

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 24

2023

№ 4

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
ШЕРБАТЮК 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
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.
МАГОМЕДОВ М. Х., д.ф.-м.н.
ПУТОВ В. В., д.т.н.
ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.
РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.
ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.
ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:
АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Карпов В. Э., Воробьев В. В., Ровбо М. А. О некоторых аспектах применения автоматических моделей в групповом управлении171

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Yordanova S. T., Slavov M. N., Stoitseva-Delicheva D. R. Design and Genetic Algorithms Based Optimisation of Industrial Adaptive PID FLC System of Liquid Level181

Антонов В. В., Кромина Л. А., Родионова Л. Е., Фахруллина Л. А., Баймурзина Л. И., Пальчевский Е. В., Родионов Е. А. Концепция формирования интеллектуальных управляющих систем энергоснабжения городских сетей190

Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г., Якимов М. Ю., Котов М. А. Определение динамических характеристик системы управления мощностью излучения технодинамических CO₂-лазеров с накачкой несамостоятельным тлеющим разрядом ...199

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Бобков В. А., Морозов М. А., Кудряшов А. П., Инзарцев А. В. Инспекция корпуса судна с использованием автономного подводного робота, оснащенного стереофотокамерой206

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Козлова Н. Ю., Фомичев А. В. Алгоритмизация наведения и управления движением космическим манипуляционным роботом в задачах сервисного обслуживания некооперируемого космического аппарата216

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://mech.novtex.ru>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 24

2023

No. 4

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

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

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

PESHEKHONOV V. G.

REZCHIKOV A. F.

SCHERBATYUK A. F.

SEBRYAKOV G. G.

SIGOV A. S.

SOJFER V. A.

SOLOMENTSEV Yu. M.

VASSILYEV S. N.

YUSUPOV R. M.

ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan

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

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.

MAGOMEDOV M. Kh.

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.

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

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

- Karpov V. E., Vorobiev V. V., Rovbo M. A. About Some Aspects of Finite State Machine Models Application to Group Control 171

AUTOMATION AND CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES

- Yordanova S. T., Slavov M. N., Stoitseva-Delicheva D. R. Design and Genetic Algorithms Based Optimisation of Industrial Adaptive PID FLC System of Liquid Level 181
- Antonov V. V., Kromina L. E., Rodionova L. E., Fakhrullina A. R., Baimurzina L. I., Palchevsky E. V., Rodionov E. A. The Concept of Formation of Intelligent Control Systems of Power Supply of Urban Networks 190
- Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Solovyov N. G., Yakimov M. Yu., Kotov M. A. Dynamic Characteristics Determination of the Radiation Power Control System for the Industrial CO₂ Laser Excited by a Nonself-Sustained Glow Discharge 199

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Bobkov V. A., Morozov M. A., Kudryashov A. P., Inzartsev A. V. Ship Hull Inspection Using Autonomous an Underwater Vehicle with a Stereo Camera 206

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

- Kozlova N. Yu., Fomichev A. V. Algorithmization of Guidance and Motion Control of a Space Manipulation Robot in the Service Tasks of a Non-Operative Spacecraft 216

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

В. Э. Карпов, канд. техн. наук, доц., нач. лаб. робототехники, karprov_ve@mail.ru,
В. В. Воробьев, зам. нач. лаб. робототехники, gatus86@mail.com,
М. А. Ровбо, науч. сотр., rovboma@gmail.ru,
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва

О некоторых аспектах применения автоматных моделей в групповом управлении

Рассматриваются особенности применения дискретно-событийных моделей для управления согласованным поведением групп агентов и предлагается механизм организации управления поведением на основе иерархии конечных автоматов. Базовый уровень управления движением агентов использует непрерывную модель совместного движения — метод потенциалов, в котором направление движения определяется итоговой суммой сил "отталкивания", "притяжения" и "выравнивания курса". В работе описывается множество частных правил группового движения агентов — когезия, распределение, следование за лидером, движение вдоль цепочки ориентиров, преследование и т. д. При этом все они трактуются в терминах результатов работы автоматных моделей. Было проведено математическое моделирование процесса управления группой агентов с использованием частных правил группового движения, которое подтвердило их работоспособность. Также были проведены вычислительные эксперименты с помощью 3D-симулятора Gazebo. Кроме того, в работе описывается экспериментальная группировка подводных аппаратов в составе трех экземпляров, с помощью которых отработывались частные правила группового движения: когезия, распределение, движение за лидером. Связь между аппаратами осуществлялась с помощью системы инфракрасных приемопередатчиков, по псевдоаналоговому каналу. Она позволяет устойчиво принимать сигнал, который является закодированным числом в диапазоне от нуля до пятнадцати, в воде на расстоянии до сорока—пятидесяти сантиметров. Эксперименты проводились в лабораторном бассейне и завершились успешно.

Показано, что технология создания систем группового управления, основанная на иерархии автоматов (метаавтоматов), позволяет решать задачи управления не только на уровне абстрактных моделей и имитационного моделирования, но и на уровне создания реальных робототехнических комплексов.

Ключевые слова: конечный автомат, групповое управление, модели движения, поведение, метод потенциалов, автоматное управление, иерархия в управлении

Введение

Одним из классических методов управления в технических системах являются дискретно-событийные модели в виде конечных автоматов (КА) или эквивалентные им механизмы. Важной особенностью КА является способность их формальной верификации. Более того, их разработка под конкретную задачу в отдельных случаях может быть автоматизирована, например с помощью формальных или даже эволюционных методов [1].

Применение конечно-автоматного управления в робототехнических системах имеет некоторую специфику. Если простые последовательности операций допускают использование КА как формы описания алгоритма функционирования, то более сложные задачи, связанные с реализацией поведения в сложных средах, требуют особого подхода. Так, при разработке комплексных программ поведения для роботов

удобными с точки зрения человеческого восприятия представляются так называемые деревья поведений [2], позволяющие представлять управляющие структуры в виде иерархии задач. При этом деревья поведений и КА эквиваленты по возможностям представления поведения.

Особое место автоматные модели занимают в групповом управлении, где КА используются, как правило, для определения верхнего, координирующего уровня управления [3]. Например, сначала группа роботов формирует построение, после чего приступает к исследованию территории, а в случае чрезмерного отклонения от заданного построения возвращается к перестроению. При этом базовые задачи стайного движения решаются путем формирования управляющих сигналов напрямую исходя из параметров окружающей среды. Это характерно для различных алгоритмов следования, движения строем [4], а также многочисленных моделей поведения на основе управления скоростью [5].

Решение задач, связанных с реализацией сложного поведения в динамически меняющейся среде, естественно, основывается на создании иерархии управления. Иерархии с верхним планирующим и нижним исполнительным уровнями применяются как для отдельных агентов [6], так и для групп агентов [7]. Тем не менее, существуют области группового управления, где не требуется решения интеллектуальных задач, требующих того же планирования или сложной координации действий. Обычно это такие задачи, в которых достаточно ограниченного локального взаимодействия и выбора того или иного поведения в зависимости от состояния ближайших соседей. Подобные системы называются роевыми, а в качестве показательного примера можно взять задачу согласованного движения группы подводных аппаратов. Помимо удобства исследования благодаря более свободному перемещению роботов в среде по сравнению с наземными роботами здесь имеется значительный потенциал для практического применения групповой робототехники [8], например, при решении задач мониторинга, исследования поверхности дна, поиска и спасения, сбора мусора и других. Так, в работе [9] с помощью группы подводных роботов демонстрируются результаты работы биологического алгоритма распределения задач.

Вместе с тем, подводная среда определяет принципиальные ограничения сенсорных и коммуникативных возможностей роботов. Это особенно актуально для малых аппаратов, несмотря на то, что в них могут использоваться камеры и габаритные маяки, как это было представлено в платформе *Blueswarm* [10]. Такая принципиальная ограниченность восприятия мира роботом позволяет говорить о том, что для управления его поведением достаточно моделей рефлекторного (дискретно-событийного) уровня.

Если рассматривать вместо алгоритмов планирования поведенческие шаблоны, переключаемые агентом в зависимости от ситуации, то образуется естественная иерархия управления. Совмещение высокоуровневого управления на основе КА, отвечающих за переключение низкоуровневых двигательных поведенческих процедур, является одним из способов организации сложного агента, способного выполнять различные модели поведения в рамках решения целевой задачи.

В предлагаемой работе рассматриваются особенности применения подхода на основе иерархии

КА для задачи управления группой подводных мобильных роботов. Сначала будет приведено описание основного объекта — агента как модели мобильного робототехнического устройства. Далее будут описаны законы его базового движения и рассмотрены вопросы представления сложного поведения на базе конечно-автоматных моделей. В заключительной части будут представлены вычислительные эксперименты, а также описание экспериментов с реальными объектами.

Модель агента

Пусть у нас имеется некоторое устройство, оснащенное множеством сенсоров и способное к перемещению в трехмерном пространстве. Для определенности будем полагать, что это автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) или робот. Чтобы абстрагироваться от технических деталей, будем использовать вместо термина "АНПА" термин "агент".

Агент A_{fish} задается пятеркой

$$A_{fish} = \langle name, C, R, S, F \rangle, \quad (1)$$

где $name$ — уникальное имя агента (идентификатор); C — множество характеристик агента; R — его пространственное положение; S — состояние сенсорной системы; F — функция управления.

Функция управления F определяет пространственное положение агента:

$$F(C, R_t, S) \rightarrow R_{t+1}. \quad (2)$$

Базовыми характеристиками агента является тройка

$$C = \langle tip, \omega, size \rangle,$$

где tip — элемент некоторого множества возможных типов агентов. Используется для реализации разных видов поведения по отношению к соответствующим категориям агентов (*свой, чужой, жертва, нарушитель* и т. п.); ω — вес агента, $\omega \in \mathbb{R}$. Используется как основная характеристика при реализации иерархии управления; $size$ — размер агента, $size \in \mathbb{R}$. Определяет геометрические характеристики агента.

В зависимости от специфики решаемых задач набор характеристик C может расширяться.

Пространственное положение R задается тройкой

$$R = \langle X, v, A \rangle, \quad (3)$$

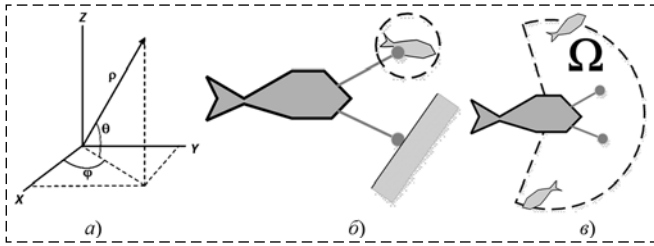


Рис. 1. Сферическая система координат агента:

$v = \rho$, $\alpha_{yaw} = \varphi$, $\alpha_{pitch} = \theta$ (а); датчики-дальномеры, (б); область видимости агента Ω (в)

Fig. 1. Agent's spherical coordinate frame:

$v = \rho$, $\alpha_{yaw} = \varphi$, $\alpha_{pitch} = \theta$ (а); rangefinders (б); agent's field of view Ω (в)

где X — координаты агента, $X \in \mathbb{R}^3$; v — скорость движения; A — тройка углов Эйлера, $A = (\alpha_{yaw}, \alpha_{pitch}, \alpha_{roll})$; α_{yaw} , α_{pitch} , α_{roll} — углы рыскания, тангажа и крена соответственно. Фактически, пара (v, A) определяет сферические координаты агента, кроме крена, который во многих задачах, связанных с групповым движением, не важен. Использование углов Эйлера обусловлено лишь соображениями удобства и наглядности.

Знание координат агента X не является обязательным, явное задание X определяется исключительно общностью рассуждений. Далее будем полагать, что скорость v и углы α_{yaw} , α_{pitch} соответствуют длине радиус-вектора ρ и углам φ и θ (рис. 1, а).

Сенсорная система

"Контактные" сенсоры-дальномеры. Для удобства управления и решения некоторых тактических задач будем полагать, что у агента имеются два сенсора-отрезка, определяющие объекты, которые пересекаются этими отрезками. Точки пересечения определяют расстояние до обнаруженных объектов (рис. 1, б).

Область видимости. Предположим, что сенсорика агента позволяет получить информацию о координатах, скоростях и углах ориентации некоторого множества агентов Ω_s , попавших в его зону видимости — некоторую область пространства \mathbb{R}^3 вблизи агента (рис. 1, в). Ω_s может представлять собой множество индексов — идентификаторов агентов, а может содержать полный список наблюдаемых агентов целиком.

Обозначим $\langle X_s, v_s, A_s \rangle$ — средние значения координат, скорости и ориентации наблюдаемых в этой области агентов. При этом пусть они вычисляются исходя из весов ω_i агентов. Тогда компоненты координат центра тяжести наблюдаемых агентов вычисляются как

$$X_{sk} = \frac{\sum_{i \in \Omega_s} X_{ik}}{\sum_{i \in \Omega_s} \omega_i}, \quad k = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Здесь X_{ik} — компоненты вектора координат X_i наблюдаемого агента.

Аналогично определяются средние скорости v_s и вектор ориентации A_s :

$$v_s = \frac{\sum_{i \in \Omega_s} v_i \omega_i}{\sum_{i \in \Omega_s} \omega_i}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где v_i — скорости агентов; A_s определяется как итоговая ориентация суммы векторов скоростей агентов v_i .

Соответствующие вектору управления $v_{ctl} = (v_x, v_y, v_z)$ координаты также можно записать в сферических координатах через углы $\varphi = \alpha_{yaw}$ и $\theta = \alpha_{pitch}$ вокруг осей Oz в виде

$$v_{ctl} = |(v_x, v_y, v_z)| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}; \quad (6)$$

$$\varphi = \arctg \frac{v_y}{v_x}; \quad \theta = \arctg \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{v_z}.$$

Область видимости задается либо полной сферой наблюдения, либо только передней полусферой (что ближе к реальности). Обозначим радиус сферы наблюдения FOV . Это параметр используется при определении законов движения.

При описании алгоритмов мы будем использовать следующие соглашения. Обращение к сенсорике агента a будем обозначать $a.Sensors[T]$, где T — категория или тип детектируемого объекта. Это относится как к случаю обращения к объектам, попавшим в область видимости Ω агента, так и к обращению к управляющим параметрам или измеряемым величинам. Так, определение целевого угла движения определяется содержимым некоторого виртуального сенсора (псевдосенсора) $a.Sensors['goal_angle'] = \langle \alpha_{yaw}, \alpha_{pitch}, \alpha_{roll} \rangle$. Аналогичным образом будем обозначать обращение к объектам области видимости, препятствиям и т. п.

Законы движения

Рассмотрим далее ряд законов согласованного движения группы агентов. Эти законы основаны на классической модели движения К. Рейнольдса [11]. Общие правила движения агентов (бойдов — boids — в терминологии

гии Рейнольдса) просты и заключаются в том, что агент (а) не должен приближаться близко к другим агентам, (б) должен двигаться туда, куда все и (в) стремиться не отдаляться от других. Таким образом, реализуются следующие правила стайного движения:

1. *Отталкивание (Separation)*. Избегание скопления соседей, ближнее отталкивание.

2. *Выравнивание курса (Alignment)*. Придерживаться среднего курса соседей.

3. *Когезия (Cohesion)*. Ориентация на среднее положение соседей, "притяжение" с больших расстояний.

Эти действующие на агента "силы" условно изображены на рис. 2.

На самом деле, правила движения агентов естественным образом описываются в терминах потенциальных полей, каждое из которых определяется действием соответствующего правила движения. Все программы движения, определяющие действия того или иного правила или закона, возвращают вектор функции управления F (строго говоря — кортеж из двух элементов):

$$Prog(agent) \rightarrow F = (v_{ctl}, [A_{yaw}, A_{pitch}, A_{roll}]), \quad (7)$$

представляющий линейную скорость и ориентацию в виде тройки углов Эйлера соответственно. Модуль вектора скорости будет также обозначаться $|F|$, а ориентация — $arg(F)$.

Далее рассмотрим их более подробно. При этом будем полагать, что на входе имеются состояние агента $\langle X, v, A \rangle$ и наблюдаемые величины $\langle X_s, v_s, A_s \rangle$, а искомым выходом является управление $\langle v_{ctrl}, A_{ctrl} \rangle$.

Составление (притяжение, Cohesion). В общем случае целевая ориентация определяется как

$$A_{ctl} = arg(F_A(X, X_s, A_s)), \quad (8)$$

$$v_{ctl} = |F_A(X, X_s, A_s)|;$$

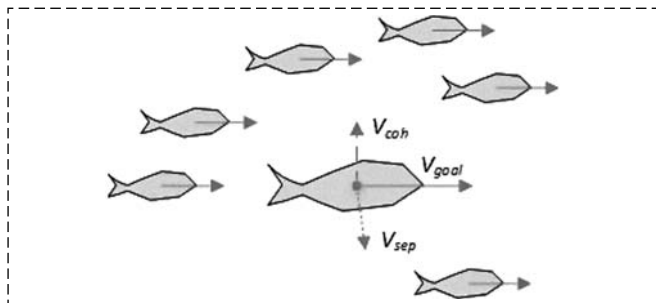


Рис. 2. "Силы", действующие на агента:

V_{coh} — когезия, V_{sep} — отталкивание, V_{goal} — целевое направление движения

Fig. 2. "Forces" acting on the agent:

V_{coh} — cohesion, V_{sep} — separation, V_{goal} — direction to the goal

пример реализации:

$$A_{ctl} = arg(F_A^{coh}(X, X_s, A_s)). \quad (9)$$

Итоговая скорость в общем случае может определяться собственной скоростью агента и расстоянием до центра масс группы r_s :

$$v_{ctl} = |F_v^{coh}(v, r_s)| = \min\left(v_{max}, \frac{k_v}{r_s}\right). \quad (10)$$

Здесь v_{max} — предельная скорость движения; k_v — некоторый коэффициент.

Направление движения может быть определено из списка всех наблюдаемых "своих".

В векторной форме скорость когезии будет определяться как

$$dv_{ctl} = \frac{X_s}{|X_s|}. \quad (11)$$

A_{ctl} здесь и далее рассчитывается как поворот вектора, сонаправленного с результирующим вектором v_{ctl} . Для этого можно использовать формулу перехода в сферические координаты. Пример реализации:

$$v_{ctl}^{(i+1)} = v_{ctl}^{(i)} + dv_{ctl}. \quad (12)$$

Здесь $v_{ctl}^{(i+1)}$ — новая скорость (на текущем шаге); $v_{ctl}^{(i)}$ — текущая скорость (с прошлого шага). Рассчитанная скорость также ограничивается предельной скоростью движения v_{max} :

$$|v_{ctl}^{(i+1)}| = \min(v_{max}, |v_{ctl}^{(i+1)}|).$$

Распределение (отталкивание, Separation). Итоговый угол ориентации A_{ctl} определяется как

$$A_{ctl} = arg(F_A^{sep}(X, X_s, A_s)). \quad (13)$$

Направление при управлении F_A^{sep} отличается от F_A^{coh} знаком: $F_A^{sep} = -F_A^{coh}$. Скорость определяется так же:

$$|F_A^{sep}(v, r_s)| = |F_A^{coh}(v, r_s)|.$$

По сути и по форме алгоритм распределения аналогичен рассмотренному выше, при этом центр масс также определяется списком видимых "своих" $Sensors[\omega_friend]$. Кроме того, эффект отталкивания может быть реали-

зован и через следующее определение вектора скорости движения:

$$dvel_{ctl} = - \frac{\sum_{i \in \Omega_s} \frac{X_i}{|X_i|}}{\left| \sum_{i \in \Omega_s} \frac{X_i}{|X_i|} \right|}. \quad (14)$$

Аналогичным образом определяются прочие законы движения.

Движение в одну сторону (Alignment). Задача — придерживаться среднего курса соседей:

$$v_{ctl} = \frac{v_s}{|v_s|}.$$

Движение по непосредственно заданному закону. Закон трактуется как задаваемые псевдосенсором "Цель" требуемые линейная и угловая скорости:

$$\langle v_{ctl}, A_{ctl} \rangle = \text{Sensors}[\text{'goal_movement'}].$$

Этот закон определяет и частный случай — движение по пеленгу. В последнем случае скорость движения может не задаваться.

Преследование. Будем считать задачи преследования и сближения эквивалентными. Оптимальное сближение может быть реализовано методом параллельного преследования, описанного в работе [12]. В этом методе требуется знать местоположение агентов (хотя существуют модели преследования, в которых координаты агентов не используются, например модель, рассмотренная в работе [13]).

Пусть (x_v, y_v, z_v) — координаты преследуемого, v_v — его скорость, а $\alpha_{yaw}^v, \alpha_{pitch}^v$ — углы поворота вокруг осей OZ и OY соответственно. Аналогично обозначим координаты (x_h, y_h, z_h) и скорость преследователя v_h . Результирующие компоненты угла ориентации $\alpha_{yaw}^h, \alpha_{pitch}^h, \alpha_{roll}^h$ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha_{yaw} &= F_A^{purs}([x_v, y_v, v_v, \alpha_{yaw}^v], [x_h, y_h, v_h]); \\ \alpha_{pitch} &= F_A^{purs}([x_v, z_v, v_v, \alpha_{pitch}^v], [x_h, z_h, v_h]); \\ \alpha_{roll} &= 0; \\ A_{ctl} &= (\alpha_{yaw}, \alpha_{pitch}, \alpha_{roll}). \end{aligned} \quad (15)$$

Скорость преследователя постоянна и определяется как $v_{ctl} = v_{max}$.

На практике F_A^{purs} может задаваться не как функция от координат преследователя и пре-

следуемого, а определяться углом γ между ними в соответствующей плоскости. Пусть γ — угол между преследователем и преследуемым; α_v, u_v — направление движения и скорость убегающего; V — скорость преследователя. Тогда направление движения φ преследователя определяется как

$$\varphi = \arctg \frac{v_{hy}}{v_{hx}} - \gamma. \quad (16)$$

Комплексное движение (движение "бойдов").

Здесь движение агента определяется действием рассмотренных выше частных законов — отталкиванием, выравниванием курса и когезией.

Скорость представляется как

$$v_{ctl} = \omega_a dvel_a + \omega_s dvel_s + \omega_c dvel_c, \quad (17)$$

где $dvel_a, dvel_s, dvel_c$ — управление, определяемое поведением *Alignment, Separation* и *Cohesion* соответственно; v_{ctl} также ограничивается максимальной скоростью v_{max} .

Добавление к когезии, распределению и движению в одну сторону законов движения по заданному пеленгу *FBearing* и непосредственно заданной скорости *FSetSpeed* приводит к комплексному алгоритму, где компоненты их скоростей помножаются на коэффициенты, определяющие значимость этих факторов, а затем векторы скоростей складываются друг с другом.

Движение вдоль цепочки ориентиров. Ориентирами являются некоторые наблюдаемые агенты — буи. На входе — наблюдаемые в зоне видимости буи $\Omega_B = \langle X_B, v_B, A_B \rangle$.

Пусть ориентир i из области Ω_B находится на расстоянии $r_i = |X - X_i|$ от агента. Обозначим A_i — углы, задающие направление от агента на ориентир. Если местоположения заданы декартовыми координатами, то r_i, A_i определяются как сферические координаты точки

$$(X_B^{(1)} - X^{(1)}, X_B^{(2)} - X^{(2)}, X_B^{(3)} - X^{(3)}). \quad (18)$$

Здесь $X_B^{(i)}, X^{(i)}$ — координаты буя и агента соответственно.

Обозначим d_i^a — рассогласование направлений векторов ориентации агента и вектора направления на ориентир:

$$d_i^a = A - A_i.$$

Тогда кортеж (v_s, A_s) определяется как сумма векторов:

$$(v_s, A_s) = \sum_{i \in \Omega_B} (F_i, A_i).$$

Здесь F_i — значение "силы притяжения" ориентира i из области видимости Ω_B :

$$F_i = \begin{cases} 0, & \text{если } r_i < r_{\min}; \\ \frac{K}{r_i^n}, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (19)$$

$$K = \cos \max_j (d_i^a)_j.$$

Смысл введения коэффициента K заключается в том, чтобы для агента были более предпочтительны те ориентиры, которые расположены по ходу движения агента. Чтобы не увеличивать влияние более близких ориентиров, целесообразно в знаменателе иметь расстояние r_i в степени $n > 1$. Кроме того, совсем близкие ориентиры не должны участвовать в определении направления движения. Для этого вводится некоторое минимальное расстояние r_{\min} , кратное, например, размеру агента.

В простейшем случае скорость движения агента может быть постоянной. Здесь важным является определение направления движения.

В итоге $v_{ctl} = \text{const}$, $A_{ctl} = A_s$.

Перейдем далее к описанию более сложных форм поведения агента.

Автоматное управление

Итак, выше были рассмотрены законы, определяющие движение агентов. В определенном смысле они могут считаться базовыми, элементарными действиями. Вместе с тем, такое понятие, как поведение, если под ним понимать устоявшиеся формы и способы взаимодействия агента со средой, требует для своего описания иного подхода.

Поведение и действия. Понятия "поведение", "действие", "активность" являются во многом условными, но между ними всегда можно установить однозначную границу. В целях упорядочения механизмов управления агентами примем следующие соглашения. Будем рассматривать организацию поведения с точки зрения следующей иерархии, используя вместо термина "агент" термин "робот".

1. *Эффекторный уровень.* Это — нижний, "аппаратный" уровень управления. На нем ре-

ализуются отработка эффекторов робота, отвечающих за скорость движения, углы поворота и т. п. В общем случае это элементарные воздействия на окружающую среду.

2. *Действие.* Под действием мы будем понимать некую явно выделяемую совокупность эффекторной активности. На этом уровне происходит согласованная работа эффекторов. Примерами простых действий могут быть различного рода движения.

3. *Сложное действие.* Это некоторая характерная, повторяющаяся последовательность действий. В биологии это называется фиксированным комплексом действий — ФКД.

4. *Базовое поведение.* Некоторая характерная, повторяющаяся последовательность действий (в том числе сложных), которая связана с достижением некоторой цели управления. Примерами базового поведения может быть защитная реакция, поисковое поведение, целенаправленное движение и т. п.

5. *Поведение.* В целом, это устоявшаяся форма или множество форм взаимодействия агента со средой.

Реализация. С технической точки зрения реализация действий, и простых, и сложных, вплоть до ФКД, удобна с помощью КА с выходом. В рамках рассмотренных выше моделей выходом автомата Мили, описывающего действия, является запуск моторной программы — независимого движения; движения, определяемого когезией; следования за лидером и т. п. Входом автомата являются некие внешние условия. Формально КА работает со входным алфавитом из двух символов — *true* и *false*, при этом ус-

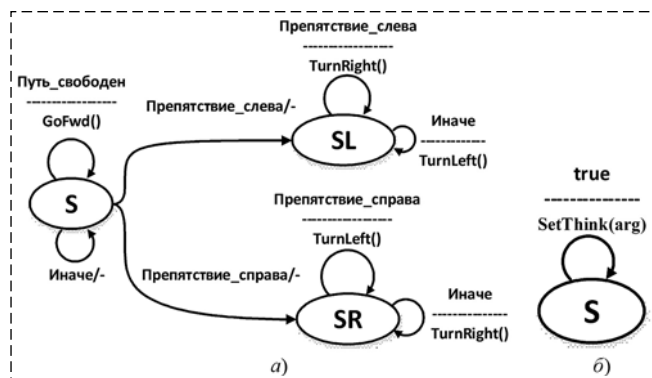


Рис. 3. Автомат fsm_MoveObstSide — движение вдоль препятствия (а); автомат fsm_DirMovementProc, реализующий закон движения, задаваемый аргументом arg (б)

Fig. 3. Finite state machine fsm_MoveObstSide — movement along an obstacle (a); finite state machine fsm_DirMovementProc, that implements a movement law defined by the parameter arg (b)

ловия определяются вычисляемыми в каждый момент времени предикатными функциями. Поскольку здесь мы имеем дело с недетерминированным автоматом, то для автомата вводится приоритет выполнения условий перехода. Примеры автоматов, реализующих действия, приведены на рис. 3.

На рис. 3, *a* приведен автомат, определяющий такое сложное действие, как движение вдоль препятствия, где *S* — состояние, в котором агент движется прямо, а *SL* и *SR* — состояния, в котором он поворачивает направо и налево, соответственно. На рис. 3, *б* — автомат, реализующий прямое назначение поведенческой процедуры. Аргумент этой процедуры определяет некоторую программу движения — когезию, следование за лидером и т. п., т. е. такие программы, которые не описываются в автоматном виде. Здесь *S* — состояние агента, в котором отработывается эта поведенческая процедура.

Для реализации поведения требуется уже другой, более сложный механизм. Таким механизмом может быть метаавтомат.

Метаавтомат. Суть его работы заключается в том, чтобы в зависимости от результатов анализа состояния внешней и внутренней среды активизировать тот или иной автомат, реализующий некоторое действие. На рис. 4 приведен метаавтомат, реализующий процедуру движения по пеленгу, задаваемому аргументом *arg*.

Метаавтомат представляет собой автомат Мили, у которого пометки дуг (процедуры) определяют выполняемые агентом действия. Выполнение этих процедур заключается в том, что загружаются соответствующие автоматы, т. е. автоматы, реализующие действия вида "Обход препятствия" (*fsm_MoveObstSide*), "Стайное движение" (*fsm_DirMovementProc* с аргументом 'FFlockMovement'). Условия переходов

(загрузки новых КА) определяются, например, сенсорикой агента (в данном контексте это означает определение того, что путь свободен (предикат "Путь_Свободен"). В примере *S* — стартовое состояние метаавтомата, *S1* — состояние в котором определяется, свободен ли путь к цели, а *SFree* и *SObst* — состояния, характерные для отсутствия на пути препятствия и его наличия, соответственно. Более сложное поведение может задаваться работой метаавтоматов второго и т. д. рангов. Формально многоуровневая метаавтоматная схема определяется следующим образом.

Если действиями КА являются активизации низкоуровневых двигательных функций, то мы считаем его автоматом ранга 0 — M^0 . Метаавтомат ранга 1 M^1 — это КА, действия которого заключаются в управлении автоматами M^0 (запуск, останов, возобновление работы). Таким образом, метаавтомат ранга n M^n управляет автоматами ранга M^{n-1} . Введение понятия метаавтомата — это структуризация иерархии управления в автоматном представлении. Основа автоматов всех рангов — это КА с выходом. Таким образом, мы получаем следующую иерархию компонентов архитектуры (в порядке усложнения):

- 1) *эффлекторный уровень.* Реализуется моделями движения;
- 2) *действия.* Реализуется множеством КА. При этом для простоты полагалось, что в каждый момент времени активен только один — текущий — автомат, т. е. агент не может совершать несколько действий одновременно;
- 3) *базовое поведение.* Поведенческие реакции как последовательности действий определяются метаавтоматами ранга 1;
- 4) *поведение.* Определяется метаавтоматами различных рангов.

Итак, мы имеем двухуровневую систему:

1. *Базовый уровень.* Реактивные модели прямого управления движением. Здесь осуществляется формирование вектора управления движением на основе анализа сенсорных данных. На этом уровне реализуются рассмотренные выше двигательные программы (сближение, распределение, преследование и т. д.).

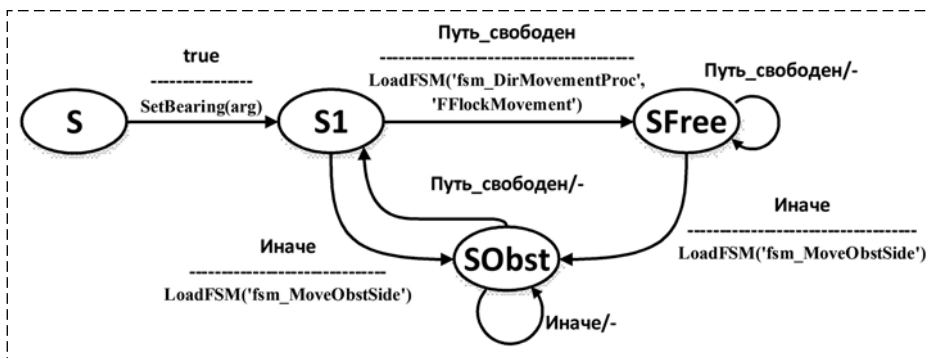


Рис. 4. Мета-автомат, реализующий движение по пеленгу
Fig. 4. Meta-finite state machine that implements movement according to bearing

2. *Уровень поведения.* Здесь требуется понятие состояния (память) и применяются дискретно-событийные (автоматные) модели. На этом уровне определяются последовательности двигательных программ в виде системы метаавтоматов, формируя сложные поведенческие процедуры типа охоты, движения по пеленгу с обходом препятствий, патрулирования и т. п.

Вычислительные эксперименты

Исходя из метаавтоматного принципа реализации поведения общий цикл управления выглядит следующим образом: для каждого агента сначала обрабатывается процедура чтения сенсоров, затем исполняется шаг автоматной логики, после чего определяются скорость и углы движения агента, и осуществляется его передвижение.

В качестве первоначальной, упрощенной кинематической модели движения с точечными агентами использовалась разработанная на *Python* симуляция с визуализацией в *RViz* и *Matplotlib* (рис. 5, а, см. вторую сторону обложки). Для апробации использовалась задача групповой охоты и патрулирования в коридоре с препятствиями и опасностями. Здесь опасности — это объекты, реакцией на которые является рассредоточение. Для моделирования группы роботов в более реалистичных условиях использовался симулятор *Gazebo*, облегчающего перенос разработанного кода между моделью и аппаратной реализацией роботов (рис. 5, б, см. вторую сторону обложки).

Использование симулятора *Gazebo* позволяет добавлять реалистичные датчики и использовать объемные модели агентов. При симуляции применялись лишь кинематические модели роботов, так как для исследования группового поведения агентов динамикой можно пренебречь, поскольку она не оказывает значительного влияния на взаимодействие агентов. При апробации использовалась группа из одного лидера,двигающегося самостоятельно по круговой траектории большого радиуса, и агентов с алгоритмом бойдов *FFlockMovement*, которые двигаются за лидером (рис. 5, б, см. вторую сторону обложки). Следует отметить, что агенты считают лидера равноправным членом группы, никак не выделяя его среди других.

Наряду с вычислительными были проведены и натурные эксперименты на группе малых подводных аппаратов. Основная задача — отработка в условиях лабораторного бассейна элементов законов движения и вопросов сенсорики. Внешний вид аппаратов приведен на рис. 6 (см. вторую сторону обложки). Они представляют собой герметичный отсек, расположенный на ходовой платформе. Платформа оснащена парой маршевых двигателей, которые задают скорость движения и угол рыскания, а также парой водометных движителей в носовой части, задающих угол тангажа.

Кроме того, каждый аппарат оснащен все-направленным излучателем модулированного сигнала в ИК диапазоне и соответствующими приемниками (рис. 7, а).

Этот сигнал задает такие характеристики, как тип наблюдаемого объекта ("опасность", "свой", "чужой"), "сила" (опасности своего и чужого), а также позволяет оценить расстояние до источника. Для этого генерируемый сигнал представляет собой последовательности пачек импульсов, модулированных несущей частотой 36 кГц. Принимаемая огибающая пачек w делится далее на диапазоны, определяющие тип источника сигнала, а интервал между импульсами r позволяет оценить расстояние до источника (см. рис. 7, б).

Изменение параметров w и r обусловлено характером распространения сигнала в плотной среде, а точнее, потерями. Подобного рода организация ИК связи позволяет получать до-

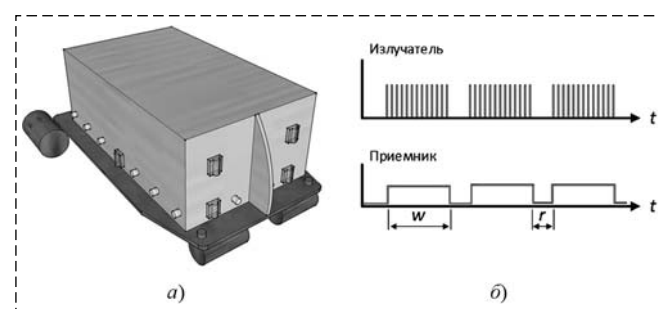


Рис. 7. Расположение сенсоров (ИК приемники) и излучателей (а); излучаемые и принимаемые сигналы: определение типа и параметров излучателя по величине w и расстояния до источника по значению r (б)

Fig. 7. Sensor placement (IR-receivers) and emitters (а); emitted and received signals: type and emitter parameter identification by the value of w and distance to the source by the value of r (б)

статочно устойчивую сенсорную картину на небольшом (до нескольких линейных размеров робота) расстоянии.

Эксперименты заключались в проверке работоспособности сенсорной системы и отработке законов стайного движения. Кроме того, важно было определить актуальные представления данных об объектах в области видимости агентов. Очевидно, что реальная сенсорная система не способна определить область Ω , как список наблюдаемых агентов с определенными для них координатами, скоростями, габаритными размерами и т. п. Вместо этого регистрации подлежит информация о наличии некоторого агента в зоне видимости, дискретизированной до уровня, определяемого числом и расположением приемников ИК сигналов, а также косвенным определением расстояния и скорости (по последовательности измерения параметра r сигнала) наблюдаемого агента. Такое радикальное загромождение, тем не менее, оказалось приемлемым для реализации простых видов поведения типа стайного движения за лидером. Более сложные формы движения (движение с учетом глобальной цели, движение по ориентирам, преследование) требует, разумеется, развития сенсорной системы робота.

Заключение

В работе предложена некоторая технология применения дискретно-событийных моделей для описания поведения агентов при решении задач группового управления. Важно, что уровень базовых движений, являясь принципиально "непрерывным" (в этой работе в его основе — различного рода модификации метода потенциальных полей), может быть естественным образом интегрирован в дискретно-событийную схему, а вопрос систематизации поведения различного уровня может быть решен иерархией метаавтоматных моделей. В этой статье не рассматривались вопросы вычислительной или емкостной эффективности. Сложность алгоритмов уровня базовых движений остается прежней. Речь идет о некоторой единой технологии применения автоматных моделей для решения подобного рода задач.

Более серьезной проблемой являются ограничения сенсорной системы реального робота по сравнению с тем, что "видит" модельный

агент. Перспективным представляется создание конструкций, оснащенных камерами и габаритными маяками, однако в данной работе мы рассматриваем принципы управления, поэтому улучшение сенсорной системы остается за ее рамками и является предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. Бужинский И. П., Казаков С. В., Ульянов В. И., Царев Ф. Н., Шальто А. А. Модификация метода генерации управляющих конечных автоматов с непрерывными воздействиями по обучающим примерам // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 6. С. 17—30.
2. Iovino M., Scukins E., Styrud J., Ögren P., Smith C. A survey of Behavior Trees in robotics and AI // Robotics and Autonomous System. 2022. Vol. 154. P. 104096.
3. Saad S. Ben, Zerr B., Probst I., Dambreville F. Hybrid coordination strategy of a group of cooperating autonomous underwater vehicles // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 28, N. 5. P. 47—52.
4. Зенкевич С. Л., Назарова А. В., Хуа Ч. Моделирование и анализ движения группы мобильных роботов в среде ROS // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 5. С. 317—320.
5. Reynolds C. W. Steering behaviors for autonomous characters // Game Developers Conference. 1999. P. 763—782.
6. Макаров Д. А., Панов А. И., Яковлев К. С. Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами // Искусственный интеллект и принятие решений. 2015. № 3. С. 18—33.
7. Панов А. И., Яковлев К. С. Взаимодействие стратегического и тактического планирования поведения коалиции агентов в динамической среде // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 4. С. 68—78.
8. Hamann H. Swarm Robotics: A Formal Approach. Springer Cham., 2018. 221 p.
9. Zahadat P., Schmickl T. Division of labor in a swarm of autonomous underwater robots by improved partitioning social inhibition // Adaptive Behavior. 2016. Vol. 24, N. 2. P. 87—101.
10. Berlinger F., Gauci M., Nagpal R. Implicit coordination for 3D underwater collective behaviors in a fish-inspired robot swarm // Science Robotics. 2021. Vol. 6, N. 50, P. 1—14.
11. Reynolds C. W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model // Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. 1987. Vol. 21, N. 4. P. 25—34.
12. Петросян Л. А., Рихсиев Б. Б. Преследование на плоскости. М.: Наука. 1991. 96 с.
13. Yu J., LaValle S. M., Liberzon D. Rendezvous Without Coordinates // IEEE Transactions on Automatic Control. 2012. Vol. 57, N. 2. P. 421—434.

About Some Aspects of Finite State Machine Models Application to Group Control

V. E. Karpov, karpov_ve@mail.ru, V. V. Vorobiev, gatus86@mail.ru, M. A. Rovbo, rovboma@gmail.com,
National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation

Corresponding author: Vorobiev V. V., Deputy Head of Robotics Laboratory,
National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation,
e-mail: e-mail: gatus86@mail.ru

Accepted on November 22, 2023

Abstract

The article discusses using discrete-event models to control the coordinated behavior of groups of agents and proposes a mechanism for organizing behavior control based on a hierarchy of finite state machines (FSM). The basic level of agent movement control uses a continuous model of joint movement — the method of potentials, in which the direction of movement is determined by the total sum of the forces of "repulsion", "attraction" and "course alignment". The paper describes a set of independent rules for the group movement of agents — cohesion, distribution, leader following, movement along a chain of landmarks, pursuit, etc. Moreover, all of them are interpreted in terms of the results of the operation of FSM models. Mathematical modeling of controlling a group of agents was carried out using the independent rules of group movement, which confirmed their efficacy. Computational experiments were also carried out using the Gazebo 3D simulator. In addition, the paper describes an experimental group of three underwater vehicles that were used to test the independent rules of group movement: cohesion, distribution, leader following. Communication between the devices was carried out using a system of infrared transceivers via a pseudo-analog channel. The experiments were carried out in a laboratory pool and were successful.

The paper shows that the technology for creating group control systems based on the hierarchy of FSM (meta-FSM) allows solving control problems not only at the level of abstract models and simulation modeling, but also at the level of creating real robotic complexes.

Keywords: finite state machine, group control, movement models, behavior, method of potentials, state machine control, control hierarchy

For citation:

Karpov V. E., Vorobiev V. V., Rovbo M. A. About Some Aspects of Finite State Machine Models Application to Group Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 4, pp. 171–180.

DOI: 10.17587/mau.24.171-180

References

1. Buzhinskij I. P., Kazakov S. V., Ul'jancev V. I., Carev F. N., Shalyto A. A. Modification of the Generation Method for Finite State Machines with Continuous Actions Using Training Examples, *Izvestija Rossijskoj Akademii Nauk. Teorija I Sistemy Upravlenija*, 2015, no. 6, pp. 17–30 (in Russian).
2. Iovino M., Scukins E., Styrud J., Ögren P., Smith C. A survey of Behavior Trees in robotics and AI, *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, vol. 154, p. 104096.
3. Saad S. Ben, Zerr B., Probst I., Dambreville F. Hybrid coordination strategy of a group of cooperating autonomous underwater vehicles, *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 28, no. 5, pp. 47–52.
4. Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Zhu H. Simulation and Analysis of the Movement of a Group of Mobile Robots in ROS, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 317–320.
5. Reynolds C. W. Steering behaviors for autonomous characters, *Game Developers Conference*, 1999, pp. 763–782.
6. Makarov D. A., Panov A. I., Jakovlev K. S. Architecture Of The Multilayered Intelligent Control System For Unmanned Aerial Vehicles, *Iskusstvennyj Intellekt I Prinjatje Reshenij*, 2015, no. 3, pp. 18–33 (in Russian).
7. Panov A. I., Jakovlev K. S. On Interaction Of Strategic And Tactical Planning For The Coalition Of Agents In Dynamic Environment, *Iskusstvennyj Intellekt I Prinjatje Reshenij*, 2016, no. 4, pp. 68–78 (in Russian).
8. Hamann H. Swarm Robotics: A Formal Approach, Springer Cham, 2018, 221 p.
9. Zahadat P., Schmickl T. Division of labor in a swarm of autonomous underwater robots by improved partitioning social inhibition, *Adaptive Behavior*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 87–101.
10. Berlinger F., Gauci M., Nagpal R. Implicit coordination for 3D underwater collective behaviors in a fish-inspired robot swarm, *Science Robotics*, 2021, vol. 6, no. 50, pp. 1–14.
11. Reynolds C. W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model, *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1987, vol. 21, no. 4, pp. 25–34.
12. Petrosjan L. A., Rihsiev B. B. Pursuit on a flat surface, Moscow, Nauka, 1991, 96 p. (in Russian).
13. Yu J., LaValle S. M., Liberzon D. Rendezvous Without Coordinates, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, vol. 57, no. 2, pp. 421–434.

S. T. Yordanova, sty@tu-sofia.bg, M. N. Slavov, milen.slavov@solvay.com, D. R. Stoitseva-Delicheva, stoitseva@tu-sofia.bg,
Faculty of Automation, Technical University of Sofia, Sofia, 1000, Bulgaria

Corresponding author: Slavov M. N., PhD Student at Technical University of Sofia,
Faculty of Automation, Projects manager and metrologist in "Solvay Sodi" AD, Industrial zone, Devnia, 9160, Bulgaria,
e-mail: milen.slavov@solvay.com

Accepted on November 24, 2022

Design and Genetic Algorithms Based Optimisation of Industrial Adaptive PID FLC System of Liquid Level

Abstract

The level control of the precarbonised solution in a soda ash production plant requires intelligent approaches that can tackle process complexity, nonlinearity and industrial environment impact. Therefore, model-free fuzzy logic controllers (FLC) with empirical tuning are suggested which are implemented in a general purpose programmable logic controller (PLC) and operate in real time control. Online adaptation improves the FLC parameters tuning. The aim of the present research is to optimise the adaptation strategy and the parameters of an adaptive PLC PID FLC using genetic algorithms (GA) and simulations for reducing both the system error and the control variance. The PID FLC is based on a PD FLC and a parallel integrator of the system error. A Sugeno model is used for adaptation of the PID FLC tuning parameters. Depending on the level it defines empirically via its input membership functions three linearisation zones and performs soft blending of the local for each zone PD FLC gains and integrator time-constants. Two adaptation strategies are suggested for online auto-tuning of the integrator time-constant only, and together with the PD FLC gain. The local parameters, in turn, are GA optimised. Simulations show that the best system performance is achieved by auto-tuning both PID FLC parameters with optimised local values.

Keywords: carbonisation, fuzzy logic adaptive control, genetic algorithms optimisation, industrial implementation, system simulations

For citation:

Yordanova S. T., Slavov M. N., Stoitseva-Delicheva D. R. Design and Genetic Algorithms Based Optimisation of Industrial Adaptive PID FLC System of Liquid Level, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 4, pp. 181–189.

DOI: 10.17587/mau.24.181-189

УДК 007.52, 004.75

DOI: 10.17587/mau.24.181-189

С. Т. Йорданова, д-р техн. наук, проф., sty@tu-sofia.bg, М. Н. Славов, аспирант, milen.slavov@solvay.com,
Д. Р. Стойцева-Деличева, канд. техн. наук, доц., stoitseva@tu-sofia.bg,
Факультет „Автоматика“, Технически университет Софии, България, г. София

Проектирование и оптимизация генетическими алгоритмами промышленной системы с адаптивным нечетким ПИД регулятором уровня жидкости

Задача регулирования уровня предварительно карбонизированного раствора на технологической установке по производству кальцинированной соды требует применения не традиционных, классических, а современных интеллектуальных подходов, позволяющих учитывать сложность процесса, его нелинейность и воздействия промышленных помех. Для решения данной задачи в работе предлагается использовать безмодельные контроллеры нечеткой логики FLC с эмпирической онлайн-настройкой, реализованные в режиме реального времени в программируемом логическом контроллере общего назначения PLC. Целью исследования является параметрическая оптимизация генетическим алгоритмом стратегии адаптивного PID FLC регулятора. При этом для адаптации параметров настройки PID FLC используется модель Sugeno. Здесь PD FLC регулятор, в зависимости от значения регулируемого уровня, эмпирически

определяет с помощью своих функций принадлежности три зоны линеаризации и выполняет для каждой зоны мягкое смешивание коэффициентов передачи усилителя и интегратора. Предложены две стратегии адаптации для онлайн-автоматической настройки постоянной времени интегратора совместно с коэффициентами передачи усилителя и дифференциатора PD FLC. Локальные параметры системы регулирования технологической установки, в свою очередь, автоматически оптимизируются генетическим алгоритмом. Компьютерное моделирование и промышленные эксперименты показали высокую эффективность синтезированной системы регулирования за счет автоматической настройки параметров PID FLC с оптимизированными локальными значениями.

Ключевые слова: технологический процесс карбонизации, адаптивное управление с нечеткой логикой, параметрическая оптимизация генетическим алгоритмом, компьютерное моделирование, промышленные эксперименты

1. Introduction and state-of-the-art

Carbonisation is an essential process in the production of synthetic soda ash. In a carbonisation column (CCI) a reversible exothermic reaction of a precarbonised solution mainly of ammonia brine solution (a solution of water H_2O , salt $NaCl$ and ammonia NH_3) with carbon dioxide (CO_2) gases in counterflow takes place. As a result crystals of sodium bicarbonate ($NaHCO_3$) are produced taken away by the cooling water at the output valve on the CCI bottom. On industrial scale several CCI operate in parallel with a common supply of precarbonised solution. Besides, CCI alternates operation mode with washing mode keeping a prescribed ratio of CCI in operation and in washing mode [1].

The control of level in a CCI is important for the quality of the soda ash produced. It is also a challenging task because of the plant complex nonlinear behaviour and the impact of the industrial disturbances. The main disturbance is the measured pressure P in the common supply collector, which changes randomly. The reference for level also changes as it depends on the load of the CCI measured by the flowrate of the CO_2 gases and on the distribution of the produced precarbonised solution among the CCI in operation mode.

The plant is difficult to be modelled and hence to be controlled applying classical control techniques. Model-free fuzzy logic controllers (FLC) ensure high performance control based on expert empirical knowledge about the plant instead of a classical mathematical model [2]. Various FLC are suggested for level control [3-9]. Adaptation and genetic algorithms (GA) parameter optimisation are the most often used approaches to FLC tuning [4-6]. In [7-9] FLC for industrial applications are developed based on programmable logic controllers (PLC) and embedded low cost technique, which, however, are tested only in laboratory environment.

Several model-free FLC for the control of the level of the solution in the CCI are designed and empirically tuned in [10-12]. They all are implemented in

the industrial general purpose PLC and applied for the real time online level control in an operating CCI of the "Solvay Sodi" AD plant in the town of Devnya, Bulgaria. First, a PI single-input single-output (SISO) FLC is developed in [10] with the system error as input. The SISO FLC avoids the use of the rate of error as a second input in the classical PI FLC which numerical computation in industrial environment by the means of the PLC is highly noise sensitive. In order to reduce the disturbance impact a PI two-input (2I) FLC is designed in [11] where the deviation of the pressure from its mean value is introduced as a second input and a corresponding rule base derived. In [12] a PID FLC based on a 2ISO PD FLC and a parallel linear integrator of the system error is designed. The post-processing gain K_d of the PD FLC or the integrator time-constant T_i are online auto-tuned depending on the degree of belonging of the current measured level H or its reference H_r to three overlapping plant linear operation zones. The linearization zones are defined by the input membership functions (MF) of a Sugeno model which performs a soft blending of the local for each zone empirically determined gains K_{dj} or integration time-constants T_{ij} . The real time industrial experiments show that the system with adaptive online tuning of T_i as function of the level H has the best performance and therefore is accepted as a basis of the present paper.

The aim of the new investigation is to develop an approach for design and study via simulations of an adaptive PID FLC system for the control of the level of the precarbonised solution in a CCI with two adaptation strategies for online auto-tuning as function of H — only of T_i and of both K_d and T_i by PDC soft blending of GA optimised local values in order to improve the performance of the system.

The GA optimisation of the local gains and integration time-constants uses for computation of the fitness function system simulations and data from the real time level control system with the best adaptive PID FLC with online auto-tuning of T_i as function of H for empirically determined K_d and local T_{ij} . The derivation of the system simulation

model and the simulation investigations are based on MATLABTM/Simulink and its toolboxes for fuzzy logic and GA [14, 15], on the industrial PLC completion of the PID FLC [13] and the data from the real time experiments.

The paper is organized as follows. Chapter 2 presents the theoretical background and the problem formulation. The derivation and validation of a system simulation model of the existing real world operating closed loop system with the PLC adaptive Sugeno PID FLC from [12] is described in Chapter 3. Chapter 4 is devoted to the off-line GA optimisation of the local parameters T_{ij} and K_{dj} based on system simulation. It also contains simulation investigations and comparison of the performance of the systems with empirically determined and GA optimised local parameters in the two adaptation strategies. Chapter 5 presents a conclusion and ideas for future research.

2. Theoretical background and problem formulation

The most often used model-free PID FLC are based on a fuzzy unit (FU) with two normalised in the range $[-1, 1]$ inputs — the system error e^n and the rate of error de^n that comprises a 2ISO PD FLC which operates either with a PI post-processing or with a linear integrator in parallel as the developed in [12]. The rate of error is responsible for the D component which is important for the system stability and fast response due its prediction property. The noise sensitivity of the numerical computation of the rate of error, however, hinders its wide industrial implementation. Therefore, different numerical and filtering methods are developed to reduce the impact of noise and disturbances. In [12] the computed rate of error as a finite difference is smoothed using sliding average technique. The model-free PID FLC tuning also is a problem and most often relies on empirical approaches based on subjective human expertise, various assumptions, many and slow experiments which are difficult to control in industrial environment. To compensate the trial-and-error imprecise tuning, a simple mechanism for online auto-tuning is suggested in [12]. The PID FLC adaptation stems from the principle of parallel distributed compensation (PDC) [16, 17] for building of nonlinear control by soft blending of the outputs of local linear controllers. The PDC is designed on the basis of a TSK model of the nonlinear plant which assumes that the plant operates in a few overlapping linearisation zones and in each zone it can be described by a local linear model. A Sugeno model defines the linearisa-

tion zones via the input MF and performs soft blending of local linear plant models. In the same way, the PDC performs soft blending of the outputs of the local linear controllers in the PDC rules conclusions on the basis of the common with the TSK plant model predicate in the If-Then rules. Each local for the linearisation zone linear controller is designed using the linear control theory methods accounting for the corresponding local linear plant model.

In [12] in absence of a TSK plant model three linearization zones around the most often used references for the level 40, 50 and 60 % are assumed. The adaptation comprises soft blending either of the gains $K_d = [K_{d1} = 40, K_{d2} = 50, K_{d3} = 70]$ % for a constant integration time-constant T_{io} or of $T_i = [T_{i1} = 18, T_{i2} = 84, T_{i3} = 102]$ s for a constant K_{do} . The constant and the local values are determined via experiments. Five different control strategies are experimented based on PLC PID FLC:

- Strategy 1 with fixed empirically tuned $K_d = 50$ % and $T_i = 138$ s;
- Strategy 2 with soft blending of the local values of T_i for constant $K_{do} = 55$ %;
- Strategy 3 with soft blending of the local values of K_d for constant $T_{io} = 138$ s.

Strategy 2 and Strategy 3 use two variants of parameters soft blending — depending on the degree of belonging of the current measured level H (H is the Sugeno model input) or of its reference H_r (H_r is the Sugeno model input) to all defined linearization zones in the Sugeno model input MF. In this way were done Strategy 4 and Strategy 5. All experiments are performed on the operating CCl with PLC implementation of the designed PID FLC by the use of ordinary logic functions for the description of MF, fuzzy rules, aggregation, implication, accumulation and defuzzification. The best system performance is assessed from the adaptation of T_i as fuzzy function of H which turns the integrating component in the adaptive PID FLC from linear into nonlinear. The empirical tuning of K_{do} and T_{ij} or K_{dj} and T_{io} is rather subjective and slow and it is not applicable for a great number of tuning parameters in case both K_{dj} and T_{ij} are auto-tuned.

The problem is to apply an objective approach — optimisation of the local tuning parameters in the strategies for auto-tuning of T_i and of both K_d and T_i in order to improve the performance of the best empirically tuned adaptive PLC PID FLC system.

GA are selected as a proper technique for optimisation of a nonlinear fitness function of many parameters without analytical expression with respect to its parameters [18]. They provide parallel random

search of the parameter space for global optimum without getting trapped in a local optimum. The GA are inspired from the Darwin's theory on the evolution of the human intelligence. The new better with respect to the accepted fitness function generation is raised by mating of properly selected individuals (parents), exchange of genes within specified areas between them and small random gene mutations to escape from the low level of the parents' generation and trapping in local optimum. The individual is viewed upon as a possible solution — a combination of values for the parameters for which the fitness function gets an optimal value, usually minimum. It is an analogue to the chromosome that comprises an array of genes, each representing a coded value of the corresponding tuning parameter. The optimisation starts with the random generation of the initial population of M individuals. Then the individuals are rated according to the computed value of the accepted fitness function. The mating, the genes crossover and mutation are based on different methods and continue till the new generation is completed with M offsprings with better ratings than their parents. The optimisation ends after a given number of generations and then the optimal parameters may not ensure the desired minimum of the fitness function or after the expected minimum is reached.

In the present investigation the GA are applied off-line using system simulations to compute the fitness function which ensures fast and objective results without interfering of the real world system that may cause for some generated chromosomes system instability or unacceptable performance. By GA two types of optimisation problem are solved in the present investigation. The first is a modelling problem. It is expressed in optimisation of the parameters of a designed model in order to minimise a fitness function of the modelling error between the outputs of the model and the modelled real world system, plant or controller. Both model and real world system are subjected to the same input recorded from the real time operation of real world system. This problem appears in the derivation of a TSK plant model [16, 17] and a PID FLC from real time experiments of the level control with the PLC implementation of the best Sugeno adaptive PID FLC [12]. The second optimisation problem is related with the computing of the optimal controller's parameters which minimise a fitness function of

specific closed loop control system performance indicators. In both problems the necessary input/output data used are a result of well-designed experiments in order to ensure that the signals cover the whole range of operation of the real world system and are rich in magnitudes and frequencies. Then the data are pre-processed to decrease the length of the sample and to eliminate noise and correlation. Usually the data from the real world experiments are split into data used in the GA optimisation and data (1/3 of all) used for model validation after the end of the optimisation.

The functional block diagram of the adaptive PID FLC to be optimised is presented in Fig. 1. It integrates two PDC adaptation strategies — the best for auto-tuning of T_i for constant K_d from [12] (position "1" of the Switch) and a new one with the additional functionality to auto-tune both K_d and T_i (position "2" of the Switch). The measured level H_m is noise filtered by an exponential filter with transfer function $W_f(s) = (12s + 1)^{-1}$. The result is compared with the reference H_r to yield the system error $e = H_r - H$. The rate of error de is numerically computed in the block "de/dt" and then smoothed for 30 points in the block "Sliding average". The gains $K_e = K_{de} = 0.05$ for normalisation of e and de in the range $[-1 \ 1]$ are computed based on the maximal expected absolute system error of 20 %.

The fuzzy unit represents in a 2ISO Sugeno model a number of PLC ordinary logic expressions for the MF, the fuzzy rules and the derivation of the final defuzzyfied conclusion.

Standard orthogonal triangle and trapezoidal at the range ends MF for the inputs and singletons for the output MF and a standard soft rule base with fuzzy rules R_p , $p = 1-15$ are used. The MF of the normalised inputs are the following:

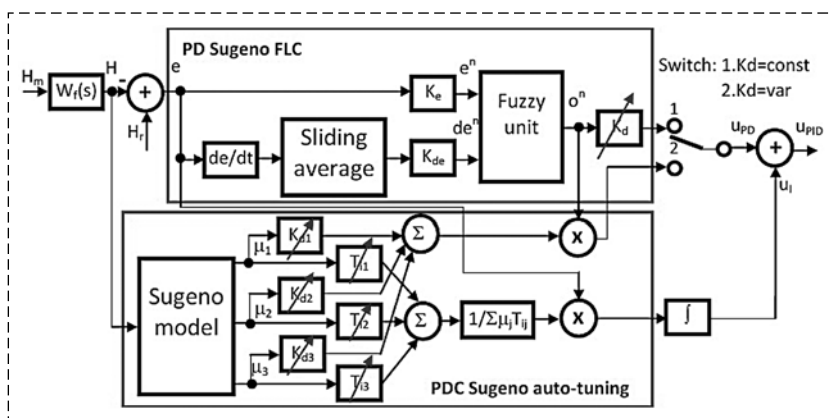


Fig. 1. Functional block diagram of the Sugeno PID FLC with on-line PDC adaptation only of T_i (Switch in "1") and of both K_d and T_i (Switch in "2") as function of the level H

— for the system error e^n with labels $Le = [Le_m] = [NG_e N_e Z_e P_e PG_e]$, $m = 1-5$, where $NG_e = [-1 -1 -0.6 -0.2]$, $N_e = [-0.6 -0.2 0]$, $Z_e = [-0.2 0 0.2]$ — Norm, $P_e = [0 0.2 0.6]$, $PG_e = [0.2 0.6 1 1]$;

— for the rate of error de^n with labels $Lde = [Lde_l] = [N_e Z_e P_e]$, $l = 1-3$, where $N_{de} = [-1 -1 -0.3 0]$, $Z_{de} = [-0.3 0 0.3]$ — Norm, $N_{de} = [0 0.3 1 1]$, NG is Negative Great, N — for Negative, Z — for Zero, P — for Positive and PG — for Positive Great.

The MF of the output o^n are singletons labelled $Lo = [Lo_r] = [NG NS N Z P PS PG]$, $r = 1-7$, where $NG = -1$, $NS = -0.6$, $N = -0.2$, $Z = 0$, $P = 0.2$, $PS = 0.6$, $PG = 1$ and PS and NS stand for Positive Small and Negative Small respectively.

The FU final output o^n is computed via weighted average defuzzification in the same way as in the PLC PID FLC implementation:

$$o^n = \left(\sum_{p=1}^{15} Lo_p w_p \right) / \sum_{p=1}^{15} w_p,$$

where $Lo_p = Lo_1 - Lo_7$ is the singleton in the p^{th} rule conclusion and $w_p = \min(Le_m, Lde_l)$ is the p^{th} rule activation degree. The final PID FLC output u_{PID} is computed as:

$$u_{PID}(t) = u_{PD}(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt,$$

where $u_{PD}(t) = K_d o^n(t)$ is the PD FLC output and the PD FLC gain K_d and the integration time-constant T_i are the PID FLC tuning parameters.

The PDC auto-tuning mechanism is based on a SI3O Sugeno model. The Sugeno model input is the filtered measured level H with MF labeled $LH = [LH_j] = [LowH NormH HighH]$, $j = 1-3$, $LowH = [0 0 35 50]$, $NormH = [35 50 65]$, $HighH = [50 65 100 100]$ to describe the empirically accepted three linearisation zones. The output MF are the singletons 0 and 1. Specific fuzzy rules R_j ensure mapping of the three MF in the three outputs (3O), i.e. each output yields the degree of belonging of the current H to the corresponding linearisation zone, or output $\mu_j = \mu_j$:

R_1 : If H is LowH
Then $output_1^1 = 1$, $output_2^1 = 0$, $output_3^1 = 0$

R_2 : If H is NormH
Then $output_1^2 = 0$, $output_2^2 = 1$, $output_3^2 = 0$

R_3 : If H is HighH
Then $output_1^3 = 0$, $output_2^3 = 0$, $output_3^3 = 1$.

E.g. for current measured level $H_k = 46\%$ at time instant t_k the predicate of R_1 is fulfilled with degree $\mu_1 = 0.3$, of R_2 — with $\mu_2 = 0.7$ and of R_3 — with $\mu_3 = 0$, i.e. the degree of belonging of H_k to linearization zone LowH is $\mu_1 = 0.3$, to NormH is $\mu_2 = 0.7$ and to HighH is $\mu_3 = 0$. The Sugeno model outputs are computed applying the weighted average defuzzification and considering that the MF of the inputs are orthogonal $\left(\sum_{j=1}^3 \mu_j = 1 \right)$:

$$output_1 = \sum_{j=1}^3 output_j^1 \mu_j =$$

$$= 1\mu_1 + 0\mu_2 + 0\mu_3 = \mu_1 = 0.3;$$

$$output_2 = \sum_{j=1}^3 output_j^2 \mu_j =$$

$$= 0\mu_1 + 1\mu_2 + 0\mu_3 = \mu_2 = 0.7;$$

$$output_3 = \sum_{j=1}^3 output_j^3 \mu_j =$$

$$= 0\mu_1 + 0\mu_2 + 1\mu_3 = \mu_3 = 0.$$

The degree of belonging μ_j of the level H_k to the corresponding linearization zone appears as Sugeno model output $output_j$ which scales the respective local gain K_{dj} and integration time-constant T_{ij} in this zone. Thus the expression of the smooth nonlinear adaptation algorithm for online tuning of the PID FLC parameters as function of H is the following:

$$K_d(t) = \sum_{j=1}^3 \mu_j(H(t)) K_{dj}, \quad T_i(t) = \sum_{j=1}^3 \mu_j(H(t)) T_{ij}.$$

3. Simulation modelling and validation of adaptive PID FLC system

The derivation and validation of a simulation model of the existing real world closed loop system is based on MATLABTM/Simulink and its toolboxes Fuzzy Logic and GA [14, 15]. The simulation model is necessary in the GA optimisation of the parameters of the adaptive PID FLC and in the simulation investigations for assessment and comparison of the performance of the designed systems with empirical and optimised local parameters using two adaptation strategies. The system simulation model consists of a Simulink model of the adaptive PID FLC and a TSK plant model. Their derivation and validation uses data from the real time experiments of the best PLC PID FLC system from [12].

The modelling and the validation of the adaptive PID FLC simulation model is based on the block

diagram in 1 which describes the PLC implemented PID FLC. The derived Simulink simulation model of the best adaptive PLC PID FLC is presented in Fig. 2 (see the third side of the cover) where $K_d = 55\%$, $T_{i1} = 18$ s, $T_{i2} = 84$ s and $T_{i3} = 102$ s. It contains Transport Delay blocks for the inputs and a Switch at its output to keep zero output for the time-delay (here 4000 s). This time-delay is needed for the nonlinear controller to reach initial steady state, i.e. the initial conditions to settle ensuring equilibrium. Then the recorded and smoothed signals from the PLC real time control system are applied to the inputs of the Simulink PID FLC model. These signals are the noise filtered level H_{is} , its reference H_{exp} , the control action U_{is} , the on-line auto-tuned T_{iexp} and the normalised rate of error $dEns_sh$. They are obtained as a result of experiments with successive step changes of the level reference in the sequence 50–60–50–40–50 % carried out during the PLC real time control with the adaptation of T_i . The disturbance P changes randomly in each experiment. The FU and the Sugeno model in Fig.1 are designed by the help of the Fuzzy Logic toolbox each to identically represent in a single block "FLC" of MATLABTM/Simulink a number of PLC ordinary logic expressions for the MF, the fuzzy rules and the derivation of the final defuzzified conclusion. All other Simulink blocks model precisely the PLC blocks from the adaptive PID FLC implementation. The only difference concludes in the computation of de^n . Therefore, the Simulink module "de/dt", shown in Fig. 2 (see the third side of the cover), is suggested to approximate the PLC PID FLC blocks for the computation of the rate of error "de/dt" and "Sliding average" in Fig. 1. First, the finite difference of the error is computed $de_k \approx e_k - e_{k-1}$ using previous time instant signal from the block "1/z". Then the result is smoothed by additional exponential filter with transfer function $W_d(s) = k(Ts + 1)^{-1}$. The filter parameters k and T are obtained after a GA minimisation of the mean squared modelling error between the normalised de^n computed by the Simulink PID FLC model and the processed rate of the error signal computed by the PLC PID FLC during the real time control experiments. The optimised values are $k = 70$ and $T = 30$ s. The step responses to $H_r = 50-60-50-40-50\%$ of the normalised system error e^n and rates of error of the PID FLC from simulation de^n with input data H_{is} , U_{is} from experiments and $de_{is}^n = dEns_sh$ from PLC real time experiments are shown in Fig. 3 (see the third side of the cover). The rate of error e^n is close to de_{is}^n which is a proof

of high approximation accuracy. The step responses of the control actions U and T_i from adaptation of the PID FLC simulation model and $de_{is}^n = dEns_sh$ from experiments and U_{is} and $T_{is}(H)$ from experiments are also close to U_{is} and T_{iis} of the best adaptive PLC PID FLC as seen in Fig. 4 (see the third side of the cover). This confirms that the developed PID FLC simulation model is accurate.

The derivation of the TSK plant model uses the same Sugeno model from the T_i auto-tuning and a dynamic part of three parallel local linear models — one for each linearization zone, shown in Fig. 5. The local linear models are described by the transfer functions of timelags $P_j(s) = K_j(T_j s + 1)^{-1}$. An additional common for the three zones timelag $P_4(s) = (T_4 s + 1)^{-1}$ is introduced in series to increase the order of the local plants with a small number of the TSK plant model parameters $\mathbf{q}_{TSK}^T = [K_1 \ K_2 \ K_3 \ T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ y_0]$ to be determined. The initial level $y(0)$ is accepted as a model parameter since it plays an important role in the behaviour of the nonlinear plant. This structure of the TSK plant model is accepted based on the assumption of three linearization zones around the most often used references and the expert knowledge about the dynamic behaviour of the plant in these zones. The unknown parameters \mathbf{q}_{TSK}^T are computed in a GA optimisation procedure. For this purpose a closed loop system simulation model is built of the TSK plant model and the designed model of the PID FLC with adaptation of T_i from Fig. 2 (see the third side of the cover) that controls $y_{TSK} = H_{TSK}$. The fitness function $F = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_{TSKk} - H_{is_k})^2$ is the mean squared modelling error between the output of the TSK plant model y_{TSK} in the closed loop system simulation model and the smoothed measured level H_{is} from the closed loop control system real time experiments for step reference changes $H_r = 50-60-50-40-50\%$, where N is the sample length, i.e. the number of measurements (here $N = 5050$). Delay blocks and zero output for the same

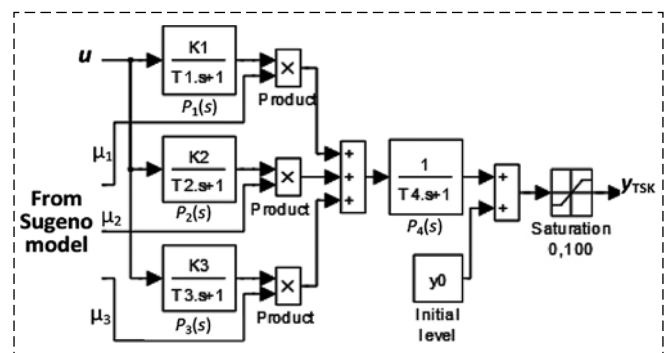


Fig. 5. Dynamic part of the accepted TSK plant model in Simulink

time-delay like in Fig. 2 (see the third side of the cover) ensure start of the simulation experiments after a reached initial equilibrium — important for nonlinear systems. The minimisation of the fitness function computed by the help of system simulations yields the following optimal parameters for which $F_{\min} = 0.5986$:

$$\mathbf{q}_{\text{TSK}}^{\text{Opt}} = [K_1 = 0.31; K_2 = 0.75; K_3 = 0.99; \\ T_1 = 24 \text{ s}; T_2 = 219 \text{ s}; T_3 = 481 \text{ s}; \\ T_4 = 164 \text{ s}; y_0 = 29 \%].$$

The step responses with respect to level, control action and tuning parameter of the best adaptive PID FLC closed loop system from simulation (Hisim, Uisim, Tisim) and from PLC real time control without data smoothing (Hi, Ui, Ti) are presented in Fig. 6 (see the third side of the cover). They show that Hisim is smooth and very close to Hi (Hism \approx Hi) while Hi is subjected to the impact of industrial disturbances. The T_i adaptations are almost identical Tism \approx Ti. The control actions differ in the final for each step response values which can be explained by the disturbance impact. The closed loop systems step responses for fixed $K_d = 50 \%$ and $T_i = 138 \text{ s}$ demonstrate the same relationship between the simulation and the real time data which validates the developed simulation models of the PID FLC and of the plant. The validation gives grounds to trust all further simulation results in testing of other adaptation strategies and in GA optimisation of the PID FLC parameters.

The TSK plant model enables the study of the plant. Its step responses from simulation are depicted in Fig. 7 (see the fourth side of the cover) where the MF of the Sugeno model are added. The step responses demonstrate the nonlinearity of the plant since for equal step changes Δu of the input u the step response at settling time of the plant output $\Delta H_{\text{TSK}}(\infty)$ is different in the different operating points — it is lowest about $H_{\text{TSK}} = 40 \%$ (linearisation zone "LowH"), highest about $H_{\text{TSK}} = 50 \%$ (linearisation zone "NormH") and medium about $H_{\text{TSK}} = 60 \%$ (linearisation zone "HighH"). So, the gains of the local linear plants $K_j = \Delta H_{\text{TSK}_j}(\infty)/\Delta u$ in the three linearisation zones change from low through high to medium. This serves as information for determining of the ranges for the PID FLC tuning parameters in their further GA optimisation.

4. GA optimisation of PID FLC parameters

The empirical parameters tuning of the PID FLC is the only approach in case of scanty expert know-

ledge about the control of the plant. It is based on a lot of trial-and-error experiments with different values for the parameters during the operation of the plant. The experiments take a long time, can hardly be controlled in presence of industrial disturbances and are not applicable for tuning of many parameters. Besides, the assessment of the system performance improvement is difficult and approximate. The PDC based adaptation of the PID FLC parameters about empirically determined local values in [12] is introduced as compensation of the subjectivity, the impact of industrial disturbances and the imprecision in tuning. Even in this case the approach is applicable for a small number of tuning parameters and the result may be still far from the optimal. The empirical tuning is useful as it provides a new knowledge to the control of the plant which enables application of objective optimisation techniques.

The task in this chapter is to use the developed system simulation model of validated controller's model and TSK plant model on the basis of the empirically tuned best adaptive PLC PID FLC in order to GA optimise the PID FLC tuning parameters and study two adaptation strategies:

- Strategy 1 — PDC online auto-tuning of T_i with optimised K_d and local T_{ij} . This strategy is used in the best adaptive PLC PID FLC from the real time level control but with empirically determined K_d and local T_{ij} ;

- Strategy 2 — PDC online auto-tuning of both T_i and K_d with optimised local T_{ij} and K_{dj} . This strategy is based on online auto-tuning of more parameters, which have first to be optimised and explores the possibility for a greater improvement of the system performance.

The simulation model of the system with the two adaptation strategies used in the GA parameter optimisation is shown in Fig. 8 (see the fourth side of the cover). In adaptation strategy 1 the tuning parameters of the block "Kd = var" are reduced to one by assigning $K_{d1} = K_{d2} = K_{d3} = K_d$.

The suggested fitness function to be minimized is $F = F_1 + 0.1F_2/F_3$. It integrates two criteria. The first criterion aims at increasing of the system dynamic accuracy by minimisation of the mean squared system error $F_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (H_{rk} - y_{\text{TSK}k})^2 = \min$. The second criterion $\frac{F_2}{F_3} = \min$ demands a reduction of the variance of the control action per unit reference $F_2 = \text{var} \left(\frac{u}{H_r} \right)$ relative to the variance of the main disturbance $F_3 = \text{var}(P)$ accounting in this way for

Performance indicators of the investigated systems via simulation

Systems	System 1 $F^{opt} = 17.7, F_1^{opt} = 10.6$				System 2 $F^{opt} = 14.5, F_1^{opt} = 8.7$				System 3 $F^{opt} = 13.93, F_1^{opt} = 10.6$			
Performance indicators	$\sigma, \%$	t_s, s	$U_{peak}/U_\infty, \%$	$ \Delta U _{max}, \%$	$\sigma, \%$	t_s, s	$U_{peak}/U_\infty, \%$	$ \Delta U _{max}, \%$	$\sigma, \%$	t_s, s	$U_{peak}/U_\infty, \%$	$ \Delta U _{max}, \%$
$H_r = 50-60 \%$	30	1100	80/35	48	8	800	85/35	55	0	700	59/35	27
$H_r = 60-50 \%$	35	1500	8/29	25	10	1100	0/29	33	5	900	0/29	31
$H_r = 50-40 \%$	33	1800	0/25	30	12	1100	0/25	26	7	1100	0/25	25
$H_r = 40-50 \%$	35	1300	75/29	50	20	1300	82/29	50	15	1300	63/29	36
mean	33	1425	40.8	38.3	13	1075	41.8	41	7	1000	30.5	29.8

the impact of the random disturbance. The minimisation of the control variance responds to the requirement for prolonging of the lifetime of the expensive final control elements for the level control in the CCI.

The GA optimisation yields the following optimal PID FLC parameters:

— for the first strategy $\mathbf{q}_{PDC1}^{opt} = [K_d = 63 \%; T_{i1} = 26 \text{ s}, T_{i2} = 202 \text{ s}, T_{i3} = 186 \text{ s}], F^{opt} = 14.5, F_1^{opt} = 8.7;$

— for the second strategy $\mathbf{q}_{PDC2}^{opt} = [K_{d1} = 51 \%, K_{d2} = 32 \%, K_{d3} = 89 \%; T_{i1} = 34 \text{ s}, T_{i2} = 374 \text{ s}, T_{i3} = 179 \text{ s}], F^{opt} = 13.93, F_1^{opt} = 10.6.$

The step responses with respect to level H , control action U and adapted parameters T_i and K_d from simulation of the investigated PID FLC systems are shown in Fig. 9 (see the fourth side of the cover), where the designations are the following:

— (Hi, Ui, Ti) for System 1 with T_i PDC auto-tuning and empirically determined K_d and T_{ij} ;

— (Hio, Uio, Tio) for System 2 with T_i PDC auto-tuning and optimised K_d and T_{ij} ;

— (Ho, Uo, Tio, Kdo) for System 3 with K_d and T_i PDC auto-tuning and optimised K_{dj} and T_{ij} .

The designation "i" corresponds to T_i auto-tuning while "o" stands for optimised parameters. The systems are compared on the basis of the performance indicators:

1) minimal integrated criteria \mathbf{F}^{opt} and mean squared error \mathbf{F}_1^{opt} ; 2) overshoot $\sigma, \%$ and settling time t_s, s ; 3) peak U_{peak} and settled U_∞ values for the control action and its maximal range $|\Delta U|_{max}$ — estimates for smooth and economical control action.

The assessed from the four step responses performance indicators of the three systems and their mean values are systemised in Table 1. The analysis of the results rates System 3 as the best for the following reasons:

— System 3 has the minimal \mathbf{F}^{opt} and \mathbf{F}_1^{opt} equal with System 1, which is the second low after Sys-

tem 2. This means that System 3 reaches high dynamic accuracy at a control action with small variance, i.e. economical and smooth;

— The three systems have the same U_∞ for a given reference and the greater the reference is — the higher the settled control action is. System 3 has the smallest U_{peak} , hence the lowest deviation of U_{peak} from U_∞ and the lowest $|\Delta U|_{max}$, which are indicators for economical and smooth control, i.e. safe for the final control elements valve and pneumatic cylinder;

— System 3 is the best with minimal both σ and t_s and also with the minimal mean values from all step responses for all performance indicators.

5. Conclusion and future research

The contribution and the novelty of the present research are the following.

An approach is developed for the improvement of the performance of a closed loop system with PLC implemented adaptive PID FLC for the control of the level of the solution in an industrial carbonisation column. The adaptive PID FLC consists of a 2ISO PD FLC with parallel integrator of the system error. A PDC auto-tuning mechanism ensures soft blending of the local PD FLC gains and the integrator time-constants which are empirically determined for three expert defined plant operation linearisation zones. The suggested approach is based on off-line GA optimisation of the parameters of the adaptive PID FLC for two adaptation strategies and simulation experiments for assessment of the best strategy.

The off-line GA optimisation is based on system simulation for the computation of the accepted fitness function. Therefore, a system simulation model is developed. It consists of a model of the adaptive PID FLC developed from its PLC implementation

for the real time level control and a TSK plant model. The two models are derived via GA optimisation using data recorded and processed from designed experiments during the real time PLC PID FLC level control with PID FLC empirically determined parameters. The optimal parameters of the adaptive PID FLC result from offline GA minimization using system simulations of a suggested fitness function which integrates requirements for minimal mean squared system error and minimal control variance.

The closed loop PID FLC systems for level control using the two adaptation strategies with empirically determined and optimised PID FLC parameters are investigated by simulations. The system with PDC auto-tuning of only of the integrator time-constant and constant post-processing gain of the PD FLC shows an increased dynamic accuracy compared with the system with the same strategy implemented in the PLC PID FLC with empirically determined parameters for real time level control. The PDC auto-tuning of both the integrator time-constant and the PD FLC gain leads to the best system improvements — the highest dynamic accuracy and the lowest control variance which prolongs the lifetime of the expensive final control elements for the level control in the carbonisation column.

The future research is related with the real time experimentation of the system with the PID FLC with the best adaptive strategy and optimised parameters for the control of the solution level in an operating CCl.

References

1. **Thieme Ch.** Sodium carbonates, *Ullmann'S encyclopedia of industrial chemistry*, Vol. 33. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2012.

2. **Jantzen J.** Foundations of fuzzy control. A practical approach, Second Edition, John Wiley and Sons, Chichester, 2013.
3. **Ahmad D., Ahmad A., Redhu V., Gupta U.** Liquid level control by using fuzzy logic controller, *International Journal of Advances in Engineering and Technology*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 537–549.
4. **Kanagasabai N., Jaya N.** Fuzzy gain scheduling of PID controller for a MIMO process, *International Journal of Computer Applications*, 2014, vol. 91, no. 10, pp. 13–20.
5. **Venkataraman A.** Design and implementation of adaptive PID and adaptive fuzzy controllers for a level process station, *Advances in Technology Innovation*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 90–105.
6. **Kumar B., Dhiman R.** Optimization of PID controller for liquid level tank system using intelligent techniques, *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, 2011, vol. 2, no. 11, pp. 531–535.
7. **Aydogmus Z.** A real-time robust fuzzy-based level control using programmable logic controller, *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 13–17.
8. **Chabni F., Taleb R., Benbouali A., Bouthiba M. A.** The application of fuzzy control in water tank level using, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 261–265.
9. **Ahmad S., Ali S., Tabasha R.** The design and implementation of a fuzzy gain-scheduled PID controller for the Festo MPS PA compact workstation liquid level control, *Engineering Science and Technology*, 2020, vol. 23, pp. 307–315.
10. **Yordanova S., Gueorguiev B., Slavov M.** Design and industrial implementation of fuzzy logic control of Level in soda production, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2020, vol. 23, no. 3, pp.691–699.
11. **Yordanova S., Slavov M., Prokopiev G.** Disturbance compensation in fuzzy logic control of level in carbonisation column for soda production, *WSEAS Transaction on Systems and Control*, 2020, vol. 15, no. 8, pp. 64–72.
12. **Slavov M.** Design and investigation of adaptive fuzzy level control system for carbonisation column, *Proceedings of the Technical University of Sofia*, 2022, vol. 72, no. 2, DOI: 10.47978/TUS.2022.72.02.004
13. **Experion** overview, Release 300.1, Honeywell Int., May 5, 2006.
14. **Fuzzy** logic toolbox: User's guide for use with MATLAB, The MathWorks, Inc., Natick, MA, 1998.
15. **MATLAB** — Genetic algorithm and direct search toolbox. User's guide, The MathWorks, Inc. 2004.
16. **Feng G.** Analysis and synthesis of fuzzy control systems: A model based approach, Bosa Roca, US, CRC Press, Taylor & Francis, 2017.
17. **Tanaka K., Wang H. O.** Fuzzy control systems design and analysis: A linear matrix inequality approach, New York, John Wiley and Sons, 2001.
18. **Haupt R. L., Haupt S. El.** Practical genetic algorithms, Second edition, Hoboken, New Jersey, John Wiley and Sons, 2004.

В. В. Антонов, д-р техн. наук, проф., antonov.v@bashkortostan.ru,
Л. А. Кромина, канд. техн. наук, доц., luyda-kr@yandex.ru,
Л. Е. Родионова, канд. техн. наук, доц., lurik@mail.ru,
Л. А. Фахруллина, канд. техн. наук, доц., almirafax@mail.ru,
Л. И. Баймурзина, ст. преподаватель, lilabay@mail.ru,
Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа,
Е. В. Пальчевский, преподаватель, teelxp@inbox.ru,
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва,
Е. А. Родионов, вед. инженер центра технической поддержки, real42@yandex.ru,
ООО "Сбербанк-сервис" г. Москва

Концепция формирования интеллектуальных управляющих систем энергоснабжения городских сетей*

Вопросы интеллектуального управления в предметно-ориентированной области электроэнергетики (в нашем случае — энергосбережения) как основы любого промышленного производства в современных условиях требуют разработки и внедрения, в первую очередь, новых решений на основе современных IT-технологий.

По данным Всемирного банка известно, что энергоёмкость в России в 3...4 раза ниже, чем в европейских странах. Также известно, что в связи со вступившими в силу новыми положениями в сфере жилищно-коммунального хозяйства, направленными на повышение экономической эффективности в плане потребления электрической энергии, становится весьма актуальным вопрос об обеспечении ее точного и оперативного учета с возможностью дальнейшего прогнозирования потребления электроэнергии и состояния объектов электросети. Это позволит специализированным организациям и службам, а также управляющим органам в кратчайшие сроки принимать сбалансированные эффективные решения в условиях растущей экономической неопределенности.

В данной статье предлагается концепция интеллектуальной управляющей системы для управления процессом мониторинга состояния на основе данных интеллектуальных датчиков. Научная новизна заключается в разработке и применении новой интеллектуальной модели (теоретико-множественной модели процессов соглашения для жизненного цикла интеллектуально-управляющей системы) и методов математического моделирования на основе полученных и восстановленных больших разнородных данных при определении потерь электроэнергии с применением методов теории множеств и теории категорий.

Ключевые слова: машинное обучение, искусственный нейрон, искусственный интеллект, теория категорий, интеграция систем, программно-аналитический комплекс, интеллектуальные датчики, энергоэффективность

Введение

Одной из важнейших задач электроэнергетики в мире, в том числе и в Российской Федерации, является обеспечение качества поставляемой электроэнергии и повышение энергоэффективности за счет снижения энергопотерь и внедрения энергосберегающих мероприятий. В связи с тем, что Российская Федерация расположена в суровых климатических условиях, значительное потребление электроэнергии приходится на потребителей городов и районов (многоквартирные и частные дома), что составляет около трети от общего потребления электроэнергии страны в год. При этом по данным Международного энергетического агентства спрос на электроэнергию вырастет на 50 % к 2050 г. [1]. Более того, сокращение потерь при потреблении

электроэнергии и переход к более устойчивому использованию ресурсов все чаще становятся проблемой для любого вида деятельности. Во многих странах данная проблема частично решается с использованием умных сетей энергоснабжения Smart Grid, с помощью которых выстраиваются интеллектуальные коммуникации между отдельными задачами и операциями в течении всего жизненного цикла энергетических объектов в соответствии с принципами и методами системной инженерии.

Мировой опыт использования Smart Grid демонстрирует основные технологии стратегий внедрения интеллектуальных сетей: в Индии активно используют SCADA/Energy Billing, Energy Auditing & ABT Meter Interface/DMS/EMS и другие технологии; в Швеции автоматизировали и разработали интеллектуальную сеть морского порта в Стокгольме; в США разработали усовершенствованную систему распределения электроэнергии (DMS) и осуществляют мониторинг телемеханики и оборудования на подстанциях и др.

*Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения Государственного задания № FEUE-2023-0007.

Значительный вклад в использование малой генерации в системах электроснабжения промышленных предприятий, в создание распределенной генерации в распределительной электрической сети, в планирование режимов сетей с объектами распределенной генерации, в разработку интеллектуальных управляющих систем внесли М. В. Батенин [2], Н. И. Воропай [3], Е. Н. Гежа [4], П. М. Ерохин, С. А. Ерошенко, А. В. Паздерин [5], П. В. Илюшин [6], А. Г. Фишов [7], А. А. Суворов [8], Chenjun Shi [9], С. W. Gellings [10], M. S. Hamad [11], Hong-Phuc Nguyen [12], Yoash Levron [13]. Множество публикаций посвящено разработке сложной электрической системы для автоматического управления электрической энергией, в том числе работа К. Р. Аллаева [14], энергетические и экономические показатели эффективности рассмотрены в работе Н. Р. Аvezовой [15] и др.

Проведенные исследования вышеупомянутых и не только литературных источников показали отсутствие работ, рассматривающих вопросы комплексного подхода к развернутой оценке энергоэффективности предприятия и выбору направлений ее повышения на промышленных предприятиях, а также определения критериев выбора эффективного мероприятия по энергосбережению. Таким образом, представленные в данной статье результаты исследования не имеют аналогов и обладают признаками научной новизны.

Теоретико-множественная модель процессов жизненного цикла интеллектуальной управляющей системы

Рассматривая базовые стандарты системной инженерии, отдельно выделим ISO/IEC/IEEE 15288:2015(E), отражающий все принципы описания жизненного цикла процессов системы и позволяющий управлять системой и реализовывать проектируемые функции (рис. 1) [16].

На примере разработки прототипа интеллектуальной управляющей системы (ИУС) на основе "Smart Grid" важно отметить, что появляется возможность автоматической оценки текущей ситуации и прогнозирования параметров потерь электроэнергии в будущем. Исходя из этого можно



Рис. 1. Стандарты системной инженерии
Fig. 1. Systems engineering standards

сделать выводы о необходимости внедрения энергосберегающих мероприятий — интеллектуального мониторинга состояния объектов электросетей (на основе учета и прогнозных значений потребления электроэнергии, мощности и текущей нагрузки электросети), позволяющего выявлять потери (в том числе и тенденцию изменения потерь) электроэнергии, а также отслеживать нагрузку как на электросети в целом, так и на их объекты в частности [17, 18].

Таким образом, возникает задача, связывающая два независимых бизнес-процесса: с одной стороны, процесс поставки электроэнергии одними организациями, с другой, — процесс получения электроэнергии другими организациями — потребителями электроэнергии.

Рассмотрим стандарт системной инженерии ISO/IEC/IEEE 15288 для формализации целей, видов деятельности и ее результатов [16].

Данный стандарт описывает четыре группы процессов жизненного цикла (ЖЦ) системы (рис. 2).

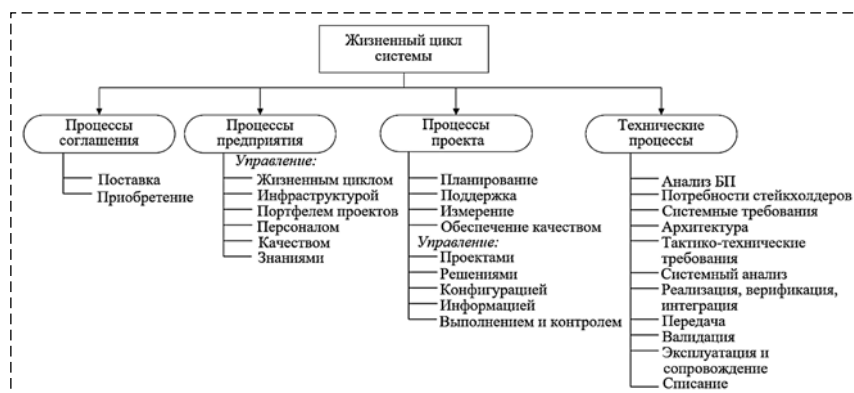


Рис. 2. Процессы жизненного цикла международного стандарта ISO/IEC/IEEE 15288
Fig. 2. ISO/IEC/IEEE 15288 International Standard processes

Поскольку в стандарте ISO/IEC/IEEE 15288 предусмотрены процессы согласования, существуют рабочие отношения, создающиеся по соглашению. При определении семантики отношений строгость отношения и значения сохраняются. Для моделирования процесса соглашения используются основные положения теории категорий. Рассмотрим основной процесс соглашения PS и подпроцессы приобретения PS_{pr} и поставок PS_{po} и определим для данных процессов категории и подкатегории. Категории и подкатегории включают цели и действия процесса, а также результаты. При взаимодействии подкатегорий внутри них определяются информационные объекты, в результате которых формируются коммутативный треугольник (рис. 3) [17].

Рассматривая процесс соглашения PS на примере заключения договора между потребителем электроэнергии и поставщиком электроэнергии, определяем его как процесс приобретения PS_{pr} . Соответствующим процессом поставки PS_{po} будет являться передача запланированного количества электроэнергии. Исходя из категории процесса соглашения PS получаем класс объектов. Классы объектов харак-

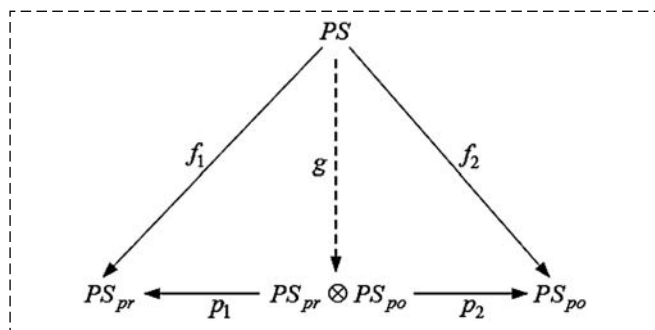


Рис. 3. Обобщенная схема коммутативного треугольника процесса соглашения

Fig. 3. Simplified diagram of a commutative triangle agreement process

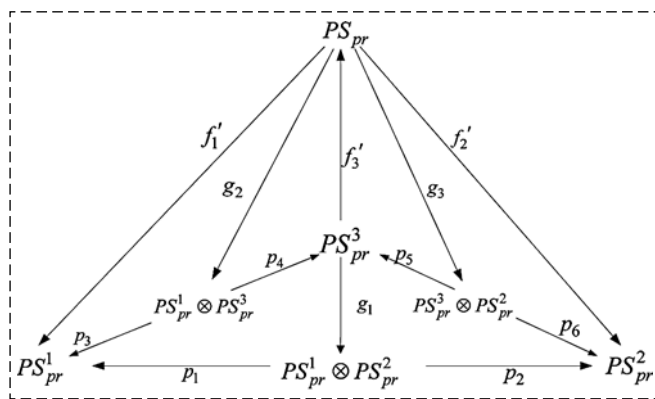


Рис. 4. Схема подкатегории процесса приобретения в виде коммутативного треугольника

Fig. 4. Commutative triangle of the acquisition process

теризуются следующими определенными отношениями пар: (PS, PS_{pr}) и (PS, PS_{po}) с соответствующими отображениями (морфизмами) f_1, f_2 . Рассматривая процессы соглашения в виде взаимодействия процессов приобретения и поставок, представим этот процесс взаимодействия декартовым произведением

$$g : PS \rightarrow PS_{pr} \otimes PS_{po},$$

где g является единственным морфизмом и результатом процесса соглашения (рис. 3).

Рассмотрим отдельную подкатегорию — процесс приобретения PS_{pr} , который состоит из (рис. 4):

1. Цели процесса приобретения

$$PS_{pr}^1 = \{pr_1^1\}.$$

2. Деятельности в процессе приобретения

$$PS_{pr}^2 = \{pr_1^2, \dots, pr_8^2\}.$$

3. Результаты процесса приобретения

$$PS_{pr}^3 = \{pr_1^3, \dots, pr_7^3\}.$$

Аналогично описываются объекты внутри подкатегорий процесса приобретения PS_{pr} , где информационные объекты представлены декартовым произведением $PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^2$ с морфизмами $p_1 : PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^2 \rightarrow PS_{pr}^1$ и $p_2 : PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^2 \rightarrow PS_{pr}^2$, такими что для любого информационного объекта PS_{pr} с морфизмами $f'_1 : PS_{pr} \rightarrow PS_{pr}^1$ и $f'_2 : PS_{pr} \rightarrow PS_{pr}^2$ существует единственный морфизм $g_1 : PS_{pr} \rightarrow PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^2$, который определяется коммутативной диаграммой.

В результате получаем процесс приобретения в виде декартового произведения следующих проекций:

$$PS_{pr} = (PS_{pr}^1) \otimes (PS_{pr}^2) \otimes (PS_{pr}^1) \otimes (PS_{pr}^3) \otimes (PS_{pr}^3) \otimes (PS_{pr}^2). \quad (1)$$

Упростив формулу (1), получаем:

$$PS_{pr} = \{(PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^2), (PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^3), (PS_{pr}^3 \otimes PS_{pr}^2)\}.$$

Аналогично описывается подкатегория "процесс поставки PS_{po} " (рис. 5).

В результате процесс приобретения может быть представлен в виде декартового произведения:

$$PS_{po} = (PS_{po}^1) \otimes (PS_{po}^2) \otimes (PS_{po}^1) \otimes (PS_{po}^3) \otimes (PS_{po}^3) \otimes (PS_{po}^2). \quad (2)$$

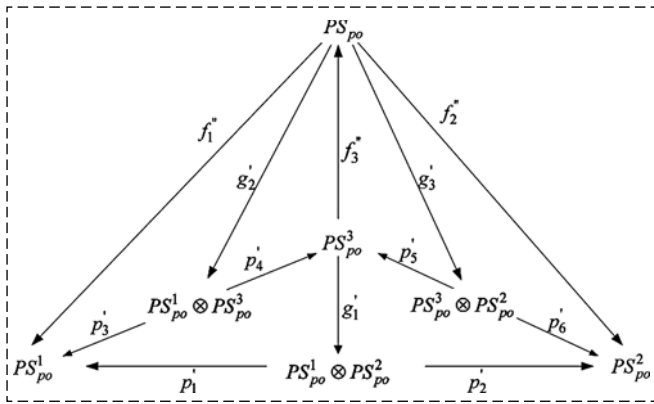


Рис. 5. Коммутативный треугольник процесса поставки
Fig. 5. Commutative triangle of the supply process

Упростив формулу (2), получаем:

$$PS_{po} = \{(PS_{po}^1 \otimes PS_{po}^2), (PS_{po}^1 \otimes PS_{po}^3), (PS_{po}^2 \otimes PS_{po}^3)\}. \quad (3)$$

Далее представлен пример реализации теоретико-множественной модели процессов соглашения в виде математической модели распределения электроэнергии. Данная модель предоставляет возможность определять баланс и дисбаланс показателей объема передаваемой электроэнергии распределительными электрическими сетями конечным потребителям, а также потери электроэнергии на любом участке энергосети.

Энергоснабжение городских сетей обусловлено множествами потребителей электрической энергии, подстанциями, фидерами и оборудованием. Перед поступлением к конечному потребителю электрическая энергия проходит определенные участки сети, что показано на

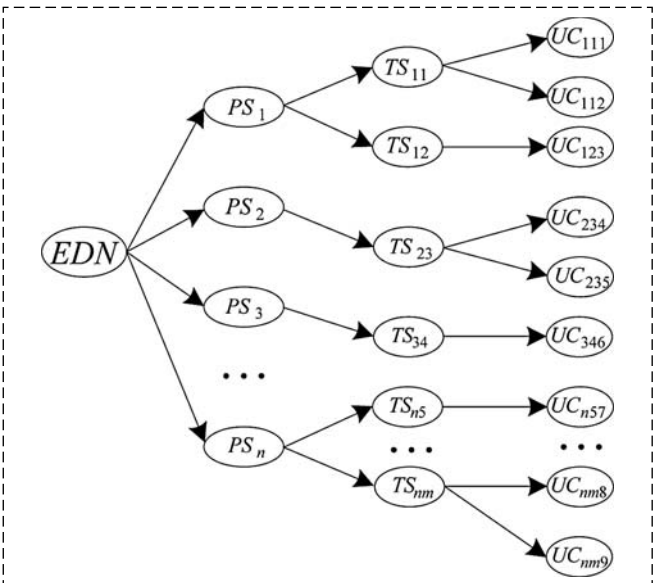


Рис. 6. Схема распределения электроэнергии
Fig. 6. Power distribution scheme

рис. 6. На рис. 6 *EDN* — электрические распределительные сети, *PS* — силовая подстанция, *TS* — трансформаторная подстанция, *UC* — конечный потребитель.

При передаче электрической энергии на любом участке сети могут возникнуть потери, например: на линиях, связывающих распределительные электрические сети и силовые подстанции; на линиях, связывающих силовые и трансформаторные подстанции; на линиях, связывающих трансформаторные подстанции с конечным потребителем; на линиях, находящихся в конечных пунктах потребления.

Введем следующие обозначения: V^1 — общий объем электрической энергии, предоставляемый распределительной электрической сетью; V^2 — объем электрической энергии, получаемый всеми силовыми подстанциями; V^3 — объем электрической энергии, предоставляемый всеми силовыми подстанциями; V^4 — объем электрической энергии, получаемый всеми трансформаторными подстанциями; V^5 — объем электрической энергии, предоставляемый всеми трансформаторными подстанциями; V^6 — объем электрической энергии, получаемый всеми конечными потребителями; i — порядковый номер силовой подстанции, $i = 1, \dots, n$, где n — число силовых подстанций; j — порядковый номер трансформаторной подстанции, $j = 1, \dots, m$, где m — число трансформаторных подстанций; k — порядковый номер конечного потребителя, $k = 1, \dots, t$, где t — число конечных потребителей; p_i — параметр подключения i -й силовой подстанции к распределительной электрической сети, такой что

$$p_i = \begin{cases} 1, & \text{если силовая подстанция} \\ & \text{подключена;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

p_{ij} — параметр подключения j -й трансформаторной подстанции к i -й силовой подстанции, такой что

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если трансформаторная} \\ & \text{подстанция подключена;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

p_{ijk} — параметр подключения k -го конечного потребителя к j -й трансформаторной подстанции i -й силовой подстанции, такой что

$$p_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если конечный потребитель} \\ & \text{подключен;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

Тогда формулу для вычисления объема электрической энергии, получаемого всеми силовыми подстанциями, можно записать в виде

$$V^2 = \sum_{i=1}^n (V_i^2 p_i), \quad (7)$$

где V_i^2 — объем электрической энергии, получаемый i -й силовой подстанцией.

Формула для определения объема электрической энергии, предоставляемого всеми силовыми подстанциями, имеет вид

$$V^3 = \sum_{i=1}^n (V_i^3 p_i), \quad (8)$$

где V_i^3 — объем электрической энергии, предоставляемый i -й силовой подстанцией.

Объем электрической энергии, получаемый всеми трансформаторными подстанциями, можно вычислить по формуле

$$V^4 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (V_{ji}^4 p_{ij}), \quad (9)$$

где V_{ij}^4 — объем электрической энергии, получаемый j -й трансформаторной подстанцией i -й силовой подстанции.

Объем электрической энергии, предоставляемый всеми трансформаторными подстанциями, может быть записан в виде

$$V^5 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (V_{ji}^5 \cdot p_{ij}), \quad (10)$$

где V_{ij}^5 — объем электрической энергии, предоставляемый j -й трансформаторной подстанцией i -й силовой подстанции.

Тогда объем электрической энергии, получаемый всеми конечными потребителями, определяется по формуле

$$V^6 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l (V_{ijk}^6 p_{ijk}). \quad (11)$$

Таким образом, в системе энергообеспечения должен соблюдаться баланс, смысл которого заключается в том, что общий объем электрической энергии, предоставляемый распределительной электрической сетью, должен быть равен: объему электрической энергии, получаемому всеми силовыми подстанциями; объему электрической энергии, предоставляемому всеми силовыми подстанциями; объему электрической энергии, получаемому всеми трансформаторными подстанциями; объему электрической энергии, предоставляемому всеми трансформаторными подстанци-

ми; объему электрической энергии, получаемому всеми конечными потребителями, т.е.

$$V^1 = V^2 = V^3 = V^4 = V^5 = V^6. \quad (12)$$

Однако в реальности могут иметь место потери электрической энергии, которые можно классифицировать, как показано на рис. 7.

В рамках данной работы предлагается определять размер потерь на каждом конкретном участке сети следующим образом [22]:

1) потери на линиях, связывающих распределительные электрические сети и силовые подстанции,

$$P^1 = \frac{(V^1 - V^2) \cdot 100 \%}{V^1}; \quad (13)$$

2) потери на силовых подстанциях

$$P^2 = \frac{(V^2 - V^3) \cdot 100 \%}{V^2}; \quad (14)$$

3) потери на линиях, связывающих силовые и трансформаторные подстанции,

$$P^3 = \frac{(V^3 - V^4) \cdot 100 \%}{V^3}; \quad (15)$$

4) потери на трансформаторных подстанциях

$$P^4 = \frac{(V^4 - V^5) \cdot 100 \%}{V^4}; \quad (16)$$

5) потери на линиях, связывающих трансформаторные подстанции с конечным потребителем, а также потери в конечных пунктах потребления

$$P^5 = \frac{(V^5 - V^6) \cdot 100 \%}{V^5}. \quad (17)$$

Таким образом, общий объем потерь электроэнергии P определяется как сумма потерь на всех участках сети:

$$P = P^1 + P^2 + P^3 + P^4 + P^5. \quad (18)$$

В случае, когда общий объем потерь электроэнергии P превышает допустимое плановое значение потерь PL , следует выявлять причину и устранять ее [19, 20]. Предложенная математическая модель применима при реализации

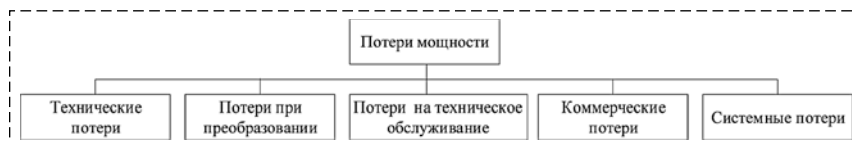


Рис. 7. Классификация потерь электроэнергии

Fig. 7. Classification of electricity losses

Баланс на основании ежемесячных сводных актов первичного учета перетоков электрической энергии по сетям ООО "Башкирэнерго"

Balance based on monthly summary acts of primary metering of electric energy flows through the networks of Bashkirenergo LLC

Наименование показателя	Единица измерения	Значения до внедрения ИУС	Значения после внедрения ИУС
Отпуск электроэнергии в сеть	тыс. кВт·ч	21 327 410,34	21 327 410,34
Отпуск электроэнергии из сети, в том числе:	тыс. кВт·ч	19 739 619,10	19 739 619,10
Отпуск электроэнергии из сети нижестоящим сетевым организациям	тыс. кВт·ч	3 604 033,49	3 604 033,49
Полезный отпуск электроэнергии из сети потребителям, юридическим лицам	тыс. кВт·ч	13 017 803,15	13 017 803,15
Полезный отпуск электроэнергии из сети населению и приравненным к нему потребителям	тыс. кВт·ч	3 117 782,47	3 117 782,47
Потери электроэнергии в сети	тыс. кВт·ч	1 587 791,23	1 190 843,42
Потери электроэнергии в сети	%	7,44	5,58
Затраты на покупку потерь электроэнергии в сетях (финансовые убытки)	млн руб.	4 418,68	3 314,01

интеллектуальной системы, направленной на организацию энергосбережения.

На сегодняшний день главным показателем эффективности функционирования предприятия является потеря электроэнергии. На различных территориях нашей страны существуют свои нормы или же приемлемый уровень потерь электроэнергии, а также максимально возможный уровень потерь по техническим причинам. Представленная математическая модель с аналитическими показателями говорит о том, что увеличение показателя уровня потерь электроэнергии влечет за собой проблему, требующую анализа и принятия решения. Суммарное выражение всех имеющихся потерь предприятия должно стремиться к нулю, иначе потери электроэнергии являются прямыми финансовыми убытками электрических сетей.

Конечно, в теории финансовые убытки обязаны приравниваться к нулю, но в действительности расчеты выработанной электроэнергии, технические и абсолютные потери всегда имеют погрешности. С помощью предлагаемой ИУС на основе теоретико-множественной модели процессов соглашения и анализа данных во время совершенных операций данные погрешности должны быть сведены к минимуму.

В качестве примера рассмотрим результат, полученный в рамках внедрения ИУС в компанию ООО "Башкирские распределительные электрические сети". В табл. 1 представлена информация о балансе электрической энергии и мощности, в том числе об отпуске электроэнергии, потерях

электроэнергии из сети ООО "Башкирэнерго" по уровням напряжений [21, 22].

В результате проведенного сравнительного анализа мы видим, что существенно сократились финансовые затраты на потери электроэнергии в сети на 1 104,67 млн руб., потери электроэнергии уменьшились на 1,86 %. Осуществление всесторонних изменений системы управления с помощью ИУС привело к улучшению ключевых показателей результативности и росту эффективности предприятия.

Структура интеллектуальной управляющей системы

Определяя структуру на основе теоретико-множественной модели ИУС, получаем схему хранилища данных ИУС, представленную на рис. 8.

ИУС характеризуется возможностью использования различных СУБД (Oracle, MySQL, Data Warehouse, OLTP, OLAP и др.), современных средств хранения и оперативной аналитической обработки информации. При использовании ИУС руководители получают эффективный инструмент для анализа количества энергопотерь, а также для формирования данных о энергопотерях, представленных в табличном и графическом виде. Данная ИУС решает задачи обеспечения централизованного сбора и хранения, обработки, обновления и структуризации, интеграции и консолидированного анализа. Подсистемы ИУС отвечают принципам развиваемости, блочности построения и адаптивности функциональной части.

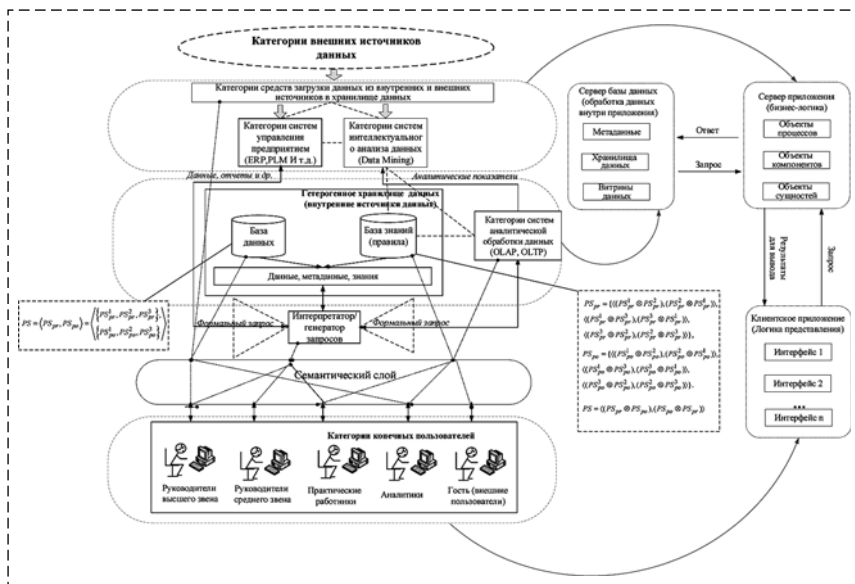


Рис. 8. Обобщенная схема хранилища данных ИУС
 Fig. 8. Generalised schematic diagram of an IMS data warehouse

Для частного случая — управления потерями — основными данными для БД служат показатели электроэнергии, где имеется полная информация о показателях потерь электроэнергии, идентификатор таблицы, в которой хранятся значения атрибутов, а также идентификаторы размерности значений атрибута.

В базе знаний описан алгоритм работы программы в терминах теории категорий множеств.

Внешними источниками данных являются:

- министерство энергетики РФ;
- местная администрация города и района;
- взаимодействующие организации (предприятия, многоквартирные и частные дома);
- вышестоящие органы управления (холдинги, корпорации и т. д.).

Заключение

В рамках проведенного исследования разработаны:

- 1) универсальная многомерная структура ИУС, позволяющая повысить эффективность обработки, передачи, интеграции данных и знаний интеллектуального контента в компьютерных сетях, на примере формирования плана передачи электрической энергии.;
- 2) математическая модель, предоставляющая возможность определять баланс и дисбаланс показателей объема передаваемой распределительными электрическими сетями до конечных потребителей электроэнергии, а также потери электроэнергии на любом участке энергосети.

Построенная математическая модель может быть применима при реализации интеллектуальной системы, направленной на организацию энергосбережения.

Таким образом, предложенные модели целесообразно применять в рамках реализации ИУС, что в полной мере обеспечит оперативность выявления потерь электрической энергии.

На основании проведенного исследования сформулированы основы построения структуры ИУС для описанной предметной области с использованием теории категорий и формальных языков для формального описания объектов и их взаимодействия,

а также с применением аппарата искусственного интеллекта.

Предложенная ИУС позволяет осуществить пополнение коллекций данных и их предварительную обработку с выявлением особенностей, классификацию, систематизацию, оптимизацию и очистку для повышения информационной насыщенности. Также облегчается интерпретация результатов апробации предложенных теоретических основ на реальных примерах для сложных систем.

Список литературы

1. International Energy Agency. Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050. Paris: OECD/IEA, 2013. 284 p.
2. Батенин В. М., Бушуева В. В., Воропай Н. И. Инновационная электроэнергетика. М.: Энергия, 2017. 584 с.
3. Воропай Н. И., Сулов К. В. Задачи обоснования разработки систем активного электроснабжения // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 2—6.
4. Гежа Э. Н., Ивкин Э. С., Сердюков О. В., Глазырин В. Е., Глазырин Г. В., Марченко А. И., Семендяев Р. Ю., Фишин А. Г. Системная автоматизация интеграции локальных систем электроснабжения с синхронной малой генерацией в электрические сети" // Ретранслятор. 2018. Т. 2, № 32. С. 24—31.
5. Ерохин П. М., Ерошенко С. А., Паздерин А. В., Самойленко В. О., Рывлин А. Л., Стерлягова С. А. Разработка адекватных технических условий на технологическое присоединение объектов малой мощности к электрическим сетям // Промышленная энергетика. 2016. Т. 2. С. 6—12.
6. Ильишин П. В., Кучеров Ю. Н., Жук А. З., Веселов Ф. В. Особенности интеграции малых распределенных тепловых электростанций в энергосистему // Энергетическая академия. 2014. Т. 6, № 3. С. 36.
7. Фишов А. Г., Ландман А. К., Сердюкова О. В. SMART-технологии подключения к электрическим сетям и управления режимами малой генерации // VIII Международная

молодежная научно-техническая конференция "Электроэнергетика глазами молодежи — 2017. Самара: СамГТУ, 2017. С. 27—34.

8. **Суворов А. А., Гусев А. С., Андреев М. В., Ставицкий С. А.** Проблема достоверности расчетов токов короткого замыкания в электроэнергетических системах и средства их всережимной проверки // Известия РАН. Энергия. 2018. Т. 2. С. 13—25.

9. **Lei L., Lezhu C., Sheng X., Yongjia X., Chenjun S.** Design and implementation of intelligent monitoring terminal for distribution room based on edge computing // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 1131—1138.

10. **Gellings C. W.** The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response. River Publishers, 2009. 250 p.

11. **Mohab G., El-Banna S. H., El-Dabah M., Hamad M. S.** Intelligent Energy Management System for an all-electric ship based on adaptive neuro-fuzzy inference system // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 7989—7998.

12. **Wang K., Dagne T. B., Lin C. J., Haile B. W., Nguyen H. P.** Intelligent control for energy conservation of air conditioning system in manufacturing systems // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 2125—2137.

13. **Onile A. E., Machlev R., Petlenkov E., Levron Y., Belikov J.** Uses of the digital twin's concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management // A review, Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 997—1015.

14. **Allaev K., Makhmudov T.** Research of small oscillations of electrical power systems using the technology of embedding systems // Electrical Engineering. 2020. Vol. 102. P. 309—319.

15. **Avezova N. R., Avezov R. R., Samiev K. A.** et al. Comparative Heating Performance and Engineering Economic Indicators of the "Trombe Wall" System in Different Climate Zones of Uzbekistan // Applied Solar Energy. 2021. Vol. 57. P. 128—134.

16. **ISO/IEC/IEEE 15288:2015** System and software engineering — System life cycle processes.

17. **Куликов Г. Г., Ризванов К. А., Петров Ю. Е.** Системный подход к построению структуры организационно-функциональной модели цифрового моделирования производственных процессов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная техника, управление, радиоэлектроника. 2018. № 2. С. 60—70.

18. **Куликов Г. Г., Антонов В. В., Фахруллина А. Р., Родионова Л. Е.** Формальная модель процессов взаимодействия компонентов программных систем на основе фрактального подхода // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. № 4. С. 48—69.

19. **Kulikov G. G., Antonov V. V., Antonov D. V.** Theoretical and applied aspects of building models of information systems // LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2011. 134 p.

20. **Kulikov G. G., Antonov V. V., Rodionova L. E., Fakhrullina A. R., Kromina L. A.** Architecture of the intelligent software-analytical complex for operating big in a subject-oriented area (for example in the power engineering) // Proceedings 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: ICOECS 2020. 2020. P. 1—6.

21. **Раскрытие информации** в соответствии со Стандартами раскрытия информации субъектами оптового и розничного рынков электрической энергии, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 21.01.2004 № 24 [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102085036>

22. **Севек В. К., Сагааноол К. Б., Манчык-Сат Ч. С., Монгушова С. П.** Состав и классификация потерь электроэнергии при ее передаче // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2014. № 3. С. 124—130.

The Concept of Formation of Intelligent Control Systems of Power Supply of Urban Networks

V. V. Antonov, antonov.v@bashkortostan.ru, **L. E. Kromina**, luyda-kr@yandex.ru,

L. E. Rodionova, luyda-kr@yandex.ru, **A. R. Fakhrullina**, almirafax@mail.ru, **L. I. Baimurzina**, lilabay@mail.ru,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation,

E. V. Palchevsky, teelxp@inbox.ru,

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 109456, Russian Federation

E. A. Rodionov, real42@yandex.ru,

LLC "Sberbank Service", Moscow, 127018, Russian Federation

Corresponding author: Palchevsky Evgeny V., Lecturer, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 109456, Russian Federation, e-mail: teelxp@inbox.ru

Accepted on November 22, 2023

Abstract

Modern capabilities of intelligent control systems are increasingly being used in areas previously considered the exclusive work of people — experts with relevant experience in a particular field. Machine learning capabilities in the field of electric power industry, obtaining forecasts based on the data of intelligent sensors of various purposes are not an exception. At present the Russian Government has adopted a program for the development of the manufacturing industry until the end of 2035: during this time manufacturing output should grow by 192 %. It is obvious that this program should also meet the requirements of the modern scientific concept of industrial revolution "Industry 4.0", when manufacturing enterprises and corporations begin to develop and apply subsystems and elements of "smart manufacturing", which help to build intelligent communications between individual tasks and operations during the entire life cycle of production, in accordance with the principles and methods of systems engineering. It is important to note that the issues of intelligent management in the subject-oriented area of electric power industry (in our case — energy saving), as the basis of any industrial production in modern conditions, require the development and implementation, first of all, of new solutions based on modern IT-technologies. It is known that energy intensity in Russia, according to the World Bank, is 3-4 times lower than in European countries. It is also known that in connection with the new provisions in the field of housing and communal services, aimed at improving economic efficiency in terms of electricity consumption, it becomes very important to ensure

its accurate and operational accounting with the possibility of further forecasting of electricity consumption and the state of power grid facilities, which will allow specialized organizations and services, as well as the managing bodies in the shortest time to make a balanced specialized decisions This paper proposes the concept of intelligent control system to manage the process of condition monitoring based on data from intelligent sensors. The novelty of the concept is to consider a variant of solving the problem of integration of information systems associated with weakly structured subject-oriented information flows in the electric power industry enterprise by using methods of set theory and category theory.

Keywords: machine learning, artificial neuron, artificial intelligence, category theory, systems integration, information and control system, smart sensors, energy efficiency

Acknowledgements: The research is carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the basic part of the state task for higher education institutions # FEUE-2023-0007.

For citation:

Antonov V. V., Kromina L. E., Rodionova L. E., Fakhrollina A. R., Baimurzina L. I., Palchevsky E. V., Rodionov E. A. The Concept of Formation of Intelligent Control Systems of Power Supply of Urban Networks, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 4, pp. 190–198.

DOI: 10.17587/mau.24.190-198

References

1. International Energy Agency. Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050, Paris, 2013, 290 p.
2. Batenin V. M., Bushueva V. V., Voropai N. I. Innovative electric power industry, Moscow, Energy, 2017, 584 p. (in Russian).
3. Voropay N. I., Suslov K. V. Tasks of substantiation of the development of active power supply systems, *Industrial Energy*, 2018, no. 1, pp. 2–6 (in Russian).
4. Gezha E. N., Ivkin E. S., Serdyukov O. V., Glazyrin V. E., Glazyrin G. V., Marchenko A. I., Semendyaev R. Yu., Fishin A. G. System automation of the integration of local power supply systems with synchronous small generation into electric networks, *Retranslator*, 2018, vol. 2, no. 32, pp. 24–31 (in Russian).
5. Erokhin P. M., Eroshenko S. A., Pazderin A. V., Samoilenko V. O., Ryvlin A. L., Sterlyagova S. A. Development of adequate technical conditions for the technological connection of low-power facilities to electric networks, *Industrial Energy*, 2016, vol. 2, pp. 6–12 (in Russian).
6. Ilyushin P. V., Kucherov Yu. N., Zhuk A. Z., Veselov F. V. Features of the integration of small distributed thermal power plants into the energy system, *Energy Academy*, 2014, vol. 6, no. 3, p. 36 (in Russian).
7. Fishov A. G., Landman A. K., Serdyukova O. V. SMART technologies for connecting to electric grids and controlling modes of small generation, *VIII International Youth Scientific and Technical Conference "Electric power industry through the eyes of youth – 2017"*, pp. 27–34 (in Russian).
8. Suvorov A. A., Gusev A. S., Andreev M. V., Stavitsky S. A. The problem of reliability of calculations of short-circuit currents in electric power systems and means of their all-mode verification, *Izvestiya RAN. Energy*, 2018, vol. 2, pp. 13–25 (in Russian).
9. Lei L., Lezhu C., Sheng X., Yongjia X., Chenjun S. Design and implementation of intelligent monitoring terminal for distribution room based on edge computing, *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 1131–1138 (in Russian).
10. Gellings C. W. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response, River Publishers, 2009, 250 p.
11. Mohab G., El-Banna S. H., El-Dabah M., Hamad M. S. Intelligent Energy Management System for an all-electric ship based on adaptive neuro-fuzzy inference system, *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 7989–7998.
12. Wang K., Dagne T. B., Lin C. J., Haile B. W., Nguyen H. P. Intel-ligent control for energy conservation of air condition-ing system in manufacturing systems, *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 2125–2137.
13. Onile A. E., Machlev R., Petlenkov E., Levron Y., Belikov J. Uses of the digital twin's concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management, *A review, Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 997–1015.
14. Allaev K., Makhmudov T. Research of small oscillations of electrical power systems using the technology of embedding systems, *Electrical Engineering*, 2020, vol. 102, pp. 309–319 (in Russian).
15. Avezova N. R., Avezov R. R., Samiev K. A. et al. Comparative Heating Performance and Engineering Economic Indicators of the "Trombe Wall" System in Different Climate Zones of Uzbekistan, *Applied Solar Energy*, 2021, vol. 57, pp. 128–134.
16. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 System and software engineering — System life cycle processes.
17. Kulikov G. G., Rizvanov K. A., Petrov Yu. E. A systematic approach to building the structure of an organizational-functional model of digital modeling of production processes, *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technology, control, radio electronics*, 2018, no. 2, pp. 60–70 (in Russian).
18. Kulikov G. G., Antonov V. V., Fakhrollina A. R., Rodionova L. E. Formal model of the processes of interaction between components of software systems based on the fractal approach, *Electrotechnical and information complexes and systems*, 2018, no. 4, pp. 48–69 (in Russian).
19. Kulikov G. G., Antonov V. V., Antonov D. V. Theoretical and applied aspects of building models of information systems, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 134 p.
20. Kulikov G. G., Antonov V. V., Rodionova L. E., Fakhrollina A. R., Kromina L. A. Architecture of the intelligent software-analytical complex for operating big in a subject-oriented area (for example in the power engineering), *Proceedings of 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: ICOECS 2020*, 2020, pp. 1–6.
21. Disclosure of information in accordance with the Standards for Disclosure of Information by the Entities of the Wholesale and Retail Electricity Markets, approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 24 dated January 21, 2004, available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102085036>
22. Sevek V. K., Saganool K. B., Manchyk-Sat C. S., Mon-gushovna S. R. Composition and classification of electricity losses during transmission, *Bulletin of the Tuva State University. Technical and physical and mathematical sciences*, 2014, no. 3, pp. 124–130 (in Russian).

А. Н. Шемякин¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., shemyakin@lantanlaser.ru,
 М. Ю. Рачков², д-р техн. наук, проф., michyur@gmail.com,
 Н. Г. Соловьев¹, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., solovyov@lantanlaser.ru,
 М. Ю. Якимов¹, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., yakimov@lantanlaser.ru,
 М. А. Котов¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., kotov@ipmnet.ru,
¹ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,
² Московский государственный политехнический университет, г. Москва

Определение динамических характеристик системы управления мощностью излучения технологических СО₂-лазеров с накачкой несамостоятельным тлеющим разрядом

Исследована автоматическая система управления мощностью излучения лазеров с накачкой несамостоятельным тлеющим разрядом на примере технологических лазеров серии "Лантан", которые предназначены для резки, сварки и модификации поверхности различных материалов в составе лазерных технологических комплексов. Мощность лазерного излучения является одним из важнейших параметров лазера, определяющих его технологические возможности. Мощность излучения управляется путем изменения частоты импульсов ионизации, которые представляют собой высоковольтные импульсы напряжения длительностью 100 нс, подаваемые с частотой 1...5 кГц. Экспериментально получена переходная характеристика лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом. Лазерное излучение подается на термоэлектрическое зеркало-приемник с анизотропией термоЭДС, которое измеряет его мощность. После предварительного усиления дифференциальный сигнал с зеркала-приемника регистрируется цифровым запоминающим осциллографом. Установлено запаздывание изменения мощности лазерного излучения относительно сигнала управления. Запаздывание составляет 1487 мкс и объясняется тем, что для первоначальной накачки газового объема до начала генерации излучения необходимо несколько импульсов ионизации. Начальный участок переходной характеристики и затухающие колебания объясняются наличием защитного дросселя в схеме подключения источника основного разряда. Дроссель замедляет рост тока при контракции (коротком замыкании) разряда, позволяя автоматическим выключателям отключить электропитание. Для моделирования переходного процесса применяется переходная характеристика колебательного звена. Проведена фильтрация исходного сигнала для удаления помех, которые не позволяют сразу определить параметры переходной характеристики. Для определения спектра переходной характеристики проведено прямое быстрое преобразование Фурье, вырезаны гармоники, вносящие помехи и проведено обратное быстрое преобразование Фурье. По переходной характеристике, полученной после фильтрации, определены параметры моделирующей переходной характеристики. На основе параметров переходной характеристики вычислена передаточная функция лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом, что позволяет перейти к расчету оптимального регулятора мощности излучения, обеспечивающего наилучшее качество переходного процесса.

Ключевые слова: технологический лазер, несамостоятельный тлеющий разряд, частота импульсов ионизации, система управления, мощность лазера, переходная характеристика, фильтрация помех, быстрое преобразование Фурье, передаточная функция

Введение

Мощные технологические СО₂-лазеры предназначены для резки, сварки и модификации поверхности различных материалов в составе лазерных технологических комплексов. Эти комплексы представляют собой сложные технические системы, поэтому автоматизация управления является необходимым условием для их использования на производстве. Одним из самых распространенных способов получения активной среды технологических лазеров является газовый разряд [1]. Использование несамостоятельного тлеющего разряда (НТР), в котором функции ионизации газа и вклада энергии в разряд разделены между двумя источниками, позволило добиться значительного прогресса в области создания мощных СО₂-лазеров. В НТР функции создания проводимости плазмы (создания электронов) и вклада энергии в разряд разделены между двумя различными типами разрядов. Ионизация (проводимость)

обеспечивается внешним ионизатором, а вклад энергии — прохождением тока основного разряда через плазму с концентрацией электронов, задаваемой ионизацией. Существуют три основные схемы организации НТР, используемых в лазерах: с ионизацией электронным пучком [2], с импульсной электродной ионизацией [3] и с импульсной емкостной ионизацией [4].

НТР с импульсной емкостной ионизацией обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами несамостоятельных разрядов. В отличие от разряда с ионизацией электронным пучком он не сопровождается рентгеновским излучением и не требует биологической защиты персонала. По сравнению с НТР с импульсной электродной ионизацией существенно упрощается конструкция газоразрядной камеры за счет отсутствия секционирования камеры и балластных резисторов.

НТР с импульсной емкостной ионизацией позволяет легко управлять мощностью лазерного излучения в автоматическом режиме,

обеспечивает высокую оптическую однородность активного объема, стабильность разряда и высокий КПД.

Схема организации разряда

Схема организации НТР с импульсной емкостной ионизацией показана на рис. 1.

В этой схеме импульсное напряжение с генератора импульсов ионизации (ГИИ) подается на дополнительную пару электродов ионизации большой площади, изолированных от плазмы диэлектрическими пластинами. Этот тип вспомогательных разрядов называется емкостным импульсным разрядом. Он характеризуется высокой пиковой мощностью, необходимой для обеспечения равномерной ионизации в разрядном промежутке между диэлектрическими пластинами и относительно низкой средней по времени мощностью. Колебательное возбуждение равномерно ионизированной среды создается стационарным несамостоятельным разрядом, называемым основным разрядом. Постоянное напряжение с источника питания основного разряда (ИПОР) подается на трубчатые металлические электроды (катод и анод), расположенные по краям разрядной камеры. Быстрый поток газа направлен от катода к аноду, перпендикулярно оси оптического резонатора. Остальные две стенки камеры имеют отверстия, чтобы лазерное излучение проходило к наружным зеркалам резонатора. Оптические оси резонатора складываются в Z-образную форму, так что лазерный луч полностью заполняет активный объем.

Первые опыты по стабилизации мощного тлеющего разряда быстроповторяющимися высоковольтными импульсами были сделаны в работах А. Е. Хилла [5]. На экспериментальном лазере "Циклон" [4], разработанном в ИПМех РАН, впервые были проведены исследования НТР с импульсной емкостной ионизацией в камере большого объема в условиях мощной непрерывной лазерной генерации. Этот оригинальный способ организации разряда по-

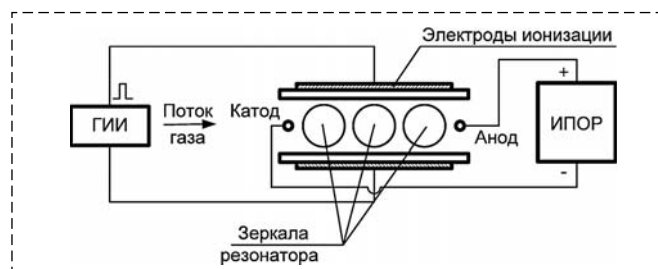


Рис. 1. Схема организации НТР с импульсной емкостной ионизацией

Fig. 1. Nonself-sustained glow discharge system with pulsed capacitive ionization

звляет получить высококачественное однододовое лазерное излучение мощностью до 10 кВт.

На основе исследований, проведенных на лазере "Циклон", были разработаны экспериментальный технологический лазер "Лантан-1", а затем технологический лазер "Лантан-2", предназначенный для промышленного выпуска. Дальнейшим развитием метода импульсной емкостной ионизации стала разработка моноблочного автоматизированного технологического лазера "Лантан-3" [6] и экспериментального технологического лазера с быстрой осевой прокачкой [7], на котором было получено непрерывное излучение мощностью 4 кВт с высоким КПД.

Мощность лазерного излучения (объект управления) является одним из важнейших параметров лазера, определяющих его технологические возможности, например скорость резания [8]. Автоматическая система управления мощностью излучения лазера (далее система управления) должна обеспечивать динамические и статические характеристики, в соответствии с заданными требованиями к качеству регулирования [9].

Динамические свойства системы можно определить по ее экспериментальной переходной характеристике. На ее основе строится модель объекта управления, определяются его передаточная функция и частотные характеристики. Зная модель объекта, можно синтезировать регулятор системы управления, обеспечивающий заданные требования к качеству регулирования. Полученное качество регулирования проверяется и, при необходимости, регулятор настраивается экспериментальным путем.

Мощность излучения лазера с НТР с импульсной емкостной ионизацией управляется путем изменения частоты импульсов ионизации, которые представляют собой высоковольтные импульсы напряжения длительностью 100 нс, подаваемые с частотой 1...5 кГц [10, 11].

Экспериментальное получение переходной характеристики объекта управления

Структурная схема системы управления приведена на рис. 2.

Схема включает передаточную функцию объекта управления $W_o(s)$ и передаточную функцию регулятора $W_r(s)$, а также коэффициент передачи

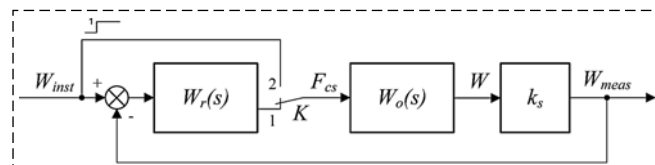


Рис. 2. Структурная схема системы управления

Fig. 2. Block diagram of the control system

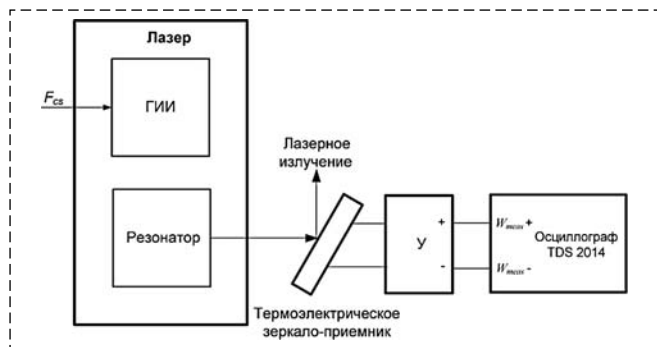


Рис. 3. Схема эксперимента
Fig. 3. Experimental setup

датчика мощности k_s . На вход элемента сравнения подается установленная мощность лазерного излучения W_{insr} . На другой вход элемента сравнения поступает измеренная мощность лазерного излучения W_{meas} . Реальная мощность лазерного излучения W измеряется термоэлектрическим зеркалом-приемником [12]. Элемент сравнения вычисляет сигнал ошибки и подает его на регулятор. Сигнал F_{cs} управляет частотой ионизации, что приводит к соответствующему изменению мощности лазерного излучения W , уменьшая ошибку. Переключатель K предназначен для отключения регулятора.

Переходная характеристика представляет собой переходный процесс на выходе объекта, возникающий при подаче на его вход единичного скачкообразного воздействия [13]. Для экспериментального получения переходной характеристики регулятор отключается от объекта управления (переключатель K в положении 2), и на вход объекта подается единичный скачок 1 В.

Эксперименты проводились на технологическом лазере "Лантан-3" [6]. Схема эксперимента приведена на рис. 3.

Система управления задает мощность излучения лазера сигналом управления частотой ионизации F_{cs} , который поступает на генератор импульсов ионизации (ГИИ). Частота импульсов ионизации соответствует заданной мощности излучения лазера. Лазерное излучение подается на термоэлектрическое зеркало-приемник с анизотропией термоЭДС [12], которое измеряет его мощность. Зеркало-приемник обладает линейной характеристикой в диапазоне мощности от 0 до 3 кВт [14]. После предварительного усиления на усилителе $У$ дифференциальный сигнал с зеркала-приемника W_{meas} регистрируется цифровым запоминающим осциллографом TDS 2014 фирмы Tektronix [15].

Предварительная обработка результатов

Прежде всего, необходимо отметить запаздывание изменения мощности лазерного излу-

чения относительно сигнала управления, что показано на рис. 4.

Запаздывание составляет 1487 мкс и объясняется тем, что для первоначальной накачки газового объема до начала генерации излучения необходимо несколько импульсов ионизации. На рисунке ясно видны помехи от этих импульсов ионизации на управляющем сигнале. Таким образом, для начала генерации необходимы четыре импульса ионизации.

Переходная характеристика объекта управления показана на рис. 5.

Записано 2500 точек с частотой дискретизации 25 000 Гц. На переходной характеристике видны затухающие колебания. Первоначальное увеличение мощности лазерного излучения сменяется небольшим спадом, а затем мощность излучения снова начинает расти. Начальный участок переходной характеристики и затухающие колебания объясняются схемой подключения источника основного разряда к электродам НТР (рис. 6).

Напряжение питания источника основного разряда U_{op} подается на катод НТР К и анод

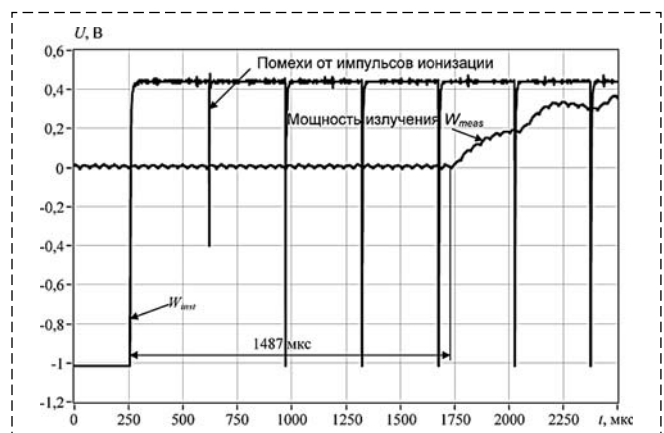


Рис. 4. Запаздывание изменения мощности лазерного излучения относительно сигнала управления
Fig. 4. Delay in changing the laser power signal relative to the control signal

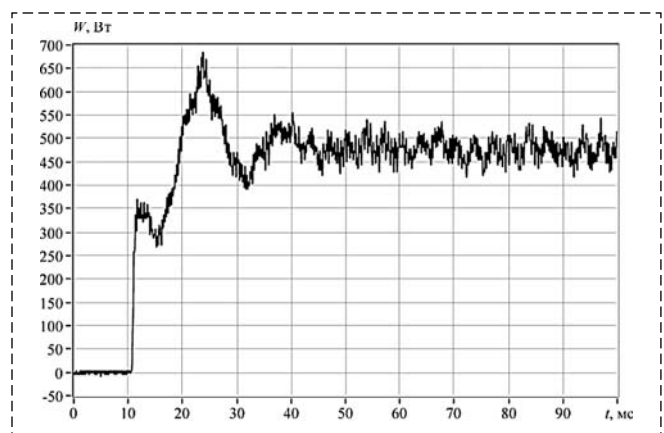


Рис. 5. Переходная характеристика объекта управления
Fig. 5. Transient response of the control object

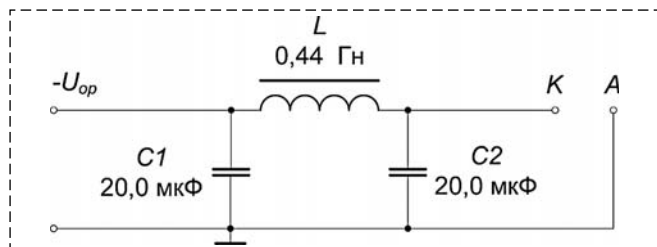


Рис. 6. Схема подключения источника основного разряда к электродам лазера

Fig. 6. Connection of the main discharge source to the laser electrodes

НТР А через две параллельные емкости $C1$ и $C2$ и дроссель L , который выполняет защитную функцию. Он замедляет рост тока при контракции (коротком замыкании) разряда, позволяя автоматическим выключателям отключить электропитание лазеров с НТР в этой аварийной ситуации.

Фильтрация переходной характеристики объекта управления

В любом случае переходный процесс имеет характер затухающих колебаний, и для его моделирования можно применить переходную характеристику колебательного звена. Однако исходный сигнал сильно зашумлен помехами, что не позволяет точно определить коэффициенты переходной характеристики. Для очистки сигнала от помех проведем преобразование Фурье исходного сигнала [16]

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt,$$

вырежем гармоники, вносящие помехи, и проведем обратное преобразование Фурье

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega.$$

Для дискретных по времени сигналов вместо интегрального применяют дискретное преобразование Фурье. В среде проектирования LabVIEW 2010 реализован алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье (БПФ) [17]. Прямое БПФ по 2048 точкам проводилось с помощью функций FFT, а обратное БПФ — с помощью функции Inverse FFT [18].

Для спектрального анализа взята наиболее периодическая часть переходной характеристики (15,2 мс от начала регистрации) и убрана ее постоянная составляющая. При частоте дискретизации 25 000 Гц и БПФ по 2048 точкам разрешение по частоте составляет $25000/2048 = 12,21$ Гц.

Наиболее интересная часть спектра, находящаяся в диапазонах 0...4000 Гц и 0...500 Гц, показана на рис. 7, 8.

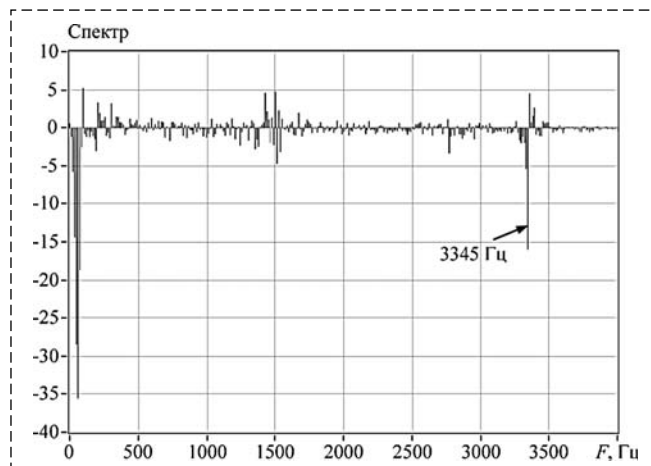


Рис. 7. Спектр переходной характеристики объекта управления в диапазоне 0...4000 Гц

Fig. 7. Spectrum of the control object transient response in the range of 0...4000 Hz

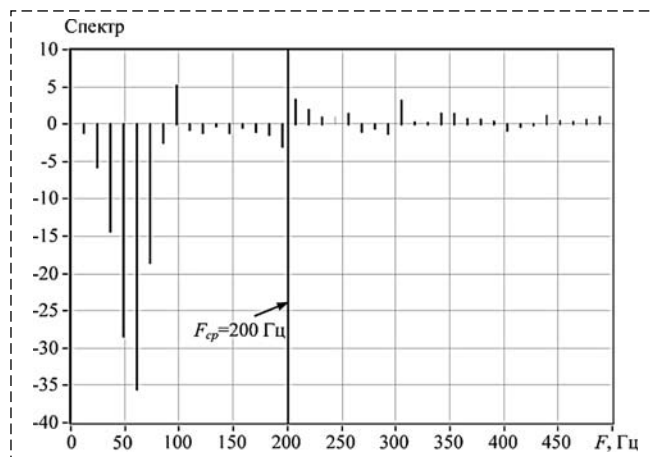


Рис. 8. Спектр переходной характеристики объекта управления в диапазоне 0...500 Гц

Fig. 8. Spectrum of the control object transient response in the range of 0...500 Hz

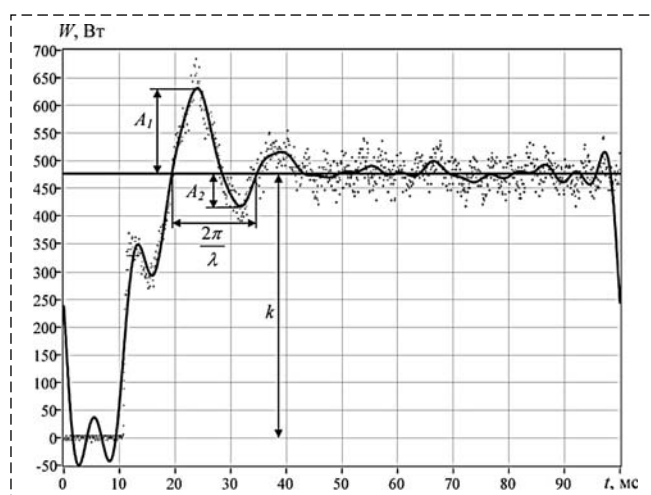


Рис. 9. Переходная характеристика объекта управления с ФНЧ с частотой среза 200 Гц после обратного БПФ

Fig. 9. Control object response with 200 Hz of the low-pass filter after inverse Fast Fourier Transform

На рис. 7 ясно видна спектральная линия помехи от импульсов ионизации на частоте 3345 Гц.

Спектр в диапазоне 0...500 Гц более детально показан на рис. 8.

Для фильтрации исходной переходной характеристики применим фильтр низких частот (ФНЧ) с частотой среза, равной $F_{cp} = 200$ Гц, удаляя частоты, вносящие помехи, и проведем обратное БПФ.

Результат обратного БПФ для переходной характеристики с ФНЧ с $F_{cp} = 200$ Гц показан на рис. 9. Исходная переходная характеристика показана точками.

Моделирование переходной характеристики и определение передаточной функции объекта управления

Для того чтобы построить моделирующую переходную характеристику колебательного звена, необходимо определить четыре параметра: первый и второй максимумы функции (A_1 и A_2 соответственно), период функции $\frac{2\pi}{\lambda}$ и коэффициент передачи объекта k .

По преобразованной переходной характеристике можно вычислить коэффициенты моделирующей переходной характеристики колебательного звена для измеренной мощности излучения W_{meas} [13]:

$$h(t) = k \cdot k_s \left[1 - e^{-\gamma t} \left(\cos \lambda t + \frac{\gamma}{\lambda} \sin \lambda t \right) \right] \cdot 1(t).$$

Для переходной характеристики объекта

$$A_1 = 0,324 \text{ В}, A_2 = 0,124 \text{ В}, \\ \frac{2\pi}{\lambda} = 0,01536, k = 476,62 \text{ Вт/В}.$$

Произведение

$$k \cdot k_s = 1, \quad (1)$$

так как коэффициент передачи объекта k и коэффициент передачи датчика мощности k_s являются обратными величинами $k = \frac{1}{k_s}$ (см. рис. 2). Тогда

$$\lambda = \frac{2\pi}{0,01536} = 409,06 \text{ с}^{-1}, \\ \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{A_1}{A_2} = 125,37,$$

и переходная характеристика моделирующего колебательного звена принимает окончательный вид

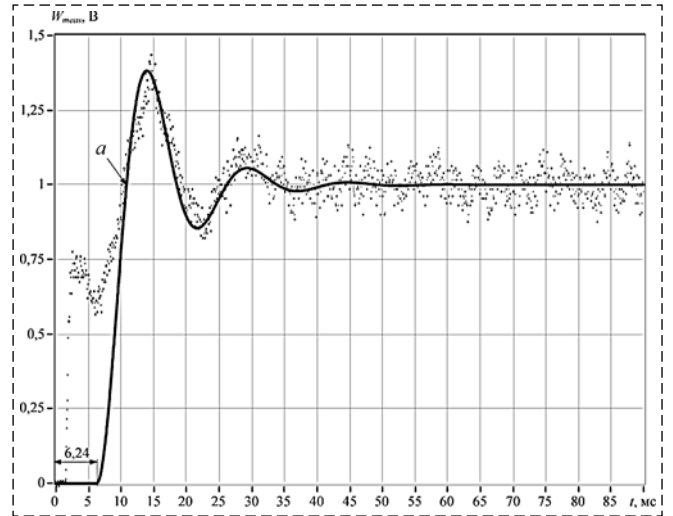


Рис. 10. Переходная характеристика объекта управления и моделирующая ее переходная характеристика колебательного звена

Fig. 10. Transient response of the control object and the transient response of the modeling oscillatory link

$$h(t) = 1 \cdot [1 - e^{-125,37t} (\cos 409,06t + 0,3065 \cdot \sin 409,06t)] \cdot 1(t). \quad (2)$$

Переходная характеристика объекта управления и моделирующая ее переходная характеристика колебательного звена показаны на рис. 10.

Для наилучшего совпадения с исходными данными моделирующая переходная характеристика задержана относительно переходной характеристики объекта. Лучший результат удалось получить при задержке на 6,24 мс. При этом на участке от первого пересечения моделирующей кривой уровня установившегося значения измеренной мощности (1 В, точка a) до конца переходной характеристики квадрат коэффициент корреляции r , который отражает степень линейной зависимости между двумя множествами, составил $r^2 = 0,618$.

Зная коэффициенты моделирующей переходной характеристики (2), можно вычислить параметры передаточной функции объекта управления для измеренной мощности лазерного излучения [13]. Передаточная функция колебательного звена, моделирующая поведение объекта управления, имеет вид

$$W(p) = \frac{k \cdot k_s}{1 + 2\xi T p + T^2 p^2},$$

где $k \cdot k_s = 1$ (1), $\gamma = \xi q$, $\lambda = q\sqrt{1 - \xi^2}$,

тогда $\lambda = \frac{\gamma\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi}$ и $\xi = \frac{\gamma}{\sqrt{\lambda^2 + \gamma^2}}$.

Поскольку $q = \frac{1}{T}$, то получаем $T = \frac{\xi}{\gamma}$.

При $\lambda = 409,06 \text{ с}^{-1}$ и $\gamma = 125,37$ получаем

$$\xi = 0,293, T = 0,00234 \text{ с}, q = 427,84 \text{ с}^{-1}.$$

Передаточная функция модели объекта управления приобретает окончательный вид

$$W(p) = \frac{1}{1 + 1,37 \cdot 10^{-3} p + 5,46 \cdot 10^{-6} p^2}.$$

Полученное колебательное динамическое звено, моделирующее поведение объекта управления, обладает большой колебательно-стью переходного процесса и небольшим запасом устойчивости, что необходимо учитывать для обеспечения необходимой точности и требуемого качества переходного процесса при проектировании регулятора системы управления мощностью лазерного излучения.

Выводы

Исследована автоматическая система управления мощностью излучения лазеров с НТР, на примере лазеров серии "Лантан". Экспериментально получена переходная характеристика лазера с НТР и установлено запаздывание изменения мощности лазерного излучения относительно сигнала управления. Вид переходной характеристики определяется свойствами объекта управления и особенностями подключения источников питания к НТР. Для моделирования объекта управления предложена моделирующая переходная характеристика колебательного звена и, после фильтрации помех, определены ее параметры. На основе параметров моделирующей переходной характеристики вычислена передаточная функция объекта управления, что позволит перейти к проектированию системы управления, обеспечивающей наилучшее качество переходного процесса.

Список литературы

1. Голубев В. С., Лебедев Ф. В. Физические основы технологических лазеров. М.: Высшая школа, 1987. 190 с.

2. Басов Н. Г., Бабаев И. К., Данилычев В. А., Михайлов М. Д., Орлов В. К., Савельев В. В., Сон В. Г., Чебуркин Н. В. Электроионизационный CO₂-лазер замкнутого цикла непрерывного действия // Квантовая электроника. 1979. Т. 6. № 4. С. 772–781.

3. Беляев А. П., Дмитерко Р. А., Епишов В. А., Наумов В. Г., Пашков В. М., Шулаков В. Н. Мощный быстропроточный CO₂-лазер непрерывного действия с накачкой комбинированным разрядом // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 6. С. 325–328.

4. Генералов Н. А., Зимаков В. П., Косынкин В. Д., Райзер Ю. П., Соловьев Н. Г. Быстропроточный технологический CO₂-лазер комбинированного действия // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 8. С. 1549–1557.

5. Hill A. E. Continuous uniform excitation of medium pressure CO₂ laser plasmas by means of controlled avalanche ionization // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 22(12). P. 670–673.

6. Generalov N. A., Gorbulev M. I., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P. High-Power Industrial CO₂ Lasers Excited by a Non-self Sustained Glow Discharge // In W. J. Witteman and V. N. Ochkin (eds.), Gas Lasers – Recent Developments and Future Prospects. Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 323–341.

7. Generalov N. A., Shemyakin A. N., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P. Application of the combined DC and capacitive periodic-pulsed discharge to the excitation of fast-axial-flow gas laser // In Laser Optics 2006: High-Power Gas Lasers. Proc. SPIE. 2007. Vol. 6611. Paper 66110K. 8 p.

8. Оришич А. М., Фомин В. М. Актуальные проблемы физики лазерной резки металлов: Монография. Новосибирск: Изд. Новосиб. гос. ун-та, 2011. 192 с.

9. Востриков А. С., Французова Г. А. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособ. для вузов. М.: Высшая школа, 2004. 365 с.

10. Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г. Особенности управления мощностью излучения технологического CO₂-лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом с учетом деградации рабочей смеси газов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 8. С. 50–54.

11. Генератор импульсов ионизации: пат. 2750851 Рос. Федерация / Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Якимов М. Ю.; заявл. 30.09.20; опубл. 05.07.21. Бюл. № 19.

12. Glebov V. N., Manankov V. M., Malutin A. M., Golovatyuk N. N., Zastavny Y. V. Thermoelectric mirror-detector for laser radiation // Proc. SPIE 2257. 1994. P. 225–227.

13. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.

14. Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г., Якимов М. Ю. Управление мощностью излучения технологического CO₂-лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом путем изменения частоты импульсов ионизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 4. С. 224–231.

15. Цифровые запоминающие осциллографы серии TDS1000 и TDS2000. Руководство пользователя. Tektronix, Inc. 190 с.

16. Математические основы теории автоматического регулирования. Т. 2 / Под ред. Чемоданова Б. К. М.: Высшая школа, 1977. 455 с.

17. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2008. 800 с.

18. Суранов А. Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. М.: ДМК Пресс, 2007. 536 с.

Dynamic Characteristics Determination of the Radiation Power Control System for the Industrial CO₂ Laser Excited by a Nonselv-Sustained Glow Discharge

A. N. Shemyakin¹, shemyakin@lantanlaser.ru, M. Yu. Rachkov², michyur@gmail.com,
N. G. Solovyov¹, solovyov@lantanlaser.ru, M. Yu. Yakimov¹, yakimov@lantanlaser.ru,
M. A. Kotov¹, kotov@ipmnet.ru,

¹ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation

² Moscow State Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation

Abstract

In the article, an automatic system for radiation power control of lasers excited by a nonself-sustained glow discharge is studied using industrial lasers of the Lantan series as an example. They are designed for cutting, welding and surface modification of various materials as part of laser machines. The power of laser radiation is one of the most important parameters of a laser that determines its technological capabilities. The radiation power is controlled by changing the ionization pulses frequency of high voltage pulses with duration of 100 ns, given with a frequency of 1-5 kHz. The step response of the laser is experimentally obtained. Laser radiation is fed to a thermoelectric mirror-detector with thermo-EMF anisotropy, which measures its power. After preliminary amplification, the differential signal from the mirror-detector is recorded by a digital oscilloscope. A delay in the change in the laser radiation power relative to the control signal was established. The delay is 1487 μ s that is explained by the fact that several ionization pulses are required for the initial exciting of the gas volume before the start of radiation generation. The initial section of the step response and damped oscillations are explained by the presence of a protective choke in the main discharge source connection circuit. The choke slows down the rise in current during the short circuit of discharge, allowing circuit breakers to turn off the power supply. To simulate the transient process, the step response of the oscillating circuit is used. The original signal was filtered to remove noise that does not allow determining the parameters of the step response. To determine the spectrum of the step response, fast Fourier transform is carried out, frequencies introducing noise were cut out, and the inverse fast Fourier transform is performed. According to the step response obtained after filtering, the parameters of the modeling step response are determined. Based on the parameters of the step response, the laser transfer function is calculated. It makes possible to proceed to the calculation of the optimal radiation power controller, which ensures the best quality of the transient process.

Keywords: industrial laser, nonself-sustained glow discharge, frequency of the ionization pulses, laser power control system, step response, interference filtering, Fast Fourier transform, transfer function

For citation:

Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Solovyov N. G., Yakimov M. Yu., Kotov M. A. Dynamic Characteristics Determination of the Radiation Power Control System for the Industrial CO₂ Laser Excited by a Nonself-Sustained Glow Discharge, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 4, pp. 199–205.

DOI: 10.17587/mau.24.199-205

References

1. **Golubev V. S., Lebedev F. V.** Physical foundations of industrial lasers, Moscow, Vysshaya shkola, 1987, 190 p. (in Russian).
2. **Basov N. G., Babaev I. K., Danilychev V. A., Mikhailov M. D., Orlov V. K., Savelyev V. V., Son V. G., Cheburkin N. V.** Electroionization CO₂-laser of a closed cycle of continuous action, *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1979, vol. 6, iss. 4, pp. 772–781 (in Russian).
3. **Belyayev A. P., Dmiterko R. A., Epishov V. A., Naumov V. G., Shashkov V. M., Shulakov V. N.** High-power fast-flow cw CO₂ laser excited by a combined discharge, *Technical Physics Letters*, 1979, vol. 5, no. 6, pp. 325–328 (in Russian).
4. **Generalov N. A., Zimakov V. P., Kosynkin V. D., Raiser Yu. P., Solovyov N. G.** Rapid-flow combined-action industrial CO₂ laser, *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. 9, no. 8, pp. 1549–1557 (in Russian).
5. **Hill A. E.** Continuous uniform excitation of medium pressure CO₂ laser plasmas by means of controlled avalanche ionization, *Appl. Phys. Lett.*, 1973, vol. 22(12), pp. 670–673.
6. **Generalov N. A., Gorbulyenko M. I., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P.** High-Power Industrial CO₂ Lasers Excited by a Non-self Sustained Glow Discharge, In *W. J. Witteman and V. N. Ochkin (eds.), Gas Lasers — Recent Developments and Future Prospects*, Kluwer Academic Publishers, 1996, Printed in the Netherlands, pp. 323–341.
7. **Generalov N. A., Shemyakin A. N., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P.** Application of the combined DC and capacitive periodic-pulsed discharge to the excitation of fast-axial-flow gas laser, In *Laser Optics 2006: High-Power Gas Lasers. Proc. SPIE*, 2007, vol. 6611, Paper 66110K, 8 p.
8. **Orishich A. M., Fomin V. M.** Actual problems of the physics of laser cutting of metals, Novosibirsk, Publishing house of Novosib. state university, 2011, 192 p. (in Russian).
9. **Vostrikov A. S., Frantsuzova G. A.** Theory of automatic control: Proc. allowance for universities, Moscow, Vysshaya shkola, 2004, 365 p. (in Russian).
10. **Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Solov'yov N. G.** Features of radiation power control of the industrial CO₂ lasers excited by a nonself-sustained glow discharge with regard to dissociation in a working gas mixture, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 8, p. 50–54 (in Russian).
11. **Ionization pulse generator:** Pat. 2750851 Ros. Federation / Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Yakimov M. Yu., dec. 30.09.20, publ. 05.07.21, Bull. No. 19 (in Russian).
12. **Glebov V. N., Manankov V. M., Malyutin A. M., Golovatyuk N. N., Zastavny Y. V.** Thermoelectric mirror-detector for laser radiation, *Proc. SPIE 2257*, 1994, pp. 225–227.
13. **Besekerskiy V. A., Popov Ye. P.** Theory of automatic control systems, Moscow, Nauka, 1975, 768 p. (in Russian).
14. **Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Yakimov M. Yu.** Upravlenie moshchnost'yu lazernogo izlucheniya tekhnologicheskogo kompleksa s nesamostoyatel'nyim tleyushchim razryadom putem izmemeniya chastoty impulsov ionizatsii, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 224–231.
15. **Digital storage oscilloscopes of the TDS1000 and TDS2000 series,** User's manual, Tektronix Inc, 190 p. (in Russian).
16. **Chemodanova B. K.** ed. Mathematical foundations of the theory of automatic control, vol. 2, Moscow, Vysshaya shkola, 1977, 455 p. (in Russian).
17. **Travis J., Kring J.** LabVIEW for everyone, Moscow, DMK Press, 2008, 800 p. (in Russian).
18. **Suranov A. Ya.** LabVIEW 8.20: Functions Reference book, Moscow, DMK Press, 2007, 536 p. (in Russian).

В. А. Бобков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., e-mail: bobkov@iacp.dvo.ru,

М. А. Морозов, вед. инженер-программист, e-mail: morozov@iacp.dvo.ru,

А. П. Кудряшов, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: alkud1981@mail.ru,

Институт автоматки и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток,

А. В. Инзарцев, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., inzar@marine.febras.ru,

Институт проблем морских технологий дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток

Инспекция корпуса судна с использованием автономного подводного робота, оснащенного стереофотокамерой*

Регулярный визуальный осмотр подводной поверхности корпуса судна в целях проверки его целостности и степени биообрастания необходим для обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации судна. В статье предлагается метод автоматизированного решения этой задачи с использованием автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), оснащенного стереокамерой, управляемой поворотным механизмом. Движение АНПА осуществляется по эквидистантам вдоль корпуса судна с одновременной видеосъемкой поверхности корпуса. Траектория движения АНПА рассчитывается с применением метода визуальной навигации (визуальная одометрия). Расчетные данные о локализации аппарата относительно корпуса судна используются в методе управления движением аппарата для обеспечения устойчивого движения аппарата на заданном расстоянии от inspectируемой поверхности. Непосредственное вычисление данных о локализации АНПА делается с помощью предлагаемого оригинального алгоритма, который реализован в виде программного средства "стереодальномер". Работа стереодальномера основана на сопоставлении особенностей на изображениях с помощью детектора SURF с последующим построением 3D-облака точек. Описана методика выполнения автоматической инспекции судна в целом. Фиксируемые стереоизображения используются также для построения 3D-модели осматриваемой поверхности. Применяемый метод построения глобальной пространственной модели поверхности основывается на объединении 3D-облаков точек, получаемых для локальных видов. Построение 3D-облака точек для отдельного вида выполняется на основе сопоставления 2D-точечных особенностей на изображениях стереопары (детектор SURF/вычисление корреляции) с последующим применением метода триангуляции лучей для получения пространственных координат точек. Наличие 3D-модели дает возможность провести детальный визуальный анализ состояния корпуса судна. Проведено имитационное моделирование функционирования разработанных средств на виртуальных сценах. Полученные в результате тестирования количественные и качественные оценки эффективности показали приемлемость предложенной методики для автоматической инспекции подводной части корпуса судна.

Ключевые слова: визуальная инспекция, подводная поверхность корпуса судна, автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), стереокамера, 3D-модель

Введение

Задача визуального осмотра/инспекции подводной части корпуса судна актуальна для оценки его эксплуатационной безопасности и повышения эффективности дальнейшей эксплуатации судна. Идея применения автоматического необитаемого подводного аппарата/робота (АНПА) для автоматической инспекции корпусов судов возникла как альтернатива применяемой технологии с использованием водолазов, телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) [1] или контактных

мобильных платформ (краулеров), "ползающих" по поверхности корпуса [2, 3]. Следует отметить, что АНПА не может полностью заменить упомянутые средства, поскольку последние в состоянии выполнять детальную контактную дефектоскопию корпуса судна или работать в условиях мутной воды. Однако неоспоримым преимуществом АНПА является его мобильность и отсутствие громоздкого кабельного оборудования, необходимого для обеспечения работы ТНПА и краулеров. АНПА позволяет оперативно получить общую визуальную картину состояния подводной части судна, что во многих случаях является достаточным.

Например, в работе [4] описан специально сконструированный АНПА для автоматической

*Исследование выполнено за счет Гранта Российского научного фонда № 22-11-00032, <https://rscf.ru/project/22-11-00032/>.

инспекции корпусов судов. АНПА оснащен доплеровским лагом скорости и специальным сонаром (Dual Frequency Identification Sonar). Система навигации и управления АНПА позволяет держать аппарат на должном расстоянии от корпуса судна и осуществлять сканирование под нужным углом к поверхности корпуса.

В статье [5] представлены методы инспекции с использованием онлайн-информации от датчиков АНПА для эффективного и безопасного управления им. Рассматриваемый проект "CView" решает проблему инспекции порта. Но алгоритмы, представленные в этой статье, по мнению авторов, можно адаптировать ко многим другим задачам инспекции. Одной из основных целей этого проекта является поиск трещин или поврежденных участков в подводных постройках или наблюдение за критическими участками под водой. Платформой для разработки управляющих алгоритмов является АНПА "SeaCat". Этот подводный аппарат имеет управляющую программу с пользовательским интерфейсом для планирования миссии, систему управления миссией, точную навигационную систему, оптимизированное управление двигателем с автопилотом и датчиками для обнаружения и осмотра препятствий. Для обнаружения препятствий и досмотровых целей используется сканирующий гидролокатор.

В работе [6] предложены алгоритмы акустического и визуального картографирования таких особенностей на корпусе корабля, как линии сварки и биообрастания.

В работе [7] для решения этой инспекционной задачи предлагается применение моновидеокамеры. Особенность предложенного монокулярного алгоритма SLAM (simultaneous localization and mapping) — введение оригинальной меры (saliency) для оценки изображений на базе метода bag-of-words. Алгоритм, по мнению авторов, повышает надежность локализации в условиях плохой текстурированности поверхностей.

Авторы статьи [8] предложили использовать роботизированную платформу с сенсорами (мощный лазерный 3D-сканер и гидролокатор бокового обзора) для сканирования морских сооружений, как выше, так и ниже ватерлинии. Кроме того, были разработаны метод и программная система, использующая алгоритм Ball Pivoting и алгоритм реконструкции Пуассона для реконструкции 3D-моделей поверхности морских сооружений по данным сканирования. Предложенный алгоритм реконструкции

исключает использование GPS, DVL (doppler velocity log) или INS (inertial navigation system). Программно-аппаратная система была успешно протестирована в водах Сингапура в условиях, где скорость течения составляла от 1 до 2 м/с.

В статье [9] описывается разработка автономной системы визуального осмотра в воде и ее применение для обследования корпуса полноразмерного корабля. Разработанная система состоит из аппаратной платформы и программных алгоритмов автономной работы аппарата, включающих алгоритмы навигации и управления работой АНПА вблизи корпуса судна в режиме реального времени. Восприятие окружающей среды разработанной системой основано на изображениях с оптических камер и применении алгоритмов компьютерного зрения и оптимизации для навигации и визуального картирования. В частности, на подводном аппарате установлена стереокамера для оценки мгновенных векторов нормали к поверхности, что обеспечивает высокоточную навигацию и надежное визуальное картографирование не только на плоских участках, но и на умеренно искривленных участках поверхности корпуса.

В работе [10] рассматривается метод визуального картирования для трехмерной реконструкции поверхности корпуса подводного судна с использованием монокулярной камеры в качестве основного картографического датчика. Основная идея предлагаемого подхода заключается в моделировании умеренно искривленной поверхности корпуса в виде комбинации кусочно-плоских панелей и создании глобальной карты путем выравнивания локальных изображений в двумерной системе отсчета. Оценочные 3D-панели, связанные с локальными изображениями, используются для извлечения относительных измерений loop-closure в рамках метода SLAM для точной оценки траектории камеры и результатов 3D-реконструкции.

В статье [11] предлагается метод оценки положения на основе зрения для осмотра подводной части корпуса судна с использованием данных трехмерного облака точек, полученных системой стереозрения.

В работе [12] обсуждается метод обследования состояния поверхностей корпуса судна по подводным изображениям с использованием шести известных моделей сверточной нейронной сети.

В данной статье предлагается решение задачи инспекции корпуса судна с использованием АНПА и оригинального алгоритма управ-

ления движением АНПА. Алгоритм основан на обработке стереоизображений, получаемых видеокамерой, управляемой поворотным механизмом, и применении авторского метода визуальной навигации (ВН). Предлагаемый подход близок к описанному в работах [9, 10]. Отличие состоит в разработке алгоритмической базы, реализующей управление движением АНПА (алгоритм управления, оригинальный SLAM-алгоритм, стереодальномер), и в реализации трехмерной реконструкции поверхности корпуса судна (построение глобальной 3D-модели по стереоизображениям в отличие от использования оценочных 3D-панелей, построенных по моноизображениям).

1. Постановка задачи. Описание подхода

Инспекция подводной части корпуса судна выполняется с помощью АНПА, оснащенного стереовидеокамерой и стандартным навигационным оборудованием, включающим эхолокационную систему (ЭЛС), доплеровский лаг и навигационно-пилотажные датчики. Стереокамера смонтирована на поворотной платформе, что позволяет менять угол ее возвышения и ориентировать камеру под нужным углом к инспектируемой поверхности корпуса при движении АНПА. Миссия инспекции состоит в последовательной фотосъемке поверхности корпуса в процессе движения АНПА вокруг подводной части судна с последующим построением в режиме off-line 3D-модели его подводной части. Наличие 3D-модели дает возможность по завершении миссии оперативно осуществить визуальный анализ состояния корпуса.

Предполагается, что используемый для целей инспекции АНПА обладает развитым движительно-рулевым комплексом, обеспечивающим управление, как минимум, по пяти степеням свободы (три поступательных и два вращательных по курсу и дифференту). Также в расчет принимается тот факт, что ЭЛС может давать сбой при работе АНПА вблизи металлического корпуса судна. По этой причине для определения отстояния вместо данных от ЭЛС используется видеoinформация.

В предлагаемом подходе решаются следующие основные задачи:

а) разработка метода локализации АНПА по отношению к корпусу судна по стереоизображениям с использованием авторского метода

ВН (визуальный SLAM (simultaneous localization and mapping)) [13, 14];

б) разработка алгоритма управления движением АНПА по траектории в контексте выполнения досмотровой миссии;

в) построение 3D-модели подводной части корпуса обследуемого судна;

г) имитационное моделирование инспекционной миссии с использованием разработанных методов/алгоритмов для подтверждения правильности подхода.

Движение АНПА вокруг подводной части корпуса судна осуществляется по траектории, которая является множеством эквидистант по отношению к корпусу судна (рис. 1). Каждая эквидистанта находится на определенной глубине. Такой обход корпуса позволяет провести визуальную инспекцию всей поверхности подводной части корпуса. При движении АНПА по траектории определяется локализация АНПА методом ВН и вычисляется требуемая ориентация камеры по отношению к поверхности подводной части корпуса судна. Ориентация камеры вычисляется с частотой, соответствующей времени однократного изменения угла поворота платформы и учитывающей протяженность судна. С учетом этой информации и измерений датчика глубины алгоритм управления корректирует направление движения АНПА на следующем шаге траектории таким

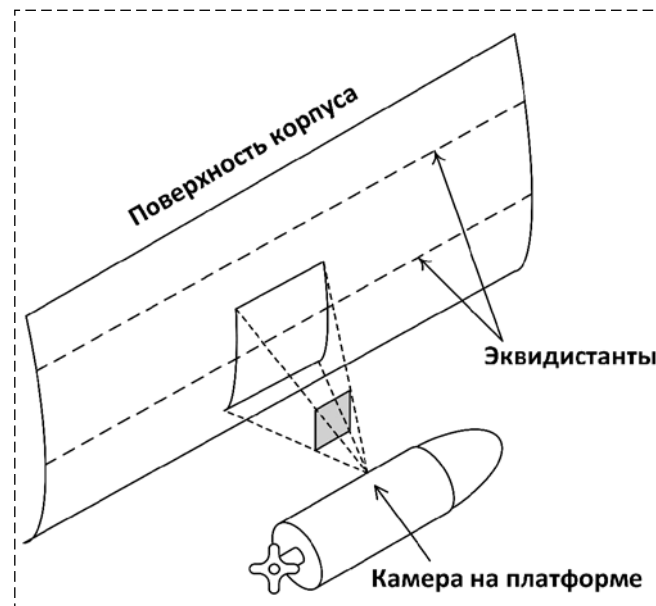


Рис. 1. Сканирование корпуса судна по эквидистантам. Камера установлена на поворотной платформе АНПА

Fig. 1. Scanning of the ship's hull along equidistant lines. The camera is mounted on the AUV turntable

образом, чтобы АНПА двигался на заданном расстоянии от корпуса и на заданной глубине.

Отметим основные моменты предлагаемой методики осмотра корпуса судна:

1. Для визуального покрытия подводной части корпуса выполняется несколько проходов на разных глубинах. Число проходов и глубин вычисляется предварительно с учетом размеров судна. Погружение АНПА осуществляется вблизи борта для более быстрого получения визуального контакта. Под обнаружением борта в рамках метода ВН понимается выявление плотного облака точек после обработки стереоснимков.

2. Движение АНПА в рамках одного прохода осуществляется с постоянной скоростью на заданной глубине и с фиксированным расстоянием до борта. В общем виде управление движением может осуществляться по курсу и дифференту аппарата, в сочетании с лаговыми перемещениями. Однако в данной реализации лаговые перемещения не рассматриваются. Для определения целевого курса АНПА используется метод ВН. В процессе движения выполняется съемка с частотой, определяемой скоростью движения АНПА и полем зрения камеры.

3. Стереокамера направлена на борт судна перпендикулярно движению АНПА и в направлении нормали к корпусу судна в данной точке (рис. 1). Во время одного прохода (обход всего периметра корпуса) на фиксированной глубине положение угла камеры изменяется, как было отмечено выше, с заведомо фиксированной частотой в зависимости от вычисляемой нормали к поверхности корпуса. При смене глубины движения АНПА угол камеры также изменяется.

4. Глубина прохода определяется датчиком глубины. Также относительные перемещения АНПА по глубине могут определяться методом ВН по стереоснимкам.

Моделирование миссии выполнялось средствами разработанного авторами имитационного моделирующего комплекса [15].

2. Метод инспекции корпуса судна на основе обработки стереоизображений

В процессе обработки визуальных данных используются три системы координат (СК) (рис. 2).

Непосредственно с АНПА связана локальная СК^{АНПА}. С камерой, установленной на поворотной платформе, связана СК^{кам}. В качестве ми-

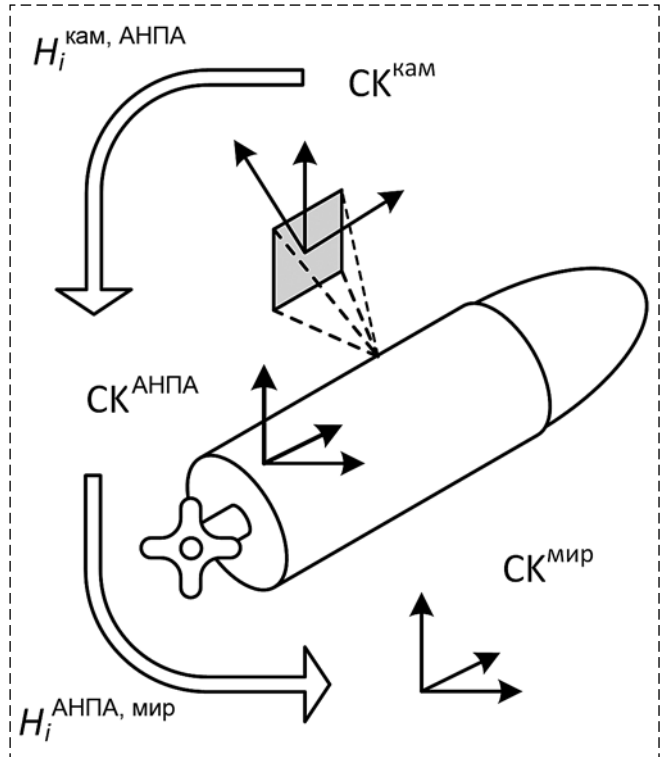


Рис. 2. Используемые системы координат
Fig. 2. Used coordinate systems

ровой СК (СК^{мир}) выбрана СК^{АНПА} в начальный момент времени. Преобразования между СК^{кам} и СК^{АНПА} в позиции i будем обозначать как $H_i^{\text{кам, АНПА}}$, между СК^{АНПА} и СК^{мир} — как $H_i^{\text{АНПА, мир}}$. Траектория АНПА состоит из позиций, в которых осуществляется съемка стереокамерой. С каждой позицией связана стереопара снимков. Позиции, в которых выполняется алгоритмическая обработка видеоданных, будем называть узловыми позициями. Шаг — это расстояние между узловыми позициями, которое можно измерять числом снятых кадров (оно является эквивалентом времени, поскольку известна частота съемки). Результирующие данные локализации АНПА передаются в систему управления по завершении обработки текущего шага. К ним относятся: S — вектор направления движения АНПА в текущий момент времени; n — нормаль к поверхности участка, видимого камерой на данном шаге траектории; R — минимальное расстояние до корпуса; V — скорость приближения к корпусу судна.

2.1. Алгоритм выполнения инспекции

Выполнение миссии по инспекции судна включает следующие шаги:

1. Погружение АНПА на очередной заданный уровень.

2. Поиск борта судна (для начального погружения с поверхности). Для этого осуществляется движение АНПА с постоянной скоростью, а курс выбирается под острым углом к борту. Стереокамера ориентирована перпендикулярно борту с углом возвышения, соответствующим уровню обхода. В процессе движения проводятся замеры дистанции до борта, которые вычисляются по облаку 3D-точек, полученных по стереоизображениям (см. раздел ниже). По достижению заданной дистанции происходит переход к фазе обхода корпуса судна.

3. В начале обхода корпуса запоминается кадр стереокамеры для вычисления точки отсчета галса, привязанной к борту обследуемого судна. Расчет положения АНПА во время обхода выполняется методом ВН. Управление движением заключается в поддержании заданной дистанции до борта по стереодальномеру. Одновременно осуществляется обзорная съемка борта (т. е. накопление кадров стереокамеры) и фиксируется событие замыкания траектории (завершение галса обхода). Здесь возможны два варианта:

- восстановление траектории методом ВН по мере продвижения АНПА и детектирование события замыкания траектории (например, с точностью 1 м);
- начальный кадр галса из предыдущего пункта используется как маркер замыкания при обнаружении совпадения начального и текущего кадров галса. Далее происходит переход к следующему пункту. Совпадение можно определять с применением детектора SURF (Speeded up Robust Features). Критерий совпадения строится на основе сопоставления определенного процента особых точек начального и текущего кадров. При этом кадры, следующие за начальным кадром галса, будут с ним перекрываться, и их необходимо игнорировать.

4. Завершение обследования на заданном уровне. Если список необследованных уровней глубин еще не исчерпан, то происходит переход к пункту 1. Если все глубины обследованы, то миссия завершается, и АНПА всплывает. Далее выполняется обработка полученной информации и строится 3D-модель корпуса судна.

2.2. Вычисление исходных данных для управления движением АНПА

2.2.1. Стереодальномер. Работа стереодальномера основана на поиске и сопоставлении

особенностей на изображениях с помощью детектора SURF. Промежуточным результатом работы стереодальномера является облако трехмерных точек $P(xyz)$ в системе координат камеры (рис. 3, см. вторую сторону обложки).

По этому облаку можно получить оценку расстояния d до препятствия:

$$d = \sum_{i=1}^n |p_i| / n. \quad (1)$$

Касательная линия к борту с углом α вычисляется в системе координат камеры. Для этого облако точек делится на две части — с положительными и отрицательными координатами Y (рис. 4). Для каждой из частей вычисляется средняя точка и через них строится прямая. Камера закреплена так, что ось Y системы координат камеры параллельна осевой линии АНПА.

Вычисление угла возвышения камеры в СК^{АНПА} для текущего положения АНПА выполняется следующим образом. Начальное значение угла возвышения может быть задано константой (например, равной 0), и коррекция должна проводиться только в установившемся режиме обхода, когда аппарат выдерживает заданное расстояние до борта. Коррекция угла выполняется с предварительно заданной частотой. Пусть на текущем шаге средствами стереодальномера получено облако точек в СК^{кам} и вычислена касательная плоскость к этому облаку (рис. 5). Возьмем нормаль \mathbf{n} к касательной плоскости и убедимся, что она ориентирована на наблюдателя (камеру). Затем вычислим \mathbf{n}_{xz} —

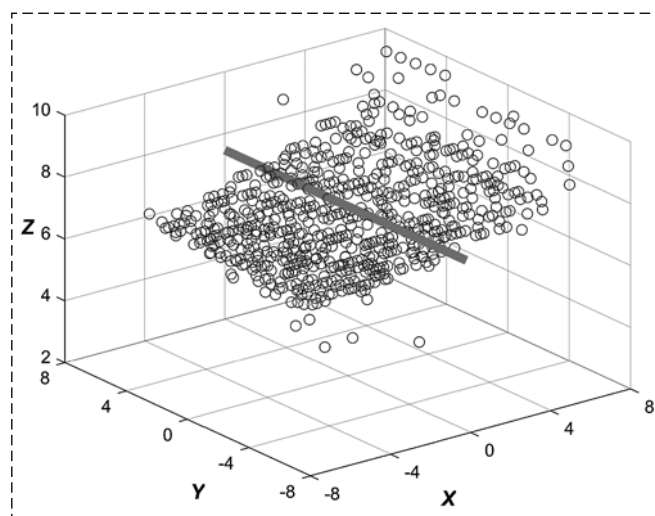


Рис. 4. Облако 3D-точек стереодальномера в системе координат камеры и касательная линия к борту судна

Fig. 4. 3D points cloud of a stereo rangefinder in the camera coordinate system and a tangent line to the ship's side

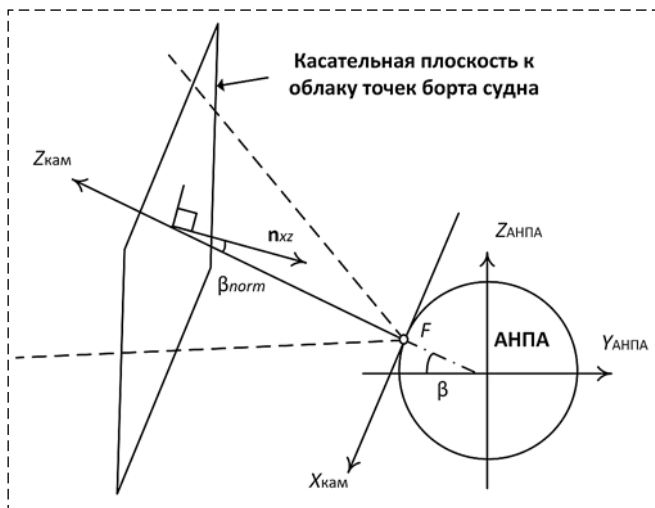


Рис. 5. Вычисление угла возвышения камеры
Fig. 5. Calculating the elevation angle of the camera

проекцию нормали на плоскость YZ в $СК_{кам}$. Угол n_{xz} к оси $Z_{кам}$ обозначим β_{norm} .

Угол возвышения камеры для следующего шага в $СК_{АНПА}$: $\beta_{i+1} = \beta_i - \beta_{norm}$.

2.2.2. Расчет параметров положения АНПА относительно корпуса судна. Используемое преобразование координат пространственных точек $H_i^{кам, АНПА}$ является преобразованием поворота $СК_{АНПА}$ вокруг оси Y (направление продольной оси АНПА). Значение угла поворота передается системой визуальной навигации в систему управления после расчета ориентации камеры. Вектор S относительного перемещения камеры на шаге i определяется в связанной с камерой системой координат $СК_i^{кам}$ как $S = P(0, 0, 0, 1)H_{i-1, i}^{кам}$, где $P(0, 0, 0, 1)$ — точка начала $СК_{i-1}^{кам}$ в позиции $(i-1)$. Соответственно, в $СК_{АНПА}$ этот вектор равен $SH_i^{кам, АНПА}$. В качестве минимального расстояния можно рассматривать вычисленное среднее расстояние (см. (1)) — эксперимент показал, что этого достаточно для надежного управления движением АНПА. Другой вариант: $d_{min} = \min |R_k|$,

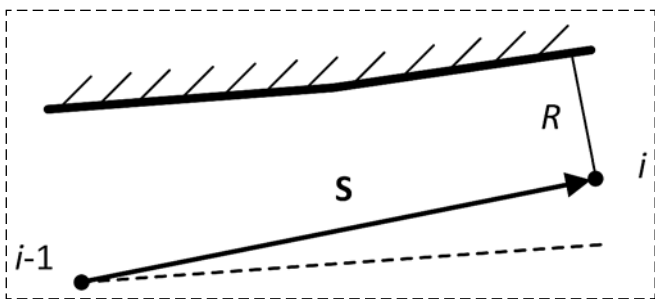


Рис. 6. Вычисление скорости приближения АНПА к корпусу судна
Fig. 6. Calculation of the speed of the AUV approach to the ship's hull

где $\{R_k\}$ — множество точек 3D-облака в позиции i после фильтрации с учетом дисперсии.

Скорость приближения к корпусу судна вычисляется как (рис. 6)

$$V = V_{АНПА}(\mathbf{R} \cdot \mathbf{S}) / (|\mathbf{R}| \cdot |\mathbf{S}|), \quad V_{АНПА} = \mathbf{S} / t = \mathbf{S}f / n,$$

где n — длина шага в кадрах, f — частота съемки.

Тогда $V = f(\mathbf{R} \cdot \mathbf{S}) / n(|\mathbf{R}| \cdot |\mathbf{S}|)$.

Нормаль \mathbf{n} к поверхности вычисляется по нескольким точкам R_k , полученным на этапе построения 3D-облаков (все точки принадлежат поверхности корпуса).

2.3. Управление движением АНПА при обходе судна

При обходе судна аппарат движется с постоянной скоростью на фиксированной глубине. Необходимый для работы нулевой дифферент обеспечивается работой вертикальных подруливающих устройств АНПА. Управление осуществляется путем изменения курса. Целью является удержание аппарата на постоянном расстоянии D от борта обследуемого судна. Расстояние выбирается исходя из оптимальных условий съемки, а также из условий обеспечения безопасности обхода.

Для стабилизации заданного отстояния АНПА от борта судна использовался ПД закон регулирования:

$$\Delta\varphi = \left(K_d \frac{d - D}{D} + K_\alpha \alpha \right) \Delta t, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ — угол коррекции курса; d — текущее измерение расстояния до борта по стереодальномеру; D — целевое расстояние до борта; Δt — период между измерениями; K_d — коэффициент при позиционной составляющей закона управления. Для оценки скорости изменения регулируемого параметра d используется касательная к борту с углом α , которая также вычисляется по облаку точек (см. раздел "Стереодальномер"). В уравнение (2) угол касательной к борту α входит с коэффициентом демпфирования по скорости K_α .

Пример обхода корпуса судна с использованием описанного закона регулирования приведен на рис. 7 (см. вторую сторону обложки).

2.4. Метод визуальной навигации

Определение параметров 6 DOF (degrees of freedom) траектории выполняется в каждой

узловой позиции методом ВН (визуальный SLAM-алгоритм) по двум стереопарам снимков. Обработка изображений выполняется по классической схеме визуальной одометрии:

1. Сопоставление точечных особенностей на четверке изображений двух соседних узловых позиций (применяется детектор SURF).

2. Построение двух множеств 3D-точек (3D-облака) по сопоставленным особенностям.

3. Вычисление локального геометрического преобразования $H_{i-1,i}^{\text{кам}}$ между СК^{кам} двух соседних узловых позиций методом минимизации расхождений между двумя 3D-облаками.

2.5. Построение 3D-модели поверхности корпуса судна

Всю поверхность подводной части корпуса судна целесообразно условно разбить на четыре части (учитывая геометрию судна): две боковые, носовая и кормовая части. Тогда глобальная точечная модель одной части формируется объединением 3D-облаков, получаемых на каждом шаге обработки траектории [13]. Объединение осуществляется в СК^{мир}. Перевод координат точек в СК^{мир} выполняется с помощью $H_i^{\text{АНПА,мир}}$. Заметим, что накопленные ошибки метода ВН на расстоянии длины одной части будет незначительным.

Построение 3D-облака точек для отдельного вида выполняется на основе сопоставления 2D-точечных особенностей на изображениях стереопары с последующим применением метода триангуляции лучей для получения про-

странственных координат точек. Сопоставление особенностей выполняется одним из двух реализованных способов: а) использование уже традиционно применяемого детектора SURF; б) с помощью непосредственного подсчета корреляции двух сравниваемых окрестностей точки. В качестве окрестности берется прямоугольная площадка вокруг точки на каждом снимке стереопары. Если работать с "очищенными" изображениями, то алгоритмическая обработка существенно упрощается. В этом случае применяется так называемый алгоритм расчета карты диспаратности.

Построение полигональной поверхности осуществляется с помощью ранее разработанных авторами программ.

3. Вычислительные эксперименты и обсуждение результатов

Вычислительные эксперименты по оценке эффективности описанного метода проводились на модельных сценах в среде имитационного моделирующего комплекса [15]. Оценивалась устойчивость/надежность алгоритма управления движением АНПА и точность локализации АНПА при движении по траектории обхода.

Точность оптического стереодальномера оценивалась путем сравнения полученного среднего расстояния до борта судна двумя методами. Первый метод — применение стереодальномера. Второй метод — использование буфера глубины видеокарты, заполняемого при рендеринге

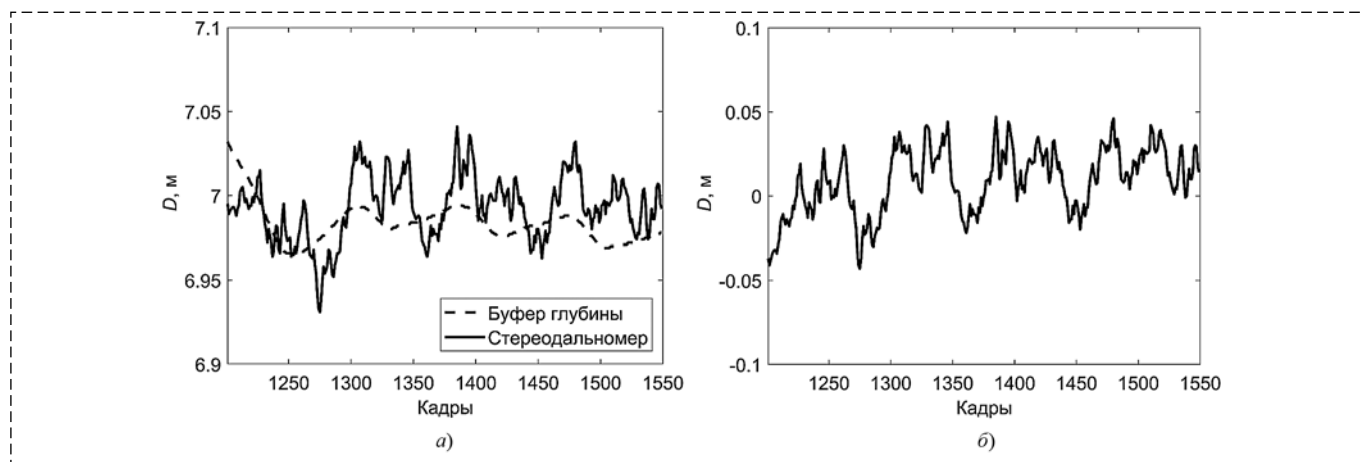


Рис. 8. Оценка эффективности стереодальномера:

а — сравнение среднего расстояния до борта судна, полученного двумя методами (расстояние по буферу глубины и по стереодальномеру); б — распределение ошибки на прямолинейном участке

Fig. 8. Evaluation of the efficiency of the stereo range finder:

а — comparison of the average distance to the ship's side, obtained by two methods (distance by the depth buffer and by the stereo range finder); б — distribution of the error in a straight section

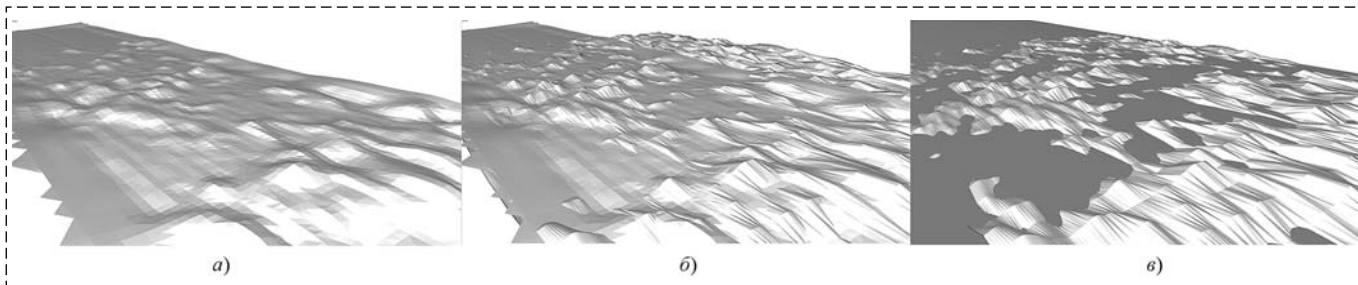


Рис. 9. 3D-реконструкция участка поверхности корпуса судна:

a — результат 3D-реконструкции разработанными программными средствами; *б* — совмещение реконструкции с моделью; *в* — модель. Высота выпуклостей до 10 см

Fig. 9. 3D reconstruction of a section of the ship's hull surface:

a — the result of 3D reconstruction by the developed software; *б* — matching the reconstruction with the model; *в* — model. The height of the bulges is up to 10 cm

сцены — рассматривался в качестве эталонного. В методе со стереодальномером после сопоставления особенностей и геометрических вычислений мы получаем 3D-облако точек, расположенных на наблюдаемой части борта судна (см. рис. 3 на второй стороне обложки). По этому облаку вычисляется среднее расстояние до борта. Поскольку метод неизбежно подвержен ошибкам сопоставления, оценивалась погрешность в вычислении этого расстояния. В методе с буфером глубины получается точное расстояние до каждого пиксела изображения, и тоже вычисляется среднее расстояние.

Для получения надежной статистики при сравнении использовался набор кадров, полученных при полном обходе бортов судна по замкнутой траектории. При обходе судна получено свыше 2500 кадров. На графике (рис. 8) приведены расстояния для прямолинейного участка движения вдоль борта (кадры 1200—1550).

Среднеквадратичная ошибка определения дистанции (в метрах) для всей траектории обхода составила 0,1537 м. Общий характер изменения расстояния объясняется неустойчивостью динамики аппарата в процессе обхода. На графике (рис. 8, *a*) показана разность между оценками расстояния предлагаемым и эталонным методами. На рис. 8, *б* показана ошибка по расчету расстояния до борта более наглядно. Для участка, представленного на рис. 8, среднеквадратичная ошибка составила 0,0215 м.

На рис. 9 показано сравнение выполненной 3D-реконструкции участка поверхности корпуса судна с эталонной поверхностью (моделью) применительно к виртуальной сцене.

Полученные количественные оценки (форма и высота выпуклостей/вогнутостей на поверхности корпуса) подтверждают хорошее совмещение реконструкции с моделью, а по-

казанная на рис. 9 визуализация реконструированной поверхности (рис. 9, *a*) наглядно демонстрирует ее сходство с моделью-эталон (рис. 9, *в*). Для более наглядного сравнения показана визуализация совмещения реконструкции и модели (рис. 9, *б*), где видно хорошее совпадение обеих поверхностей.

Заключение

В работе представлено решение задачи автоматической инспекции подводной части корпуса судна с использованием АНПА и стереокамеры, управляемой поворотным механизмом. Подробно рассмотрена предлагаемая методика управления движением АНПА при выполнении миссии осмотра поверхности корпуса судна. Предложены оригинальные программно-алгоритмические средства обработки стереоизображений, обеспечивающие устойчивое, надежное движение АНПА по эквидистантам относительно инспектируемой поверхности. Для оценки результатов досмотровой миссии предусмотрено построение 3D-модели обследуемой поверхности судна. Проведенное тестирование разработанных средств на модельных сценах показало перспективность их применения при решении практических задач. Дальнейшее развитие работы связано с проведением реальных экспериментов.

Вместе с тем, на следующем этапе развития работы (до проведения реальных экспериментов) планируется проведение цикла моделирования для оптимизации основных решений:

- поиск более эффективного закона управления движением;
- имитация поворота камеры и закон управления этим поворотом;
- автоматическое выполнение полномасштабной съемки корпуса судна сложной формы.

Список литературы

1. **Shahriar Negahdaripour, Pezhman Firoozfam.** An ROV Stereovision System for Ship-Hull Inspection // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2006. Vol. 31, Iss. 3. P. 551–564.
2. **The Magg** miniature magnetic crawler. URL: <https://eddyfi.com/en/product/magg-magnetic-inspection-robotic-crawler>, date of access: 17.06.2022
3. **Utility Crawlers.** Purpose-built underwater robotic equipment. URL: <https://www.deeptrekker.com/products/utility-crawlers>, date of access: 17.06.2022
4. **Vaganay J., Elkins M., Esposito D., O'Halloran W., Hover F., Kokko M.** Ship hull inspection with the HAUV: U.S. Navy and NATO demonstrations results // Proc. IEEE/MTS OCEANS Conf. Exhib., Boston, MA. 2006. P. 1–6.
5. **Jacobi M.** Autonomous inspection of underwater structures // Robotics and Autonomous Systems. 2015. Vol. 67. P. 80–86.
6. **Hover F. S., Eustice R. M., Kim A., Englot B., Johannsson H., Kaess M., Leonard J. J.** Advanced perception, navigation and planning for autonomous in-water ship hull inspection // International Journal of Robotics Research. 2012. Vol. 31, Iss. 12. P. 1445–1464.
7. **Kim A., Eustice R. M.** Eustice. Real-Time Visual SLAM for Autonomous Underwater Hull Inspection using Visual Saliency // IEEE Transactions on Robotics. 2013. Vol. 29, Iss. 3. P. 719–733.
8. **Papadopoulos G., Kurniawati H., Shariff A. S. B. M., Wong L. J., Patrikalakis N. M.** Experiments on Surface Reconstruction for Partially Submerged Marine Structures // Journal of Field Robotics. 2014. Vol. 31, Iss. 2. P. 225–244.
9. **Hong S., Chung D., Kim J., Kim Y., Kim A., Yoon H. K.** In-water visual ship hull inspection using a hover-capable underwater vehicle with stereo vision // Journal of Field Robotics. 2019. Vol. 36, N. 3. P. 531–546.
10. **Hong S., Kim J.** Three-dimensional Visual Mapping of Underwater Ship Hull Surface Using Piecewise-planar SLAM // International Journal of Control, Automation and Systems. 2020. Vol. 18, N. 3. P. 564–574.
11. **Chung D., Kim J.** Pose Estimation Considering an Uncertainty Model of Stereo Vision for In-Water Ship Hull Inspection // IFAC-Papers OnLine. 2018. Vol. 51. P. 400–405.
12. **Kim B. C., Kim H. C., Han S., Park D. K.** Inspection of Underwater Hull Surface Condition Using the Soft Voting Ensemble of the Transfer-Learned Models // Sensors. 2022. Vol. 22. P. 4392.
13. **Bobkov V. A., Kudryashov A. P., Melman S. V., Scherbatyuk A. F.** Visual navigation and 3D reconstruction of underwater objects with autonomous underwater vehicle // Integrated Navigation Systems (ICINS). 2017 24th Saint Petersburg International Conference, 29–31 May 2017. St. Petersburg, Russia. P. 185–192.
14. **Bobkov V., Kudryashov A., Inzartsev A.** Method for the Coordination of Referencing of Autonomous Underwater Vehicles to Man-Made Objects Using Stereo Images // J. Mar. Sci. Eng. 2021. N. 9. P. 1038.
15. **Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A.** Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Washington DC. October 19–22. 2015.

Ship Hull Inspection Using Autonomous an Underwater Vehicle with a Stereo Camera

V. A. Bobkov, bobkov@iacp.dvo.ru, **M. A. Morozov**, morozov@iacp.dvo.ru, **A. P. Kudryashov**, alkud1981@mail.ru, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation,
A. V. Inzartsev, inzar@marine.febras.ru, Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690091, Russian Federation

Corresponding author: **Bobkov V. A.**, Dr. Sc., Chief Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: bobkov@iacp.dvo.ru

Accepted on November 16, 2022

Abstract

Regular visual inspection of the underwater surface of the ship's hull to check its integrity and the degree of biofouling is necessary to ensure the safety and efficient operation of the ship. The article proposes a method for the automated solution of this problem using an autonomous uninhabited underwater vehicle (AUV) equipped with a stereo camera controlled by a tilt actuator. The movement of the AUV is carried out along equidistant lines along the ship's hull with simultaneous video filming of the hull surface. The AUV trajectory is calculated using the visual navigation method (visual odometry). Estimated data on the localization of the AUV relative to the ship's hull are used in the method of controlling the movement of the vehicle to ensure the stable movement of the vehicle at a given distance from the inspected surface. Direct calculation of AUV localization data is done using the proposed original algorithm, which is implemented in the form of a software tool "stereo rangefinder". The operation of the "stereo rangefinder" is based on the matching of features in images using the SURF detector, followed by the construction of a 3D point cloud. The technique for performing automatic inspection of the ship as a whole is described. Fixed stereo images are also used to build a 3D model of the surface being examined. The applied method of constructing a global spatial model of the surface is based on the union of 3D point clouds obtained for local views. The construction of a 3D point cloud for a particular view is based on a matching of 2D point features on images of a stereo pair (SURF detector / correlation calculation), followed by the use of the ray triangulation method to obtain the spatial coordinates of the points. The presence of a 3D model makes it possible to conduct a detailed visual analysis of the state of the ship's hull. Simulation modeling of the functioning of the developed tools on virtual scenes was carried out. Quantitative and qualitative performance evaluations obtained as a result of testing showed the acceptability of the proposed method for automatic inspection of the underwater part of the ship's hull.

Keywords: visual ship hull inspection, autonomous uninhabited underwater vehicle, stereo camera, 3D model

For citation:

Bobkov V. A., Morozov M. A., Kudryashov A. P., Inzartsev A. V. Ship Hull Inspection Using Autonomous an Underwater Vehicle with a Stereo Camera, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 4, pp. 206–215.

DOI: 10.17587/mau.24.206-215

References

1. **Shahriar Negahdaripour, Pezhman Firoozfam.** An ROV Stereovision System for Ship-Hull Inspection, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, vol. 31, iss. 3, pp. 551–564.
2. **The Magg** miniature magnetic crawler, available at: <https://eddyfi.com/en/product/magg-magnetic-inspection-robotic-crawler>, date of access: 17.06.2022
3. **Utility Crawlers.** Purpose-built underwater robotic equipment, available at: <https://www.deeptrekker.com/products/utility-crawlers>, date of access: 17.06.2022.
4. **Vaganay J., Elkins M., Esposito D., O'Halloran W., Hover F., Kokko M.** Ship hull inspection with the HAUV: U.S. Navy and NATO demonstrations results, *Proc. IEEE/MTS OCEANS Conf. Exhib.*, Boston, MA, 2006, pp. 1–6.
5. **Jacobi M.** Autonomous inspection of underwater structures, *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, vol. 67, pp. 80–86.
6. **Hover F. S., Eustice R. M., Kim A., Englot B., Johannsson H., Kaess M., Leonard J. J.** Advanced perception, navigation and planning for autonomous in-water ship hull inspection, *International Journal of Robotics Research*, 2012, vol. 31, iss. 12, pp. 1445–1464.
7. **Kim A., Eustice R. M.** Eustice. Real-Time Visual SLAM for Autonomous Underwater Hull Inspection using Visual Saliency, *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, vol. 29, iss. 3, pp. 719–733.
8. **Papadopoulos G., Kurniawati H., Shariff A. S. B. M., Wong L. J., Patrikalakis N. M.** Experiments on Surface Reconstruction for Partially Submerged Marine Structures, *Journal of Field Robotics*, 2014, vol. 31, iss. 2, pp. 225–244.
9. **Hong S., Chung D., Kim J., Kim Y., Kim A., Yoon H. K.** In-water visual ship hull inspection using a hover-capable underwater vehicle with stereo vision, *Journal of Field Robotics*, 2019, vol. 36, no. 3, pp. 531–546.
10. **Hong S., Kim J.** Three-dimensional Visual Mapping of Underwater Ship Hull Surface Using Piecewise-planar SLAM, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, vol. 18, no.n3, pp. 564–574.
11. **Chung D., Kim J.** Pose Estimation Considering an Uncertainty Model of Stereo Vision for In-Water Ship Hull Inspection, *IFAC-Papers OnLine*, 2018, vol. 51, pp. 400–405.
12. **Kim B. C., Kim H. C., Han S., Park D. K.** Inspection of Underwater Hull Surface Condition Using the Soft Voting Ensemble of the Transfer-Learned, *Sensors*, 2022, vol. 22, pp. 4392.
13. **Bobkov V. A., Kudryashov A. P., Melman S. V., Scherbatyuk A. F.** Visual navigation and 3D reconstruction of underwater objects with autonomous underwater vehicle, *Integrated Navigation Systems (ICINS). 2017 24th Saint Petersburg International Conference*, 29–31 May 2017, St. Petersburg, Russia, pp. 185–192.
14. **Bobkov V., Kudryashov A., Inzartsev A.** Method for the Coordination of Referencing of Autonomous Underwater Vehicles to Man-Made Objects Using Stereo Images, *J. Mar. Sci. Eng.*, 2021, no. 9, pp. 1038.
15. **Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A.** Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior, *Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE*, Washington DC, October 19–22, 2015.



16 июня 2023 г. в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) состоится

IV Международная конференция по нейронным сетям и нейротехнологиям (NeuroNT'2023)

ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Математические основы построения искусственного интеллекта
- Технологии искусственного интеллекта
- Сильный искусственный интеллект
- Гибридный интеллект
- Искусственные нейронные сети
- Нейроморфные вычисления и технологии
- Этика и безопасность применения искусственного интеллекта
- Прикладные системы с искусственным интеллектом
- Аппаратное обеспечение систем искусственного интеллекта

СЕКЦИИ

- Концепции построения гибридного интеллекта
- Технологии искусственного интеллекта и их приложения
- Управление данными и организация вычислений в интеллектуальных системах

Рабочие языки конференции – русский, английский

Контактная информация
E-mail: IRVC.eltech@mail.ru
Тел.: +7 812 346-46-37

Н. Ю. Козлова, аспирант, k.natalia.bmstu@gmail.com,
А. В. Фомичев, канд. техн. наук, доц., a.v.fomichev@bmstu.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Алгоритмизация наведения и управления движением космическим манипуляционным роботом в задачах сервисного обслуживания некооперируемого космического аппарата*

В настоящий момент на орбите находится большое число не функционирующих космических аппаратов, которые закончили свой срок эксплуатации, выработали топливо или же вышли из строя по причине поломки. В связи с этим становится целесообразной концепция обслуживания космоса и разработка сервисных спутников для продления срока эксплуатации существующих космических аппаратов. Сервисные спутники смогут выполнять самые разные задачи: от инспекции неисправностей обслуживаемого космического аппарата до выполнения ремонтных работ и дозаправки целевого аппарата топливом. В данной статье предложены стратегия и алгоритмы наведения и управления движением космического манипуляционного робота (КМР) на этапе сближения с некооперируемым космическим объектом (НКО) для решения задач сервисного обслуживания. Целью работы являются разработка алгоритмов наведения и управления поступательным и вращательным движениями КМР для его сближения с НКО на заданное расстояние. Система управления КМР представляется в виде иерархической двухуровневой системы "наведение—стабилизация". На уровне наведения формируется кватернион перехода связанной системы координат в требуемое положение, а также формируется управление тяговыми двигателями, обеспечивающее поступательное движение КМР с требуемой скоростью. На уровне стабилизации формируется управление двигателями ориентации, необходимое для совмещения связанной системы координат КМР с направлением на НКО. В статье предложены схема и математическая модель двигательной установки, углового и поступательного движений КМР. В среде MATLAB/Simulink осуществлено моделирование разработанных алгоритмов наведения и управления движением КМР. Результаты моделирования подтвердили работоспособность алгоритмов сближения КМР с НКО.

Ключевые слова: иерархическая система управления, сервисный спутник, некооперируемый космический аппарат, космический манипуляционный робот, сближение с пассивным спутником

Введение

Разработка космических манипуляционных роботов (КМР) является одним из наиболее перспективных направлений развития космической робототехники [1, 2]. Развитие концепции обслуживаемого космоса позволит значительно продлить сроки эксплуатации работающих на орбите спутников, а также собирать на орбите космические аппараты, станции и ферменные конструкции по размеру в десятки раз большие, нежели существующие сейчас.

К задачам сервисного обслуживания космических аппаратов (КА) на орбите можно отнести замену вышедших из строя блоков, сборку на орбите, выполнение ремонтных работ, доза-

правку обслуживаемого КА, коррекцию орбиты спутника-клиента или вывод его на орбиту захоронения [3].

Данная работа посвящена разработке стратегии управления на этапе дальнего наведения КМР на целевой КА.

Особенности, проблемы и постановка задачи управления и наведения свободнолетающего космического манипуляционного робота

В настоящей статье рассматривается задача сближения КМР с некооперируемым космическим объектом (НКО) на этапе дальнего наведения. Некооперируемым будем считать объект, с которым не может быть установлена радиосвязь.

КМР является свободнолетающим КА и состоит из базового аппарата с установленным на нем одним или несколькими манипулято-

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90261.

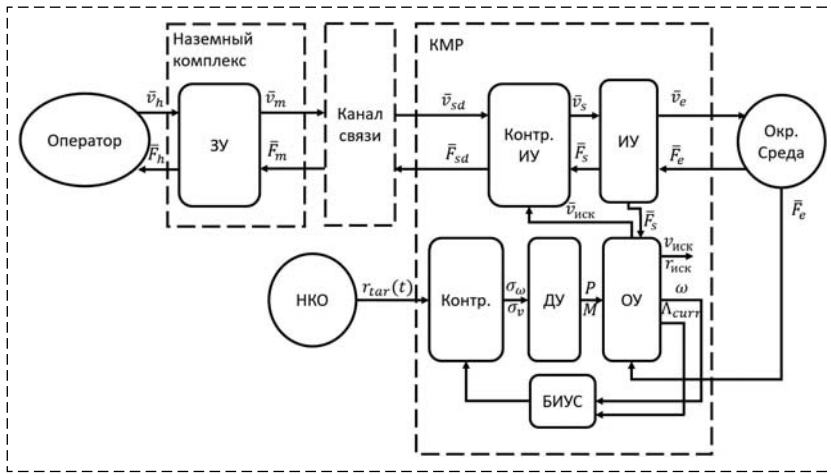


Рис. 1. Функциональная схема системы управления КМР
 Fig. 1. Functional scheme of space manipulation robot control system

рами. КМР должен обеспечивать возможность обслуживания как кооперируемого КА, так и некооперируемого.

На рис. 1 представлена функциональная схема системы наведения и управления поступательным и вращательным движением КМР.

Здесь ЗУ — задающее устройство, ИУ — исполнительное устройство (манипулятор), Контр. ИУ — контроллер исполнительного устройства, ОУ — объект управления (база КМР), ДУ — двигательная установка, Контр. — контроллер, БИУС — блок измерения угловых скоростей, Оператор — человек, управляющий ЗУ, Окр. среда — удаленная среда, с которой взаимодействует ИУ, НКО — некооперируемый космический объект.

Основными этапами любой миссии орбитального обслуживания являются этапы дальнего наведения, ближней навигации, стабилизации КМР, захвата и стабилизации связки КМР и обслуживаемого спутника, выполнения сервисных работ, отделения КМР от НКО или их дальнейшее совместное движение [4].

В работе [5] приведен достаточно полный обзор разработанных методов и технологий, применяемых на каждом этапе сервисного обслуживания.

В настоящей статье рассматривается этап сближения КМР с НКО.

В работе [6] предложена стратегия наведения и управления КМР при завершении его сближения с вращающимся пассивным космическим объектом в дальнем космосе. В статье [7] рассматривается задача управления относительным движением при сближении с вращающимся космическим мусором.

В статье [8] разработана стратегия автономного сближения и захвата пассивного КА.

В источнике [9] используется метод сближения *Fly-by*, а также разработан метод оптимизации траектории сближения на основе численных методов. В статье [10] рассматривается алгоритм управления свободнолетающим КМР для безопасного сближения с целевым спутником с одновременным развертыванием манипулятора.

Для решения задачи относительной навигации в статье [11] применен нелинейный метод оптимального управления. В работе [12] для управления на этапах наведения и

сближения используется линейно-квадратичный регулятор (*LQR*). В статье [13] представлен метод онлайн генерации безопасных и оптимальных по расходу топлива траекторий сближения с пассивным космическим объектом. В работе [14] для нахождения оптимальной траектории сближения КМР с пассивной вращающейся целью применяется принцип минимума Понтрягина.

В данной работе система управления КМР представлена в виде иерархической двухуровневой системы "наведение—стабилизация" [15].

Для решения задачи сближения используются жестко связанная с КМР система координат (ССК), а также инерциальная система координат (ИСК), неподвижная относительно центра Земли и зафиксированная в момент включения режима. В начальный момент времени запуска режима сближения ССК совмещена с ИСК и неподвижна в ИСК.

Систему управления КМР предлагается рассматривать как иерархическую систему, состоящую из уровня наведения и уровня стабилизации (рис. 2).

Пусть Λ_0 — кватернион текущего положения связанной системы координат КМР в ИСК, Λ^{tar} — требуемое положение ССК в ИСК, тогда $\Lambda^{tar} = \Lambda_0 \circ \Lambda$, откуда $\Lambda = \Lambda_0^{-1} \circ \Lambda^{tar}$ — кватернион перехода ССК к требуемому положению ССК, наведенной на обслуживаемый спутник.

Для осуществления ориентации на уровне стабилизации используется двигательная установка (ДУ), реализуемая восемью электрореактивными двигателями ориентации. Для реализации поступательного движения используется тяговый двигатель и четыре двигателя

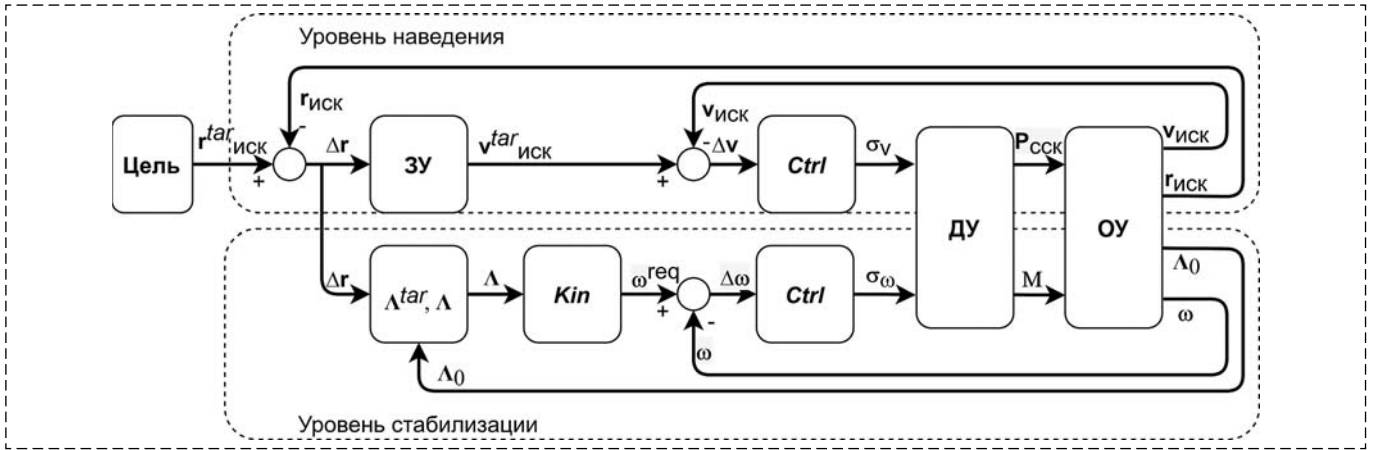


Рис. 2. Функциональная схема иерархической системы управления КМР
 Fig. 2. Functional scheme of hierarchical control system of space manipulation robot

торможения. Схема ДУ представлена на рис. 3, где P_1, \dots, P_8 — двигатели ориентации, P'_1, \dots, P'_4 — тормозные двигатели, P'_5 — маршевый двигатель. Стрелками на схеме показаны направления тяг двигателей.

Центр масс КА находится на расстоянии +500 мм вдоль оси X от точки $O_{ССК}$ связанной системы координат.

На уровне наведения необходимо сформировать кватернион перехода Λ от текущего положения ССК в ИСК к требуемому положению, а также такое управление тяговыми двигателями, которое обеспечит поступательное движение КМР с требуемой скоростью. Требу-

емым положением ССК является совмещение оси $X_{ССК}$ с направлением на целевой спутник.

На уровне стабилизации необходимо сформировать алгоритм управления двигателями ориентации, обеспечивающий наведение КМР на НКО, т. е. кватернион перехода между текущим положением ССК и требуемым должен стремиться к 1 ($\Lambda \rightarrow 1$).

Математическая модель движения

Пусть $\mathbf{r}^{tar} = [r_x^{tar}, r_y^{tar}, r_z^{tar}]$ — координаты целевого спутника в ИСК, $\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z]$ — координаты КМР в ИСК, $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}^{tar} - \mathbf{r} = [dr_x, dr_y, dr_z]$.

Угловое движение описывается уравнением вращения и уравнением кинематики:

$$\begin{cases} 2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \omega; \\ \dot{\omega} = \mathbf{J}^{-1}(-\omega \times \mathbf{J}\omega + \mathbf{M}). \end{cases}$$

Здесь $\mathbf{J} = \text{diag}\{J_x, J_y, J_z\}$ — тензор инерции КМР; $\mathbf{M} = [M_x, M_y, M_z]$ — суммарные управляющие моменты двигателей ориентации.

Кватернион перехода ССК к требуемому положению определяется соотношением $\Lambda = \Lambda_0^{-1} \circ \Lambda^{tar}$.

С использованием координат НКО в ИСК можно вычислить матрицу поворота, характеризующую требуемый поворот для совмещения оси $X_{ССК}$ с направлением на обслуживаемый спутник. Заметим, что так как задача состоит в наведении оси $X_{ССК}$ на НКО, точно определенного углового

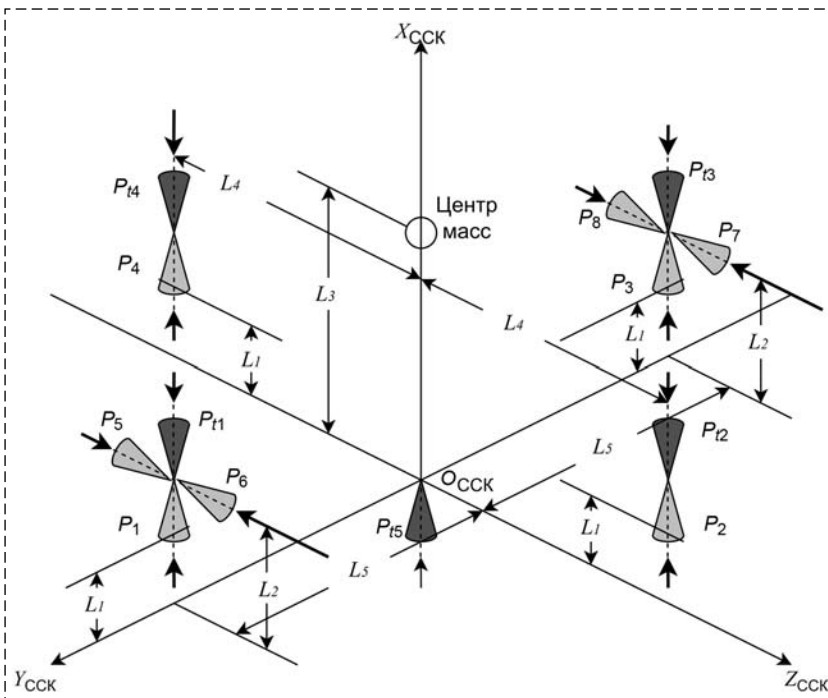


Рис. 3. Схема двигательной установки
 Fig. 3. Thrust engine system scheme

положения КМР вокруг оси $X_{ССК}$ не требуется, а значит, достаточно двух поворотов. Например, можно осуществить наведение оси $X_{ССК}$ на НКО путем последовательных элементарных поворотов ССК вокруг оси $X_{ССК}$ и $Z'_{ССК}$ на углы Эйлера $-\beta$ и $-\gamma$ соответственно (рис. 4).

Результующую матрицу направляющих косинусов, которая определяет положение ИСК относительно ССК, наведенной на НКО, можно найти путем перемножения матриц с отрицательными углами Эйлера в последовательности выполнения поворотов:

$$\mathbf{A}_{ИСК \rightarrow ССК} = R_x(\beta)R_z(\gamma).$$

Матрица направляющих косинусов, определяющая требуемое положение ССК относительно ИСК, равна

$$\mathbf{A}_{ССК \rightarrow ИСК} = \mathbf{A}_{ИСК \rightarrow ССК}^{-1} = R_z(-\gamma)R_x(-\beta),$$

откуда получаем

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{ССК \rightarrow ИСК} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \cos \beta & \sin \gamma \sin \beta \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

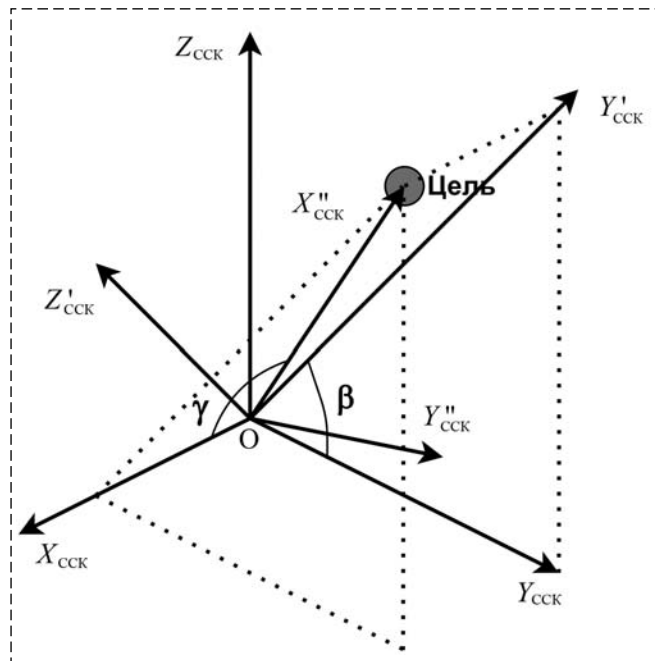


Рис. 4. Наведение ССК КМР на НКО

Fig. 4. Aiming the associated coordinate system of the space manipulation robot to the non-cooperative spacecraft

На рис. 4 видно, что

$$\cos \gamma = \frac{dr_x}{\sqrt{dr_x^2 + dr_y^2 + dr_z^2}};$$

$$\sin \gamma = \frac{\sqrt{dr_y^2 + dr_z^2}}{\sqrt{dr_x^2 + dr_y^2 + dr_z^2}};$$

$$\cos \beta = \frac{dr_y}{\sqrt{dr_y^2 + dr_z^2}};$$

$$\sin \beta = \frac{dr_z}{\sqrt{dr_y^2 + dr_z^2}}.$$

Матрица поворота $\mathbf{A}_{ССК \rightarrow ИСК}$ по известным соотношениям пересчитывается в кватернион $\mathbf{\Lambda}^{tar}$ конечного положения связанной системы координат:

$$\mathbf{\Lambda}^{tar} = [\lambda_0, \boldsymbol{\lambda}]; \lambda_0 = \frac{\sqrt{1 + a_{11} + a_{22} + a_{33}}}{2};$$

$$\lambda_1 = \frac{a_{23} - a_{32}}{4\lambda_0}; \lambda_2 = \frac{a_{31} - a_{13}}{4\lambda_0}; \lambda_3 = \frac{a_{12} - a_{21}}{4\lambda_0}.$$

Траекторию сближения КМР с НКО можно разделить на несколько участков:

1) сближение до расстояния $\Delta r = \zeta_1$ с постоянной скоростью $v = 2v_{tar}$, где v_{tar} — скорость НКО. Управление реализуется двигательной установкой, включающей в себя тяговый двигатель и четыре тормозных двигателя;

2) стабилизация на расстоянии $\Delta r = \zeta_1$ от НКО и продолжение движения со скоростью, равной скорости НКО, $v = v_{tar}$;

3) движение с постоянной скоростью $v = v_{tar}$ на расстоянии $\Delta r = \zeta_1$ от НКО.

Дальнейшее сближение и захват НКО с помощью манипуляторов в данной работе не рассматриваются.

На уровне наведения требуется сформировать вектор тяги, необходимый для поддержания требуемой скорости КМР v при сближении на заданное расстояние с НКО.

Пусть КМР имеет массу m , а в результате работы двигательной установки в ССК формируется вектор тяги \mathbf{P}_{dv} . Вектор скорости КМР в ИСК получим путем поворота вектора скорости в ССК $\mathbf{u} = \int \frac{\mathbf{P}_{dv}}{m} dt$ на кватернион текущего положения ССК в ИСК, т. е. $\mathbf{v} = \mathbf{\Lambda}_0 \circ \mathbf{u} \circ \tilde{\mathbf{\Lambda}}_0$.

Таким образом, поступательное движение КМР определяется следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v}; \\ \dot{\mathbf{v}} = \Lambda_0 \circ \frac{\mathbf{P}_{dv}}{m} \circ \tilde{\Lambda}_0 - \frac{\mu \mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^3}. \end{cases}$$

Здесь μ — гравитационный параметр; \mathbf{R} — вектор расстояния от центра Земли до КМР; $\frac{\mathbf{P}_{dv}}{m} = \mathbf{a}_e$ — вектор управляющего ускорения КМР относительно ССК.

Управление на уровнях наведения и стабилизации

На уровне стабилизации необходимо сформировать устойчивое управление, задающее угловую скорость КМР ω , требуемую для совмещения связанной системы координат с направлением на НКО. На уровне наведения необходимо сформировать управление тяговыми двигателями, которое обеспечит поступательное движение КМР с требуемой скоростью.

Управление поступательным движением КМР при сближении с НКО осуществляется по скорости и реализуется релейным законом управления с гистерезисом (рис. 5). Здесь P_1 — номинальная тяга маршевого двигателя; $-P_2$ — суммарная номинальная тяга тормозных двигателей.

Управление двигателями ориентации также осуществляется по релейному закону с гистерезисом.

Пусть $P_i^t = \{0, 1\}$, $i = 1, \dots, 5$, — признаки включения тяговых двигателей, $P_j = \{0, 1\}$, $j = 1, \dots, 8$, — признаки включения двигателей ориентации, где 1 соответствует включению двигателя, 0 — выключению.

Сформулируем закон управления включением тяговых двигателей:

$$\begin{cases} P_5^t = 1, \text{ если } \sigma_v \geq \rho_2, \\ P_5^t = 0, \text{ если } \sigma_v \leq \rho_1, \\ P_5^t = P_5^{t \text{ пред}}, \text{ иначе;} \\ P_k^t = 1, k = 1, \dots, 4, \text{ если } \sigma_v < -\rho_2, \\ P_k^t = 0, k = 1, \dots, 4, \text{ если } \sigma_v < -\rho_1, \\ P_k^t = P_k^{t \text{ пред}}, k = 1, \dots, 4, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Здесь ρ_1 , ρ_2 — заданные пороги срабатывания двигателей.

Управляющее воздействие σ_v определяется следующими соотношениями:

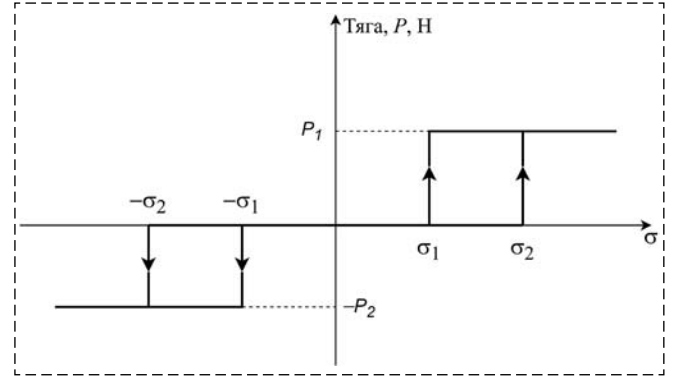


Рис. 5. Релейный закон управления двигателями
Fig. 5. Relay engine control law

$$\begin{aligned} \sigma_v &= K_p^v (v_{req} - v) + K_d^v (v_{req} - v)', \\ v_{req} &= \begin{cases} 2v_{tar}, & \text{если } r > \zeta_1, \\ 0,5v_{tar}, & \text{если } r > \zeta_2, \\ v_{tar}, & \text{иначе,} \end{cases} \end{aligned}$$

ζ_1 , ζ_2 — заданные пороговые расстояния между КМР и НКО, $v_{tar} = |\dot{\mathbf{r}}^{tar}|$.

Релейный закон управления включением двигателей ориентации имеет вид

$$\begin{cases} P_{6,8} = 1, \text{ если } \sigma_{\omega x} \geq \xi_{2x}, \\ P_{6,8} = 0, \text{ если } \sigma_{\omega x} < \xi_{1x}, \\ P_{6,8} = P_{6,8}^{пред}, \text{ иначе;} \\ P_4 = 1, \text{ если } \sigma_{\omega y} \geq \xi_{2y}, \\ P_4 = 0, \text{ если } \sigma_{\omega y} < \xi_{1y}, \\ P_4 = P_4^{пред}, \text{ иначе;} \\ P_1 = 1, \text{ если } \sigma_{\omega z} \geq \xi_{2z}, \\ P_1 = 0, \text{ если } \sigma_{\omega z} < \xi_{1z}, \\ P_1 = P_1^{пред}, \text{ иначе;} \end{cases} \begin{cases} P_{5,7} = 1, \text{ если } \sigma_{\omega x} \leq -\xi_{2x}, \\ P_{5,7} = 0, \text{ если } \sigma_{\omega x} > -\xi_{1x}, \\ P_{5,7} = P_{5,7}^{пред}, \text{ иначе;} \\ P_2 = 1, \text{ если } \sigma_{\omega y} \leq -\xi_{2y}, \\ P_2 = 0, \text{ если } \sigma_{\omega y} > -\xi_{1y}, \\ P_2 = P_2^{пред}, \text{ иначе;} \\ P_3 = 1, \text{ если } \sigma_{\omega z} \leq -\xi_{2z}, \\ P_3 = 0, \text{ если } \sigma_{\omega z} > -\xi_{1z}, \\ P_3 = P_3^{пред}, \text{ иначе;} \end{cases}$$

где $\sigma_\omega = [\sigma_{\omega x}, \sigma_{\omega y}, \sigma_{\omega z}]$ — управляющее воздействие; ξ_1 , ξ_2 — заданные пороги срабатывания. Управляющее воздействие на уровне стабилизации имеет вид

$$\sigma_\omega = K_p^\omega (\Delta\omega) + K_d^\omega \Delta\dot{\omega}.$$

Требуемые управляющие моменты $\mathbf{M}(\mathbf{P}(\sigma_\omega))$ двигателей ориентации и тяги $\mathbf{P}_{dv}(\mathbf{P}(\sigma_v))$ тяговых двигателей формируются в зависимости от текущего вектора признаков включения двигателей.

Математическая модель двигательной установки учитывает задержку на переключение двигателей и время нарастания и спада.

Задержка на переключение двигателей вычисляется по формуле

$$C_{dv}(i) = \begin{cases} P_{ildv}(i) = P_{dv_nom}(i)P(i), \\ C_{dv}(i) = 0, \\ \text{если } C_{dv}(i) \geq \frac{Tl_{dv}}{T_0}, \\ C_{dv}(i) = C_{dv}(i) + 1, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Здесь $P_{dv_nom}(i)$ — расчетная тяга i -го двигателя в установившемся режиме (Н); $P(i)$ — признак включения i -го двигателя, рассчитанный в соответствии с принятым релейным законом управления; $P_{ildv}(i)$ — расчетная тяга i -го двигателя с учетом задержки на переключение двигателя (Н); $C_{dv}(i)$ — счетчик тактов задержки на переключение i -го двигателя; Tl_{dv} — время задержки на переключение i -го двигателя (с); T_0 — такт вызова математической модели двигательной установки.

Учет времени нарастания/спада тяги:

$$P_{tdv}(i) = \begin{cases} P_{tdv}(i) + \frac{T_0}{T2up_{dv}}(P_{ildv}(i) - P_{tdv}(i)), \\ \text{если } P_{ildv}(i) \neq 0 \text{ и } T2up_{dv} \geq T_0; \\ P_{tdv}(i) + \frac{T_0}{T2dn_{dv}}(P_{ildv}(i) - P_{tdv}(i)), \\ \text{если } P_{ildv}(i) = 0 \text{ и } T2up_{dv} \geq T_0; \\ P_{ildv}(i), \text{ иначе,} \end{cases}$$

где $P_{tdv}(i)$ — расчетная тяга i -го двигателя с учетом времени нарастания (спада) тяги (Н); $T2up_{dv}(i)$ — постоянная времени нарастания тяги i -го двигателя (с); $T2dn_{dv}(i)$ — постоянная времени спада тяги i -го двигателя (с).

Суммарный вектор тяги двигательной установки вычислим по следующей формуле:

$$\mathbf{P}_{dv} = \sum_i P_{tdv}(i) \mathbf{R}_{dv}(i).$$

Здесь $\mathbf{R}_{dv}(i)^T = [R_{dv_x}(i); R_{dv_y}(i); R_{dv_z}(i)]$ — заданный единичный вектор номинального направления тяги i -го двигателя.

Суммарный управляющий момент двигательной установки:

$$\mathbf{M}_{dv} = \sum_i (\mathbf{L}_{dv}(i) - \mathbf{D}_{cm}) \mathbf{P}_{dv}(i),$$

где $\mathbf{L}_{dv}(i)^T = [L_{dv_x}(i); L_{dv_y}(i); L_{dv_z}(i)]$ — заданный радиус-вектор номинальной точки приложения тяги i -го двигателя, $\mathbf{D}_{cm}^T = [D_{cm_x}; D_{cm_y}; D_{cm_z}]$ — заданный радиус-вектор центра масс КМР в связанной системе координат.

Результаты моделирования

Моделирование осуществлялось в среде *MATLAB/Simulink* для КМР массой $m = 1000$ кг и тензором инерции $\mathbf{J} = \text{diag}\{600, 600, 600\}$ кг·м³. Каждый из восьми электрореактивных двигателей ориентации имеет номинальную тягу $P_i = 0,5$ Н, $i = 1, \dots, 8$, маршевый двигатель — тягу $P_5^t = 50$ Н, каждый тормозной двигатель тягу — $P_k^t = 10$ Н, $k = 1, \dots, 4$. Направления и плечи тяг двигателей ориентации показаны на рис. 3. Постоянные времени нарастания тяги каждого двигателя $T2up_{dv}(i) = 0,3$ с, времени спада — $T2dn_{dv}(i) = 0,7$ с, такт вызова математической модели двигательной установки $T_0 = 0,1$ с.

НКО движется поступательно с постоянным вектором скорости \mathbf{v}_{tar} и в начальный момент времени находится в положении \mathbf{r}_{tar} относительно начала координат ИСК. Расстояние до КМР составляет Δr :

$$\mathbf{v}_{tar} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,008 \\ 0,006 \end{bmatrix} [\text{м/с}], \quad \mathbf{r}_{tar} = \begin{bmatrix} 500 \\ -100 \\ 0 \end{bmatrix} [\text{м}],$$

$$\Delta r = 510 [\text{м}].$$

Приняты следующие пороговые значения управляющих параметров:

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \cdot 10^{-3} \\ 5 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix};$$

$$\xi_i = \begin{bmatrix} \xi_{1i} \\ \xi_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \cdot 10^{-2} \\ 3 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}, \quad i = x, y, z;$$

$$\zeta = \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50 \\ 10 \end{bmatrix} [\text{м}].$$

На рис. 6 представлена траектория движения КМР при сближении с НКО. На рис. 7 представлен график изменения координат КМР и НКО в ИСК.

В начальный момент времени ССК КМР совмещена с ИСК и неподвижна в ИСК. На первом участке траектории при сближении до расстояния $\rho = \zeta_1 = 50$ м (точка r_1 на рис. 6) КМР движется поступательно с постоянной скоростью $v = 2v_{tar} = 2 \cdot |\dot{\mathbf{r}}_{tar}| = 0,02$ м/с.

На втором участке траектории при движении на расстоянии $r = \zeta_1 = 50$ м от НКО КМР имеет поступательную скорость, равную скорости НКО $v = v_{tar} = |\dot{\mathbf{r}}_{tar}| = 0,01$ м/с.

После совмещения направления вектора скорости КМР с направлением движения НКО

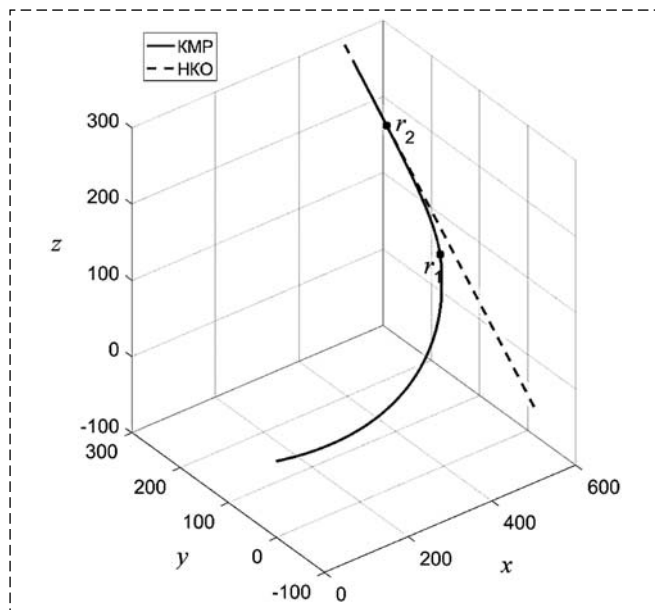


Рис. 6. Траектория движения КМР при сближении с НКО
 Fig. 6. Space manipulation robot trajectory in rendezvous with a non-cooperative space object

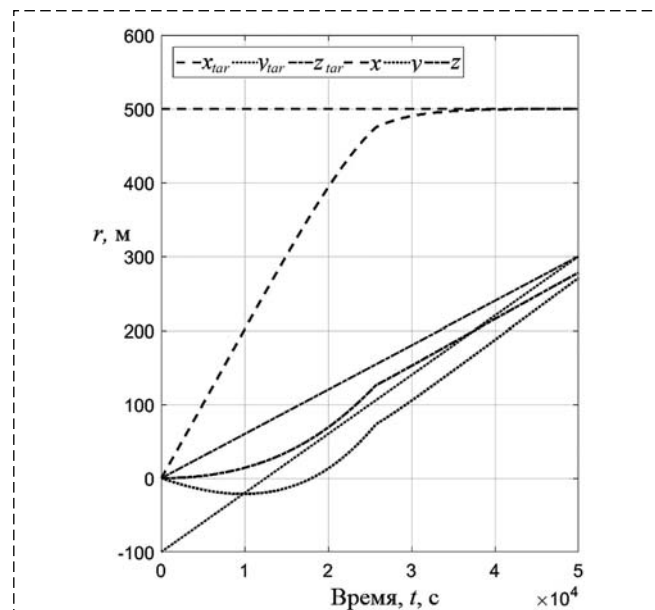


Рис. 7. Перемещение КМР и НКО
 Fig. 7. Coordinates of space manipulation robot and non-cooperative space object

и стабилизации КМР продолжает движение на постоянном расстоянии от НКО (точка r_2 на рис. 6).

Требуемые и реальные изменения угловых скоростей КМР на уровне стабилизации показаны на рис. 8.

На рис. 9 видно, что кватернион перехода от текущего положения ССК КМР к требуемому положению стремится к 1, а значит, можно сделать вывод, что управление угловым движением КМР осуществляется верно.

Результаты моделирования показали работоспособность предложенных алгоритмов сближения КМР с НКО.

Заключение

В данной работе рассмотрена система управления КМР на этапе сближения с НКО. Система управления представлена в виде двухуровневой системы "наведение—стабилизация", разработаны стратегия и алгоритмы управления на каждом уровне, представлена математическая модель двигательной установки. Работоспособность предложен-

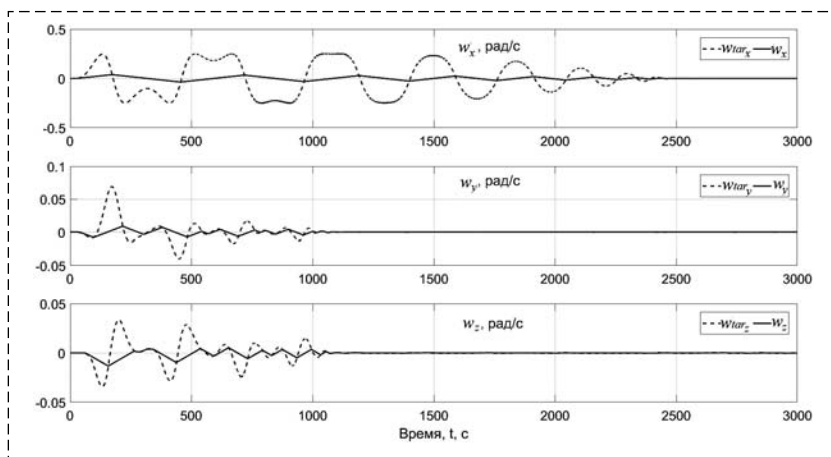


Рис. 8. Угловые скорости КМР
 Fig. 8. Space manipulation robot angle velocities

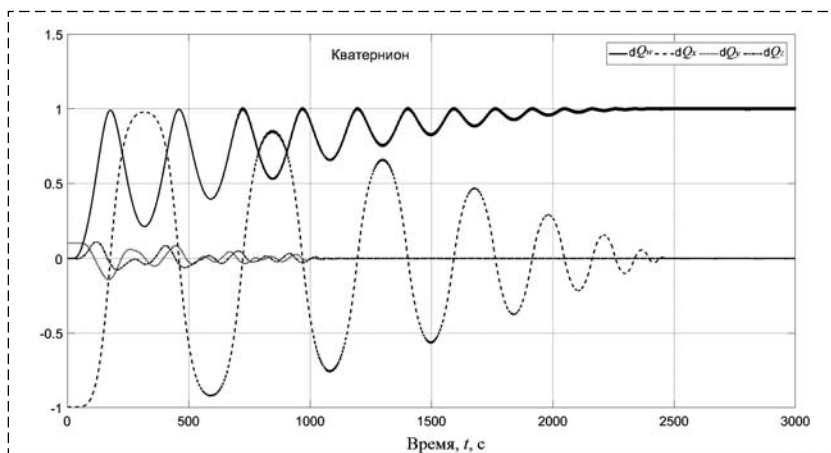


Рис. 9. Кватернион перехода ССК КМР в направлении на НКО
 Fig. 9. Transition quaternion of the associated coordinate system of space manipulation robot in the direction of the non-cooperative space object

ных алгоритмов управления подтверждена результатами моделирования, осуществленного в среде *MATLAB/Simulink*.

Разработанные алгоритмы могут быть применены для проектирования системы управления КМР, предназначенного для продления срока эксплуатации как вновь разрабатываемых КА, так и функционирующих в настоящий момент и не предназначенных для обслуживания.

В рамках дальнейшей работы предполагается разработать и применить методы многокритериальной оптимизации двухуровневой иерархической системы управления КМР на этапе сближения с НКО.

Список литературы

1. Виноградов П. В., Железняков А. Б., Спасский Б. А. Актуальные направления развития космической робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. № 4(9). 2015. С. 3–12.
2. Tatsch A., Fitz-Coy N., Gladun S. On-orbit servicing: A brief survey // Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR'06). 2006. P. 276–281.
3. Kozlova N. Y., Fomichev A. V. Promising on-orbit servicing tasks for spacecraft life extension // AIP Conference Proceedings. Vol. 2318(1). 2021. P. 130008.
4. Kozlova N. Y., Fomichev A. V. Mathematical model of free-flying space manipulation robot when approaching a non-cooperative spacecraft // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1864, N. 1. P. 012131
5. Flores-Abad A., Ma O., Pham K., Ulrich S. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing // Progress in Aerospace Sciences. 2014. N. 68. P. 1–26.

6. Сомов Е. И., Бутырин С. А. Наведение и управление свободнолетающим роботом при завершении сближения с пассивным объектом в дальнем космосе // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 4-1. С. 81–90.

7. Akhloumadi M. R., Ivanov D. Translational and angular motion control for spacecraft rendezvous with non-cooperative rotating object // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2318, N. 1. P. 050003.

8. Barbee B. W., Carpenter J. R., Heatwole S. et al. A Guidance and Navigation Strategy for Rendezvous and Proximity Operations with a Noncooperative Spacecraft in Geosynchronous Orbit // J. of Astronaut Sci. 2011. Vol. 58. P. 389–408. URL: <https://doi.org/10.1007/BF03321176>

9. Matsumoto S., Jacobsen S., Dubowsky S., Ohkami Y. Approach planning and guidance for uncontrolled rotating satellite capture considering collision avoidance // International symposium on artificial intelligence, robotics and automation in space. Nara, Japan. 2003.

10. Seweryn K., Banaszkiwicz M. Optimization of the trajectory of a general free-flying manipulator during the rendezvous maneuver // AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. 2008. P. 7273.

11. Navabi M., Akhloumadi M. R. Nonlinear optimal control of relative rotational and translational motion of spacecraft rendezvous // Journal of Aerospace Engineering. 2017. Vol. 30, N. 5. P. 04017038.

12. Arantes G., Martins-Filho L. S. Guidance and control of position and attitude for rendezvous and dock/berthing with a noncooperative/target spacecraft // Mathematical Problems in Engineering. 2014. Vol. 2014.

13. Breger L., How J. P. Safe trajectories for autonomous rendezvous of spacecraft // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2008. Vol. 31, N. 5. P. 1478–1489.

14. Boyarko G., Yakimenko O., Romano M. Optimal rendezvous trajectories of a controlled spacecraft and a tumbling object // Journal of Guidance, Control, and dynamics. 2011. Vol. 34, N. 4. P. 1239–1252.

15. Mesarovic M. D., Macko D., Takahara Y. Theory of hierarchical, multilevel, systems. Elsevier, 2000.

Algorithmization of Guidance and Motion Control of a Space Manipulation Robot in the Service Tasks of a Non-Operative Spacecraft

N. Yu. Kozlova, kozlovanyu@bmstu.ru, A. V. Fomichev, a.v.fomichev@bmstu.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Kozlova N. Yu., PhD student, Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: kozlovanyu@bmstu.ru

Accepted on December 15, 2021

Abstract

Nowadays there are many non-functioning spacecraft in orbit that have run out of fuel, or have failed due to breakdown. Therefore, the concept of a serviced space and the development of space manipulation robot for extending the spacecraft service life are becoming expedient. Space manipulation robot will be able to perform a variety of tasks, from inspecting malfunctions of a serviced spacecraft, to performing repairs and refueling the target vehicle. The article proposes a strategy and algorithms for the guidance and motion control of a space manipulation robot at the stage of rendezvous with a non-cooperative spacecraft to perform maintenance tasks. The purpose of the article is to synthesize the control of the translational and rotational motion of the space manipulation robot for its convergence with the target satellite at a given distance. The control system is presented in the form of a hierarchical two-level "guidance-stabilization" system. At the guidance level, a transition quaternion of the associated coordinate system to the required position is formed, as well as thrust engine control, which ensures the translational motion of the space manipulation robot at the required velocity. At the stabilization level, a control is formed that superpose the associated coordinate system of the space manipulation robot with the direction to the served satellite. The article proposes a scheme and a mathematical model of the propulsion system, angular and translational motion of the service satellite. The modeling of the developed guidance and motion control algorithms in the SIMULINK environment has been carried out.

Keywords: hierarchical control system, service satellite, non-cooperative spacecraft, space manipulation robot, rendezvous with passive satellite

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90261.

For citation:

Kozlova N. Yu., Fomichev A. V. Algorithmization of Guidance and Motion Control of a Space Manipulation Robot in the Service Tasks of a Non-Operative Spacecraft, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 4, pp. 216–224.

DOI: 10.17587/mau.24.216-224

References

1. **Vinogradov P. V., Zheleznyakov A. B., Spassky B. A.** Modern directions of space robotics development, *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2015, vol. 4(9), pp. 3–12 (in Russian).
2. **Tatsch A., Fitz-Coy N., Gladun S.** On-orbit servicing: A brief survey, *Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR'06)*, 2006, pp. 276–281.
3. **Kozlova N. Y., Fomichev A. V.** Promising on-orbit servicing tasks for spacecraft life extension, *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2318(1), pp. 130008.
4. **Kozlova N. Y., Fomichev A. V.** Mathematical model of free-flying space manipulation robot when approaching a non-cooperative spacecraft, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1864, no. 1, pp. 012131.
5. **Flores-Abad A., Ma O., Pham K., Ulrich S.** A review of space robotics technologies for on-orbit servicing, *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, no. 68, pp. 1–26.
6. **Somov Ye. I., Butyrin S. A.** Guidance and control of free-flying robot during completion of the rendezvous with a passive object in deep space, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2017, vol. 19, no. 4-1, pp. 81–90 (in Russian).
7. **Akhloumadi M. R., Ivanov D.** Translational and angular motion control for spacecraft rendezvous with non-cooperative rotating object, *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2318, no. 1, pp. 050003.
8. **Barbee B. W., Carpenter J. R., Heatwole S.** et al. A Guidance and Navigation Strategy for Rendezvous and Proximity Operations with a Noncooperative Spacecraft in Geosynchronous Orbit, *J. of Astronaut Sci.*, 2011, vol. 58, pp. 389–408, DOI: 10.1007/BF03321176
9. **Matsumoto S., Jacobsen S., Dubowsky S., Ohkami Y.** Approach planning and guidance for uncontrolled rotating satellite capture considering collision avoidance, *International symposium on artificial intelligence, robotics and automation in space*, Nara, Japan, 2003.
10. **Seweryn K., Banaszkiwicz M.** Optimization of the trajectory of a general free-flying manipulator during the rendezvous maneuver, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2008, pp. 7273.
11. **Navabi M., Akhloumadi M. R.** Nonlinear optimal control of relative rotational and translational motion of spacecraft rendezvous, *Journal of Aerospace Engineering*, 2017, vol. 30, no. 5, pp. 04017038.
12. **Arantes G., Martins-Filho L. S.** Guidance and control of position and attitude for rendezvous and dock/berthing with a noncooperative/target spacecraft, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, vol. 2014.
13. **Breger L., How J. P.** Safe trajectories for autonomous rendezvous of spacecraft, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, vol. 31, no. 5, pp. 1478–1489.
14. **Boyarko G., Yakimenko O., Romano M.** Optimal rendezvous trajectories of a controlled spacecraft and a tumbling object, *Journal of Guidance, Control, and dynamics*, 2011, vol. 34, no. 4, pp. 1239–1252.
15. **Mesarovic M. D., Macko D., Takahara Y.** Theory of hierarchical, multilevel, systems, Elsevier, 2000.

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская Тишина, 23с2

Телефон редакции журнала: **+7(499) 270 16 52**

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

Сдано в набор 25.01.2023. Подписано в печать 16.03.2023. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Заказ МН423. Цена договорная.

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

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

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