this paper, it uses a multi-parameter approach based on concurrent engineering principles to solve the multi-objective optimization problem. VIAM3 allows for automation of solution search without DM waiting. The obtained results can be illustrated visually so that DM can analyze and suggest changes. Then, the search will continue. The visual tool is an objective function diagram that can be easily plotted without the need of complex software. In a nutshell, VIAM3 allows DM to pause the search of Pareto solutions based on quantity and distribution of the solution domain on a visual tool, so that mutually-agreed solutions can be immediately defined in the current Pareto domain. VIAM3 algorithm flowchart is presented in Fig. 2.

{1}: Starting from the multi-objective mathematical model, it needs to *define the bounds of control parameters, technical constraints, and quality criteria or objective functions*. The multi-objective optimization problem is stated as follows:

Problem: generic multi-objective optimization

$$\min_{\mathbf{x}} \left[\Phi(\mathbf{x}) = \Phi_1(\mathbf{x}) \Phi_2(\mathbf{x}) \dots \Phi_n(\mathbf{x}) \right]^{\mathrm{T}} \ (n \ge 2)$$

subject to

$$g(\mathbf{x}) \leq 0,$$

$$h(\mathbf{x}) = 0,$$

$$\mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u$$

where Φ is a vector of *n* objective functions, *g* and *h* are inequality and equality constraint vectors, respectively, x_l and x_u are the lower and upper bounds of the design variables, respectively, and *x* is a vector of design variables.

{2}: Building a visual interactive graph on parallel coordinate system by:

— Defining the maximum and minimum achievable values of each objective function (independent of each other) by using single objective optimization algorithms such as genetic algorithm (GA), nonlinear programming, ect.

- Determining the feasible solution domain (FD) of the objective functions by using the parameter space-filling algorithms such as: Sobol sequence, Halton sequence, ect.

- Determining the POS domain by using multiobjective optimization algorithms such as GAmulti-objective, PSO, NGSA, ect.



Fig. 2. VIAM3 algorithm flowchart

- Generation and normalization of the POS using formula:

$$n-directional Pareto space$$

$$\left\|\Phi_{i}\right\| = \frac{\Phi_{i} - MAX\Phi_{i}}{MAX\Phi_{i} - MIN\Phi_{i}},$$

where $\|\Phi_i\|$ is the *i*-th normalized objective function: $0 \le \|\Phi_i\| \le 1, \quad i = 1...n.$

The visual interactive panel in Fig. 3 allows for converting the *n*-dimensional Pareto space into the 2-dimensional normalized space, and at the same time it helps DM to acquire the conflicts of objective functions thanks to the appearance of the sign "X" among them. This makes a firm basis for the subsequent trade-off decision-making process.

{3}: *DM decides to suspend the POS* search based on quantity and distribution of solutions on the interactive graph with the aim of selecting the mutually-agreed solutions.

{4}: Setting bounds for objective functions to search solutions. Threshold rules are established for different types of objective functions, as illustrated in Fig. 4. In the multi-objective optimization problem, the objective functions are distinguished by a narrow (type I) or wide (type II) range of value changes. The best value of objective "type I" is often accompanied by the worst value of objective "type II", which is in com-

pliance with the Pareto principle. It is quite difficult to select all the best values of all objective functions simultaneously, in some cases it is even impossible.

In order to define the mutually-agreed solution, DM needs to use a compromise rule: accept to trade

Fig 3. Visual interactive panel



Fig. 4. Classification of objective functions



Fig. 5. Existing (a) and calculated (b) model of SCM used for the fruit vegetable washer:

 $X_{O/A/B}$, $Y_{O/A/B}$ – reactions at the joints *O*, *A*, *B* along the positive direction on the x- and y-axes, respectively; N_1 , N_2 – compression loads at the joint *A* of crankshaft and connecting rod, respectively; *T* – bending force at joint A of crankshaft; $\varphi(t)$ – angle of rotation; M – engine torque

the nearly-worst solution $\|\Phi^+\|$ of objective "type I" and filter out the best solutions $\|\Phi^-\|$ of objective "type II" on the principle of setting the following threshold limit $[\|\Phi_i\|]$:

$$[||\Phi_i||] = \begin{bmatrix} [||\Phi_i||]^{\text{type I}} = ||\Phi_i||^+ \\ [||\Phi_i||]^{\text{type II}} = \frac{||\Phi_i||^+ + ||\Phi_i||^-}{\zeta}, \quad \zeta \ge 2, \end{bmatrix}$$

where ζ – positive real number

{5: *Pareto filter.* After the thresholds have been established, the process of filtering out the best solution is automatically performed on the basis of checking the *n* constraints $g(\Phi_i)$ of *n* objective func-

tions: $g(\Phi_i) = ||\Phi_i|| - [||\Phi_i||] \le 0$ with i = 1...n. There are three possibilities:

(*i*) If there exists the solution that the expert agreed mutually, the final option can be concluded immediately;

(*ii*) In case there exist many solutions that are still controversial, it is necessary to tighten the threshold value $[||\Phi_i||]^{\text{type II}}$ by increasing the value ζ . Filtering continue until the mutually-agreed solution is achieved;

(*iii*) In case there is no mutually-agreed solution even though all possible $g(\Phi_i)$ constraints have been established, this indicates that the POS does not currently have the most favorable solution. At this point, VIAM3 allows users to reset the original multi-objective problem on the basis of adding constraints $g(\Phi_i)$ with the aim of finding new "better" POS domain than previous one. It is noted that for the objective "type II" the threshold value needs to be loosened: $[||\Phi_i||]^{type II} \ge ||\Phi_i||^+$.

DM continues to define the moment to stop the search algorithm when a new POS is eligible to make a decision to choose the mutually-agreed solutions. This process is repeated over and over on the basis of compromise rules {4} until the mutually-agreed options is achieved. In addition, VIAM3 also allows for evaluating the range of the control parameters corresponding to the obtained mutuallyagreed solutions, and at the same time correct this range when repeating calculations for determination of additional design options.

Application of VIAM3 in multi-criteria design of transmission system for fruit vegetable washer. Problem statement

Lately, concurrent engineering, which has been widely used, has brought positive effects in engineering, one of which is machine design and manufacture [19]. The advantage of concurrent engineering design engineering is the use of multi-objective mathematical models with the aim of identifying the optimal design options right in the early stages of the design process. Consider an example of concurrent design technique in the multi-objective optimization problem of slider-crank mechanism (SCM) for the fruit vegetable washer, as shown in Fig. 5 [20]. The multi-objective mathematical model consists of 11 control parameters α , 3 quality objective function $\Phi(\alpha)$, and 16 constraints $g(\alpha)$. The aim is to define a set of control parameters which is the detailed size of SCM components $\alpha = \{\alpha_1...\alpha_{11}\}$ in order to simultaneously minimize power consumption (Φ_1), structure weight (Φ_2) and dynamic reaction at rotating joints (Φ_3) on the basis of meeting the constraints of structure, technology, and admissible size. Details of the mathematical model are described elsewhere in Ref. [21, 22].

$$\begin{aligned} \underset{\alpha \in D(\alpha)}{\text{minimize}} &: \Phi(\alpha) = \{\Phi_1(\alpha), \dots, \Phi_3(\alpha)\} \\ \text{subject to} &: D(\alpha) = \{\alpha \mid g(\alpha) = \\ &= \{g_1(\alpha), \dots, g_{16}(\alpha)\} \leq 0\} \subset \alpha = R^N \\ &\alpha_{l_i} \leq \alpha_i \leq \alpha_{u_i}, \ i = 1..11 \end{aligned}$$

Control of decision-making process in multi-criteria design of SCM by using VIAT tool

The VIAM3 proposed in this paper is developed by using the VIAT tool on the Matlab programming language. The interface of VIAT used for dealing with the multi-objective optimization problem of SCM is shown in Fig. 6. While, the decision-making process based on analysis and visual interaction between DM and VIAT is explained in Fig. 7.



Fig. 6. Interface of VIAT tool

Table 1

Method	α1	α2	α3	α4	α ₅	α ₆	α ₇	α ₈	α9	α ₁₀	α ₁₁
S 0	0.149	0.079	912.5	0.812	0.518	0.498	0.341	0.17	0.267	0.280	0.190
СР	0.162	0.095	618.5	0.797	0.489	0.436	0.414	0.25	0.204	0.249	0.188
VIAM	0.094	0.044	487.7	0.670	0.472	0.321	0.551	0.25	0.193	0.109	0.196





Fig. 7. Decision-making process of DM by using the author's VIAT tool

Results and discussion

The design options of SCM structure (dimensions — control parameters) and values of the objective functions are provided in Table 1 and Table 2 respectively, where: S0 — existing structure of SCM [23], CP — the traditional method "Concession by Priority" [24].

Looking into the graph in Fig. 8, it is seen that the solution obtained by the VIAM3 is the best in terms of two objective functions Φ_2 and Φ_3 (reduce 70.42 % and 32.58 % respectively), but the decrease of Φ_1 (-0.09 %) is the worst in comparison with the solution obtained by the CP (-2.39 %). Albeit being the worst, $\|\Phi_1\|$ – objective function "type I'' — is still within the admissible threshold of 0.1. It is observed that the objective values Φ_1 in the solutions are very close one to another. Thus, DM would barely care for this discrepancy. However, it is evident that DM could hardly be aware of the existence of this circumstance, unless they perform the solution search by using the VIAM3. In summary, it comes to the trade-off situation, but what objective function to trade, how much, and what benefit from other objectives are still as a potential research area. Therefore, the VIAM3 promises to make sense in helping DM to make a decision in the design of complex mechanical systems.

The range of the control parameters is specified by expanding the filtering threshold in step 3 (Fig. 7).

Table	2

Comparison of objective functions in SCM design by different methods

Objective functions	S 0	СР	VIAM3
Φ ₁ , W	40.022	39.067	39.988
Comparison Φ_1 , %	_	-2.39 %	-0.09 %
Φ ₂ , Kg	2.497	1.894	0.739
Comparison Φ_2 , %	_	-24.14 %	-70.42 %
Φ ₃ , N	120.8	92.391	81.464
Comparison Φ_3 , %	_	-23.53 %	-32.58 %

With the new control parameter domain, as shown in Fig. 9, VIAM3 allows DM for defining more POS in order to find additional design options.

Conclusion

This paper studied the improvement of the visual interactive analysis method (VIAM3) with the aim of providing an automatic tool to control the decision-making process in dealing with multi-objective optimization of mechanism. Based on the evaluation of the distribution domain of Pareto optimal solutions, that defined by GA, if it is required, DM can reorient the search objective, thereby it is possible to reestablish the problem statement and approach to the most favorable solutions. Based on VIAM3, the VIAT automation tool was developed by using Matlab programming language. The effectiveness and validity of the method proposed in this paper was confirmed in the application for multi-objective optimization problem of SCM used in the fruit vegetable washer with three objective functions. Comparing the obtained solution from VIAT with the existing structure and the one from the traditional method "concession by priority", it showed that there is a trade-off of the power reduction (-0.09 %) allows for a significant improvement



Fig. 8. Comparing the normalization of objective functions on parallel coordinate system and 3D model of SCM corresponding to the obtained solutions



Fig. 9. Range of the control parameter values after expanding the filtering threshold

of the reduction of weight (-70.42 %) and dynamic reaction (-32.58 %) of SCM. Finally, it should be emphasized that the proposed VIAM3 can be widely applicable for the multi-criteria design of other complex mechanical systems.

References

1. **Deb K.** Multi-objective optimization, *Search methodologies*, Springer, Boston, MA, 2014, pp. 403-449.

2. Chiandussi G., Codegone M., Ferrero S., Varesio F. E. Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications, *Computers and Mathematics with Applica-tions*, 2012, no. 63, pp. 912–942.

3. Jurgen Branke, Kalyanmoy Deb, Kaisa Miettinen, Roman Slowinski. Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 481 p.

4. Cui Y, Geng Z, Zhu Q, Han Y. Review: Multi-objective optimization methods and application in energy saving, *Energy*, 2017, vol. 125, pp. 681–704.

5. Nogin V. D. Restricting the Pareto set: an axiomatic approach, Moscow, Fizmatlit, 2015, 236 p. (in Russian).

6. Statnikov R. B., Gavrushin S. S., Dang M. H., Statnikov A. R. Multicriteria Deisgn of Composite Pressure Vessels, *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 252–278.

7. Rouse W. B., Pennock M.J., Oghbaie M., Liu C. Interactive visualizations for decision support: application of Rasmussen's abstraction-aggregation hierarchy, *Applied Ergonomics*, 2017, no. 59, pp. 541–553.

8. Li H. L., Ma L. C. Visualizing decision process on spheres based on the even swap concept, *Decision Support Systems*, 2008, no. 45 (2), pp. 354–367.

9. Siraj S., Mikhailov L., Keane J. A. PriEsT: an interactive decision support tool to estimate priorities from pairwise comparison judgments, *International Transactions in Operational Research*, 2015, no. 22 (2), pp. 217–235.

10. Ishizaka A., Siraj S., Nemery P. Which energy mix for the UK? An evolutive descriptive mapping with the integrated GAIA (graphical analysis for interactive aid)-AHP (analytic hierarchy process) visualization tool, *Energy*, 2016, no. 95, pp. 602–611.

11. **Kollat J. B., Reed P.** A framework for visually interactive decision-making and design using evolutionary multi-objective optimization (VIDEO), *Environmental Modelling & Software*, 2007, no. 22 (12), pp. 1691–1704.

12. Hammond J. S., Keeney R. L., Raiffa H. Even swaps: A rational method for making trade-offs, *Harvard Business Review*, 1998, vol. 76, pp. 137–150.

13. Yang J., Li D. Normal vector identification and interactive tradeoff analysis using minimax formulation in multi-objective optimization, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* – *Part A: Systems and Humans*, 2002, vol. 32, no. 3, pp. 305–319.

14. Luque M., Yang J., Wong B. Y. H. PROJECT method for multi-objective optimization based on gradient projection and reference points, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans*, 2009, vol. 39, no. 4, pp. 864–879.

15. Chen L. Xin B., Chen J. A trade-off based interactive multi-objective optimization method driven by evolutionary algorithms, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 284–292.

16. **Dang Hoang Minh.** Automation and control the design and production of composite cylinders manufactured by the winding method, PhD dissertation, Moscow, 2013, pp. 206(in Russian).

17. **Phung Van Binh.** Automation and control the decisionmaking process in the multi-criteria design of the saw unit of the sawmill. PhD dissertation, Moscow, 2017, pp. 157 (in Russian).

18. Dang H. M., Phung V. B., Bui V. P., NguyenV. D. Multicriteria design of mechanical system by using visual interactive analysis tool, *Journal of Engineering Science and Technology*, 2019, vol. 14, no. 3, pp. 1187–1199.

19. Dieter George Ellwood, Linda C. Schmidt. Engineering design, Boston, McGraw-Hill Higher Education, 2009, pp. 912.

20. Dang H. M., Bui V. P., Phung V. B., Nguyen V. D. Design, development and performance evaluation of a new-type fruit vegetable washer, *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments*, 2020, vol. 43, no. 4, pp. 265–274.

21. Bui V. P., Gavriushin S. S., Phung V. B., Dang H. M., Dang V. T. Generalized mathematical model of a slider-crank mechanism with spring used in a new-type fruit vegetable washer, *The 26-th international scientific symposium named after A. G. Gorshkova, Kremenki*, 2020, vol. 1, pp. 75–77 (in Russian).

22. Nga N. T., Minh D. H., Hanh N. T., Binh P. V., Phuong B. V., Viet D. N. Dynamic analysis and multi-objective optimization of slider-crank mechanism for an innovative fruit and vegetable washer, *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments*, 2020, vol. 43, no. 2, pp. 127–143.

23. Bui V. P., Gavriushin S. S., Phung V. B., Dang H. M., Prokopov V. S. Dynamic and stress analysis of the main drive system in design process of an innovative fruit-vegetable washer, *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, vol. 100, no. 4.

24. Bui V. P., Gavriushin S. S., Phung V. B., Dang H. M., Prokopov V. S. Automation and management of design process of the main drive for an innovative fruits and vegetables washer, *Information Technology*, 2021, vol. 27, no. 2 (accepted) (in Russian).

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Стромынский пер., 4

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

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор М. Ю. Безменова.

Сдано в набор 21.11.2020. Подписано в печать 25.01.2021. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН221. 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 "Адвансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Адвансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru