

ISSN 1684-8853 (print); ISSN 2541-8610 (online)

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

4(131)/2024

4(131)/2024

PEER REVIEWED JOURNAL

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

**Founder**

A. Vostrikov

**Publisher**Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

E. Krouk

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

**Executive secretary**

O. Muravtsova

**Editorial Board**

S. Andreev

Dr. Sc., Tampere, Finland

V. Anisimov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Professor, Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Professor, Beer-Sheva, Israel

M. Buzdalov,

PhD, Researcher, Saint Petersburg, Russia

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

A. Dudin

Dr. Sc., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD, Professor, Riverside, USA

M. Favorskaya

Dr. Sc., Professor, Krasnoyarsk, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Hramov

Dr. Sc., Professor, Innopolis, Russia

L. Jain

PhD, Professor, Canberra, Australia

G. Matvienko

Dr. Sc., Professor, Tomsk, Russia

A. Myllari

PhD, Professor, Grenada, West Indies

K. Samouylov

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

J. Seberry

PhD, Professor, Wollongong, Australia

M. Sergeev

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Novosibirsk, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

T. Sutikno

PhD, Associate Professor, Yogyakarta, Indonesia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Professor, Vologda, Russia

**Editor:** A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** M. Chernenko, Yu. Umnitsyna**Layout and composition:** Yu. Umnitsyna**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67A, Bol'shaya Morskaya, 190000, Saint Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: [i-us.spb@gmail.com](mailto:i-us.spb@gmail.com)

Tel.: +7 - 812 494 70 02

**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL***Velichko A. N., Karpov A. A. An approach to depression detection in speech using a semi-automatic data annotation*

2

**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS***Rudakov R. V., Serzhantova M. V., Boikov V. I., Bushuev A. B., Nuyya O. S., Litvinov Y. V., Bystrov S. V. Adaptive control of robots for high-temperature operations*

12

**HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES***Itsykson V. M., Onischuck M. P., Kechin V. V., Alekseev Y. A. Modeling the behavior of standard library functions in program analysis*

24

**SYSTEM ANALYSIS***Kostoglotov A. A., Zekhtser V. O. Synthesis method of quasi-optimal underactuated systems based on the reduction of Lagrange problem*

40

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

50

4(131)/2024

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-  
УПРАВЛЯЮЩИЕ  
СИСТЕМЫ**Учредитель**

А. А. Востриков

**Издатель**Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения**Главный редактор**

Е. А. Крук,

д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

**Ответственный секретарь**

О. В. Муравцова

**Редакционная коллегия:**

С. Д. Андреев,

д-р техн. наук, Тампере, Финляндия

В. Г. Анисимов,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Б. П. Безручко,

д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ

Н. Блаунштейн,

д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль

М. В. Буэдалов,

канд. техн. наук, научный сотрудник, Санкт-Петербург, РФ

Л. С. Джайн,

д-р наук, проф., Канберра, Австралия

А. Н. Дудин,

д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

И. И. Думер,

д-р наук, проф., Риверсайд, США

А. И. Зейфман,

д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ

К. Кристоделу,

д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США

Г. Г. Матвиенко,

д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ

А. А. Мюллери,

д-р наук, профессор, Гренада, Вест-Индия

К. Е. Самуилов,

д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Д. Себерри,

д-р наук, проф., Волонгонг, Австралия

М. Б. Сергеев,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Т. Сутикну,

д-р наук, доцент, Джокьякарта, Индонезия

М. Н. Фаворская,

д-р техн. наук, проф., Красноярск, РФ

Л. Фортуна,

д-р наук, проф., Катания, Италия

А. Л. Фрадков,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. Е. Храмов,

д-р физ.-мат. наук, Иннополис, РФ

А. А. Шалыто,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. П. Шепета,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Ю. И. Шокин,

акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ

З. М. Юлдашев,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Р. М. Юсупов,

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

**Редактор:** А. Г. Ларионова**Корректор:** Т. В. Звертановская**Дизайн:** М. Л. Черненко, Ю. В. Умницына**Компьютерная верстка:** Ю. В. Умницына**Адрес редакции:** 190000, г. Санкт-Петербург,

ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ

Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,

сайт: <http://i-us.ru>**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ***Величко А. Н., Карпов А. А. Подход к распознаванию депрессии по речи человека с использованием полуавтоматической разметки данных*

2

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ***Рудаков Р. В., Сержантова М. В., Бойков В. И., Бушуев А. Б., Нуйя О. С., Литвинов Ю. В., Быстров С. В. Адаптивное управление роботами для работы в условиях действия высоких температур*

12

**ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА***Ицыксон В. М., Онищук М. П., Кечин В. В., Алексеев Я. А. Моделирование поведения функций стандартной библиотеки в задачах анализа программ*

24

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ***Костоготов А. А., Зехцер В. О. Метод синтеза квазиоптимальных систем с дефицитом управления на базе редукции задачи Лагранжа*

40

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

50

Журнал входит в БД Scopus и в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Сдано в набор 02.08.24. Подписано в печать 19.09.24. Дата выхода в свет: 23.09.2024.

Формат 60×841/8. Гарнитура CentSchbkCyrill BT. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 6,3. Уч.-изд. л. 8,7. Тираж 1000 экз (1-й завод 50 экз.). Заказ № 327.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Распространяется бесплатно.

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,

телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.

Перерегистрирован в Роскомнадзоре.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82226 от 23 ноября 2021 г.

© А. А. Востриков, 2024



## Подход к распознаванию депрессии по речи человека с использованием полуавтоматической разметки данных

А. Н. Величко<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-8503-8512](https://orcid.org/0000-0002-8503-8512)

А. А. Карпов<sup>а</sup>, докт. техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-3424-652X](https://orcid.org/0000-0003-3424-652X), [karpov@iias.spb.su](mailto:karpov@iias.spb.su)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

**Введение:** с момента выпуска в общий доступ одного из самых больших корпусов, содержащих речь людей с депрессией, Extended Distress Analysis Interview Corpus, в сфере автоматического распознавания речи разработаны новые технологии, применение которых дает возможность повысить качество разметки, а вместе с тем и качество распознавания депрессии. **Цель:** повысить качество автоматического распознавания депрессии по речи людей с использованием корпуса Extended Distress Analysis Interview Corpus за счет объединения автоматического транскрибирования аудиозаписей с получением временных меток для каждого высказывания, а также экспертной проверки полученных данных для исправления ошибок разметки. **Результаты:** представлен полуавтоматический подход для разметки аудиоданных с использованием модели Faster-Whisper для текстового транскрибирования речевых записей, набора скриптов для предобработки данных и программного инструментария Praat для ручной проверки полученных транскрипций. В ходе экспериментальных исследований использовано несколько различных методов для решения задач классификации и регрессии. Попытка нормализации данных позволила улучшить значения показателей для метода k-ближайших соседей на предобработанных данных, однако не дала никаких изменений и даже немного ухудшила значения показателей на оригинальных данных. Анализ результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований, выявил, что в целом, несмотря на понижение средних значений показателей точности, был сокращен разрыв значений показателей для каждого класса за счет повышения качества распознавания депрессии, что свидетельствует о том, что цель работы достигнута. **Практическая значимость:** использование представленного подхода позволило улучшить как качество разметки, так и качество автоматического распознавания депрессии. **Обсуждение:** в дальнейшем планируется использовать полученную разметку для проведения экспериментальных исследований при создании метода многомодального распознавания депрессии человека по аудио, видео и текстовым данным.

**Ключевые слова** — анализ речи, речевые технологии, компьютерная паралингвистика, деструктивные явления, предобработка данных, автоматическое распознавание депрессии по речи.

**Для цитирования:** Величко А. Н., Карпов А. А. Подход к распознаванию депрессии по речи человека с использованием полуавтоматической разметки данных. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 4, с. 2–11. doi:10.31799/1684-8853-2024-4-2-11, EDN: RBUXLJ

**For citation:** Velichko A. N., Karpov A. A. An approach to depression detection in speech using a semi-automatic data annotation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 4, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-4-2-11, EDN: RBUXLJ

### Введение

Большое депрессивное расстройство (БДР) является распространенным аффективным расстройством, которое характеризуется подавленным настроением, потерей интереса или утратой способности получать удовольствие от приятной ранее деятельности, расстройством сна и (или) аппетита, психомоторным возбуждением или заторможенностью, повышенной утомляемостью и снижением энергичности, снижением самооценки или неадекватным чувством вины, снижением способности к концентрации внимания или заторможенным мышлением, суицидальными тенденциями. Данное состояние приводит к ухудшению жизнедеятельности, может стать причиной инвалидности [1].

Специалист при беседе с пациентом учитывает особенности речевой продукции при затрагивании значимых для пациента тем. В ряде

межкультурных исследований [2–4] показано, что проявления депрессии схожи во многих культурах, что в перспективе позволит использовать автоматические системы распознавания депрессии по речи как минимум для родственных языковых групп вне зависимости от языка данных для обучения. Современные методы машинного и глубокого обучения могут обрабатывать многомодальную информацию (видео, аудио, текст и иные модальности), что дает возможность эффективно отличать человека с БДР от здорового человека. Ряд работ [5–8] посвящен определению психического состояния пользователей социальных сетей на основе контента, который они публикуют, что является одним из возможных практических применений систем распознавания депрессии. Многие аналитические работы [9–11] рассматривают теоретические и практические исследования, в которых представлены существующие на момент написания многомо-

дальные и одномодальные корпуса, содержащие речь людей с депрессией, а также систематизированные признаки депрессии по модальностям. Несмотря на актуальность тематики, в настоящее время количество открытых речевых и многомодальных корпусов, содержащих речь людей с установленной депрессией, ограничено. При этом существующие корпуса имеют такие недостатки, как малое количество данных, дисбаланс классов в данных, неточность разметки и пр. Одним из самых больших корпусов на сегодня является корпус Extended Distress Analysis Interview Corpus (E-DAIC) [12]. Различные подходы к предобработке данных на корпусе E-DAIC сравниваются в работе [12], а сравнительный анализ автоматической и полуавтоматической, т. е. с участием человека, предобработки текста проведен в исследовании [13]. Можно заметить, что, несмотря на технологический прогресс, во многих случаях качество распознавания наличия депрессии оказывается выше, если была проведена полуавтоматическая предобработка.

На данный момент большинство работ на корпусе E-DAIC посвящено задаче регрессии, т. е. определению степени тяжести депрессии на основе шкалы PHQ-8. Задача регрессии с использованием этого корпуса представлена на соревнованиях по аудиовизуальному распознаванию эмоций AVEC-2019 [12]. В нашей работе проведены экспериментальные исследования как для задачи регрессии, так и для задачи бинарной классификации (определения наличия или отсутствия депрессии).

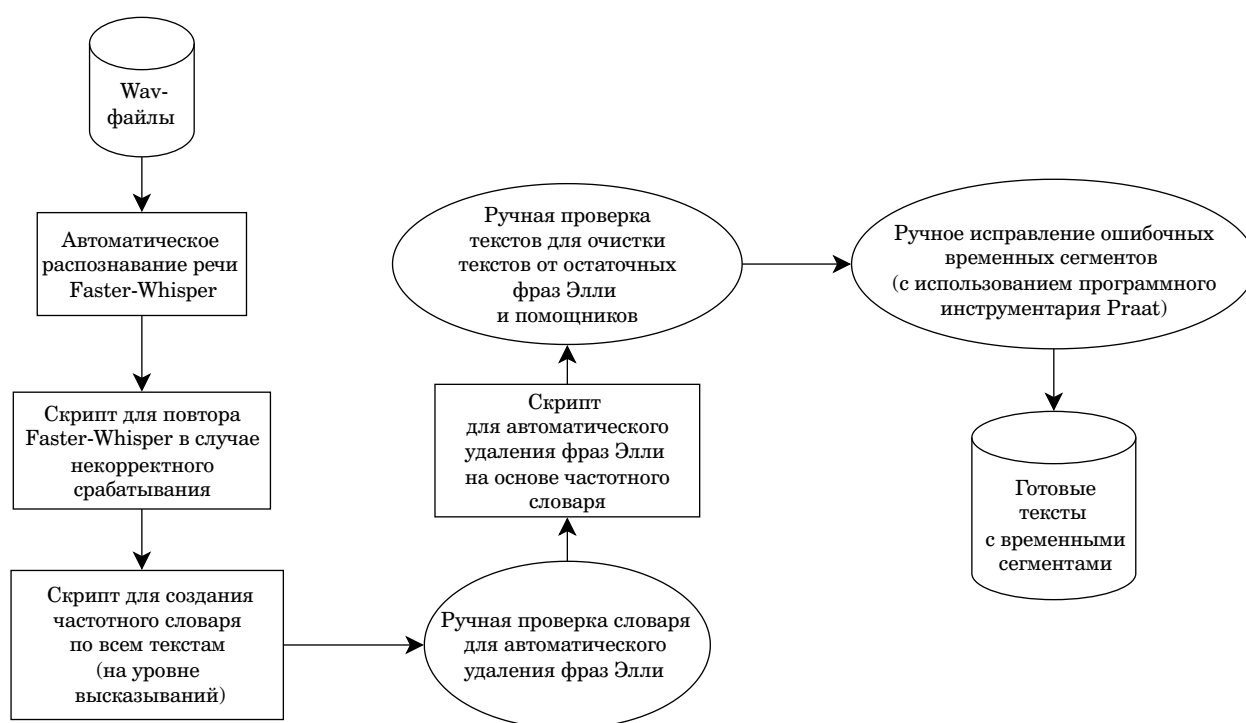
### Подход к предобработке речевых данных

В качестве исследовательских данных для обучения и тестирования предложенного подхода выбран многомодальный корпус клинических интервью E-DAIC. «Корпус разработан для симуляции стандартных процессов определения того, имеется ли у человека риск ПТСР (посттравматического стрессового расстройства) и БДР» [14]. Он содержит 275 интервью в двух режимах: «автоматическое интервью — интервью проводилось в автоматическом режиме с Элли; «Волшебник Оз» (Wizard of Oz, WoZ) или «Гудвин» — интервью проводилось анимированным виртуальным интервьюером по имени Элли, которую контролировал интервьюер в другой комнате» [14]. Подробное описание корпуса, процесса сбора данных и обнаруженных авторами закономерностей проявлений ПТСР и БДР в речи, помимо оригинальных работ, представлено в работах [14, 15]. Данный корпус является частью корпуса DAIC и расширенной вер-

сией корпуса DAIC-WoZ [16], а разметка данных сформирована автоматически с использованием методов автоматического распознавания речи.

В ходе анализа корпуса E-DAIC был выявлен ряд недостатков, потенциально снижающих показатели качества распознавания моделей. Среди них: случаи, когда один участник перебивает другого; некорректная разметка временных сегментов в транскрипции и ее несовпадение с аудио; фразы интервьюера Элли и помощников в транскрипциях; несовпадения в целевых значениях классов, которые также были замечены другими исследователями в корпусе DAIC-WoZ [17, 18]. Ввиду того, что версия корпуса E-DAIC была размечена с использованием автоматических инструментов, существовавших на момент публикации корпуса в 2019 г., качество транскрипций и точность временных сегментов ниже, чем это возможно сделать с использованием современных методов. Поэтому целью данной работы является улучшение качества распознавания депрессии на корпусе E-DAIC за счет объединения автоматического транскрибирования (расознавания) аудиозаписей с получением временных сегментов для каждого высказывания, а также ручной проверки полученных данных и, при необходимости, исправления ошибок. Последовательность действий при предобработке данных представлена на рис. 1.

Для транскрибирования речи были опробованы различные модели Whisper [19] и Faster-Whisper (<https://github.com/SYSTRAN/faster-whisper>). Наилучшей моделью оказалась самая большая модель Faster-Whisper — large-v3 — благодаря высоким показателям скорости, затрат по вычислительным ресурсам и качества транскрипций. В отличие от оригинальных моделей Whisper, Faster-Whisper обладает преимуществом ввиду меньшего потребления вычислительных ресурсов и более высокой скорости обработки данных. Фактически она является надстройкой над оригинальным решением Whisper, а потому качество транскрипций соответствует результатам оригинальной модели. Необходимость повторения скрипта для запуска Faster-Whisper обусловлена тем, что в некоторых случаях модель срабатывает некорректно и создает повторы фразы, если не уверена в том, что верно распознала фразу. Решением этого феномена на данный момент является настройка температуры модели (гиперпараметр, значения которого находятся между 0 и 1; чем выше его значение, тем более случайным будет вывод, и наоборот, чем ниже значение, тем вывод более детерминированный; если значение равно 0, то модель будет использовать логарифмическую вероятность для автоматического повышения температуры до тех пор, пока не будут достиг-



■ **Рис. 1.** Этапы полуавтоматической предобработки данных  
 ■ **Fig. 1.** Semi-automatic data preprocessing steps

нуты определенные пороговые значения), а также ее повторный запуск, так как некорректные срабатывания происходят не при каждом запуске (ввиду специфики интервью три повторения подряд одной фразы является максимально возможным количеством повторений).

Произведена попытка автоматической диаризации речи дикторов с использованием Pyannote (версий v2 и v3) [20] как наиболее качественного подхода на сегодня. К сожалению, при использовании данного инструмента получено неудовлетворительное качество диаризации в случаях, когда на записи присутствуют три различных женских голоса (участника, помощника и интервьюера Элли).

Было решено произвести полуавтоматическую разметку текстов речевых транскрипций с использованием скриптов и ручной разметки. Первым делом необходимо было использовать скрипт для создания частотного словаря на уровне высказываний по всем текстам. Данный словарь был проверен вручную, отобраны фразы, которые точно принадлежат Элли. На следующем шаге эти фразы были автоматически вырезаны из текстов транскрипций. Наиболее время- и трудозатратным шагом явилось ручное удаление остаточных фраз Элли и помощников. Данный шаг был необходим с тем, чтобы в транскрипциях остались только фразы участников. Ввиду того, что в транскрипциях встречались

ошибочные временные сегменты, необходимо было их исправить, что сделано с использованием программного инструментария Praat [21]. Эти сегменты были представлены отрезками диалогов, когда в одном временном сегменте в транскрипции показана транскрипция речи и участников, и Элли. Они являлись результатом автоматического распознавания речи в тех частях диалогов, где либо происходило наложение речи участников и Элли, либо ответ следовал моментально за вопросом, без пауз.

Таким образом, среди очевидных ошибок (видимых человеческому глазу при прочтении текстовых транскрипций и одновременном прослушивании аудио) в автоматическом распознавании речи можно выделить:

- ошибки во временных сегментах (отсутствие пауз между фразами участника);
- ошибки в автоматическом распознавании (отсутствие некоторых фраз участника; наличие фраз интервьюера Элли или помощника во фразах участника ввиду некорректного распознавания временных сегментов; ошибки распознавания фраз участника ввиду либо наложения речи интервьюера Элли или помощника и участника, либо слишком тихо произнесенной фразы).

Поскольку в некоторых работах найдены несоответствия в целевых значениях классов (присвоение класса 0 – «отсутствие депрессии» объектам класса 1 – «наличие депрессии»), про-

ведена также проверка соответствия бинарных значений классов шкале PHQ-8. Согласно данной шкале, если участник набирает 10 и более баллов, такой результат расценивается как выраженная депрессия, а при результате 20 и более баллов — тяжелая депрессия. Так, в корпусе E-DAIC обнаружено 20 несоответствий данной шкале (13 в обучающем наборе, 3 — в отладочном, 4 — в тестовом), при том, что в корпусе DAIC-WoZ одно такое несоответствие. Данные несоответствия целевых значений исправлены вручную, так как они могли заметно повлиять на результаты обучения моделей и автоматического распознавания депрессии. Было получено 189 аудиозаписей в корпусе, принадлежащих классу 0, а классу 1 — 86.

Также обнаружены аудиозаписи, в которых количество каналов и частота дискретизации отличались от большинства аудиозаписей. В корпусе значительная часть аудиозаписей имеет один канал записи (моно), частота дискретизации — 16 кГц, однако было обнаружено 33 аудиозаписи, имеющие два канала (стерео), частоту дискретизации 48 кГц. Путем конвертации эти аудиозаписи приведены к общим параметрам, поскольку такое различие могло повлиять на процесс и качество вычисления акустических признаков.

### Экспериментальные исследования и полученные результаты

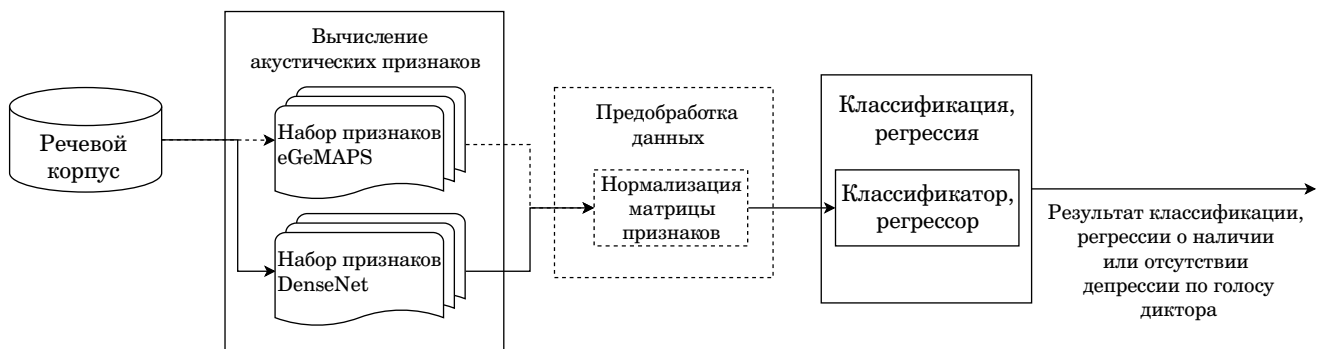
Экспериментальные исследования проведены с использованием предложенного метода распознавания депрессии по речи (рис. 2). На основе работы [14] были вычислены два набора акустических признаков с помощью программного инструментария openSMILE (<http://audeering.com/technology/opensmile/>): 88 признаков eGeMAPS [22] и 1920 признаков DenseNet [23]. Процесс вычисления наборов акустических признаков, сами

признаки и используемая для экспериментальных исследований нейросетевая архитектура TabNet [24] подробно рассмотрены в работе [14].

В нашей работе для бинарной задачи определения депрессии (присутствует заболевание у говорящего или нет) были применены и исследованы несколько различных машинных классификаторов: глубокая нейронная сеть TabNet, градиентный бустинг CatboostClassifier, метод линейного дискриминантного анализа (Linear Discriminant Analysis, LDA), метод k-ближайших соседей (k-Nearest Neighbours, k-NN). Данные классификаторы выбраны с учетом того, что их обучение занимает мало времени относительно многих других подходов и не требует большого количества вычислительных ресурсов.

Наборы данных для проведения экспериментальных исследований состоят из 163 экземпляров записей для обучения (train), других 56 — для валидации (val) и еще 56 — для тестирования (test). Набор для валидации (val) применялся в случаях, когда классификатор имел встроенную возможность его использовать (TabNet, Catboost). У классических методов машинного обучения (LDA, k-NN) такой возможности нет, поэтому для работы с ними набор для валидации был объединен с набором для обучения (train+val). Объективное тестирование проводилось, соответственно, на тестовом наборе данных (test).

Для сравнения результатов предобработки данных экспериментальные исследования выполнялись с использованием двух наборов данных: оригинального набора (описанные выше изменения не были внесены, он использовался в том виде, в котором представлен авторами) и предобработанного набора (с внесенными изменениями, описанными выше). Количественные результаты экспериментальных исследований в задаче бинарной (наличие или отсутствие депрессии) классификации депрессии представлены в табл. 1. В качестве количественных пока-



■ **Рис. 2.** Обобщенная схема метода распознавания депрессии по речи  
 ■ **Fig. 2.** A unified scheme of the method for depression detection by speech

зателей для оценивания методов выбраны: взвешенная средняя F-мера (F1 WA), F-мера для каждого класса, невзвешенная средняя F-мера (F1 UA), взвешенная средняя полнота (WAR), полноты для каждого класса (Recall), а также невзвешенная средняя полнота (Unweighted Average Recall, UAR). Классы Depressed (1 – «наличие депрессии») и Non-Depressed (0 – «отсутствие депрессии») обозначены D и ND соответственно.

Гиперпараметры машинных классификаторов использованы преимущественно базовые, но были изменены параметры конфигурации запуска TabNet batch\_size = 64 (по умолчанию 1024) и virtual\_batch\_size = 32 (по умолчанию 128). В метод Catboost были внесены изменения в целях построения метода классического градиентного бустинга и использования его особенностей: параметр весов классов (1-му классу присвоен вес в два раза больше, чем 0-му, так как в данных присутствует дисбаланс), установлен детектор переобучения, выставлена схема классического градиентного бустинга boosting\_type='Plain'. Количество соседей для метода k-NN равно трем.

Несмотря на то, что некоторые значения показателей на оригинальных данных выше (см. табл. 1), на предобработанных данных разброс между значениями показателей для каждого класса гораздо меньше. Также можно заметить тенденцию, что при добавлении набора признаков eGeMAPS существенно снижаются значения показателей для класса D, но при этом повышаются значения для класса ND. Попытка нормализации данных при использовании метода k-NN позволила улучшить значения показателей на предобработанных данных, однако не дала никаких изменений и даже немного ухудшила значения показателей на оригинальных данных.

Результаты экспериментальных исследований в регрессионной задаче распознавания депрессии представлены в табл. 2. Применены следующие методы регрессии для набора признаков DenseNet: CatboostRegressor, логистическая и линейная регрессии (Logistic and Linear Regression). В качестве показателей для оценивания методов использованы коэффициент корреляции согласования (Concordance Correlation

■ **Таблица 1.** Результаты экспериментальных исследований методов для бинарной классификации депрессии на предобработанных и оригинальных данных

■ **Table 1.** Depression classification results on both preprocessed and original data

Метод	Вариант разбиения данных	F1 WA	F1 UA	F1 (ND)	F1 (D)	WAR	UAR	Recall (ND)	Recall (D)
<b>Предобработанные данные</b>									
TabNetClassifier (DenseNet)	train/val/test	0,55	0,53	0,65	0,41	0,56	0,53	0,67	0,39
TabNetClassifier (DenseNet + eGeMAPS)	train/val/test	0,54	0,49	<b>0,73</b>	0,25	0,60	0,53	<b>0,89</b>	0,17
CatboostClassifier (DenseNet)	train/val/test	<b>0,61</b>	<b>0,61</b>	0,69	<b>0,48</b>	<b>0,61</b>	<b>0,59</b>	0,72	<b>0,45</b>
CatboostClassifier (DenseNet + eGeMAPS)	train/val/test	0,51	0,45	0,72	0,19	0,58	0,51	<b>0,89</b>	0,12
LDA (DenseNet)	train+val/test	0,52	0,48	0,68	0,28	0,56	0,50	0,78	0,22
k-NN (DenseNet)	train+val/test	0,52	0,48	0,66	0,31	0,54	0,50	0,73	0,26
k-NN (DenseNet, L2-norm)	train+val/test	0,53	0,49	0,66	0,32	0,55	0,50	0,74	0,27
<b>Оригинальные данные</b>									
TabNetClassifier (DenseNet)	train/val/test	0,59	0,50	0,71	<b>0,28</b>	0,59	0,50	0,70	<b>0,30</b>
TabNetClassifier (DenseNet + eGeMAPS)	train/val/test	0,60	0,45	0,78	0,12	0,65	0,47	0,87	0,08
CatboostClassifier (DenseNet)	train/val/test	0,63	0,50	0,79	0,22	0,67	0,51	0,86	0,16
CatboostClassifier (DenseNet + eGeMAPS)	train/val/test	0,61	0,49	0,76	0,22	0,63	0,49	0,80	0,19
LDA (DenseNet)	train+val/test	<b>0,64</b>	0,49	<b>0,82</b>	0,16	<b>0,70</b>	<b>0,52</b>	<b>0,93</b>	0,10
k-NN (DenseNet)	train+val/test	0,63	<b>0,51</b>	0,78	0,23	0,66	<b>0,52</b>	0,84	0,19
k-NN (DenseNet, L2-norm)	train+val/test	0,63	0,50	0,78	0,23	0,66	0,51	0,84	0,18



■ **Таблица 2.** Результаты экспериментальных исследований в регрессионной задаче распознавания депрессии на предобработанных и оригинальных данных

■ **Table 2.** Depression regression results on both preprocessed and original data

Метод (с использованием набора признаков DenseNet)	Вариант разбиения данных	CCC (test) ↑	RMSE (val/test) ↓
<b>Предобработанные данные</b>			
CatboostRegressor	train/val/test	0,002	5,69 / <b>6,82</b>
LogisticRegression	train+val/test	0,006	- / 9,14
LinearRegression	train+val/test	<b>0,047</b>	- / 6,95
<b>Оригинальные данные</b>			
CatboostRegressor	train/val/test	0,003	5,50 / <b>6,25</b>
LogisticRegression	train+val/test	<b>0,085</b>	- / 8,53
LinearRegression	train+val/test	0,061	- / 6,64

■ **Таблица 3.** Результаты сравнения экспериментальных исследований с аналогами в регрессионной задаче распознавания депрессии

■ **Table 3.** Comparison of experimental results in depression regression recognition

Метод	Признак, классификатор	CCC ↑		RMSE ↓	
		val	test	val	test
Ringeval F., et al. [12]	MFCCs, GRU	0,198	-	7,28	-
	eGeMAPS, GRU	0,076	-	7,78	-
	BoAW-M, GRU	0,102	-	6,32	-
	BoAW-e, GRU	0,272	0,045	6,43	8,19
	DenseNet, GRU	0,165	-	8,09	-
	VGG, GRU	0,305	0,108	8,00	9,33
Ray A., et al. [25]	Funct MFCC, BLSTM	-	-	<b>5,11</b>	-
	Funct eGeMAPS, BLSTM	-	-	5,52	-
	BOAW-M, BLSTM	-	-	5,66	-
	BoAW-e, BLSTM	-	-	5,50	-
	DenseNet, BLSTM	-	-	5,65	-
Makiuchi M. R., et al. [26]	VGG, CNN	<b>0,338</b>	<b>0,199</b>	5,97	7,02
	VGG, GCNN-LSTM	0,497	-	5,70	-
<b>Метод с использованием предобработанных данных</b>	DenseNet, LinearRegression	-	0,047	-	<b>6,95</b>
<b>Метод с использованием оригинальных данных</b>	DenseNet, LogisticRegression	-	0,085	-	8,53

Coefficient, CCC) и среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error, RMSE).

По приведенным значениям видно, что результаты CCC и RMSE на оригинальных данных лучше, чем на предобработанных. Наша гипотеза заключается в том, что здесь работает та же логика, что и при классификации депрессии, где значения средних показателей были выше в результатах для оригинальных данных. При этом значения показателей для каждого класса более сбалансированы в результатах классификации

на предобработанных данных. Для проверки этой гипотезы необходимо вычислить дополнительно показатели CCC и RMSE для регрессионной задачи распознавания депрессии, которые будут учитывать значения показателей для каждого класса.

Сравнение с аналогами в задаче регрессии представлено в табл. 3. Полученные результаты RMSE для оригинальных и предобработанных данных оказались на уровне с работой организаторов, представленной на соревнованиях AVEC-2019.

## Заключение

В статье представлен полуавтоматический подход к предобработке данных на корпусе E-DAIC с использованием Faster-Whisper для текстового транскрибирования речи и программного инструментария Praat для ручной проверки полученных транскрипций. Проведены экспериментальные исследования с несколькими методами распознавания депрессии для задач бинарной классификации и регрессии. На основе полученных количественных результатов можно заключить, что цель работы, а именно повышение качества автоматического распознавания депрессии по речи человека, достигнута. Несмотря на понижение средних значений показателей, сокращен разрыв значений показателей для каждого класса за счет повышения качества распознавания класса Depressed (1 — «наличие депрессии»).

Среди ограничений, которые были преодолены в ходе работы, можно выделить: небольшое количество данных в корпусе (по сравнению с корпусами, предназначенными для других задач, например, автоматического распознавания речи, распознавания эмоций в речи и пр.); дисбаланс классов в данных более чем в два раза (аудиозаписей в корпусе, принадлежащих классу 0 «отсутствие депрессии», — 189, а классу 1 «наличие депрессии», — 86); ограничения, связанные с возможностями современных методов распознавания речи и диаризации. Ограничение, связанное с дисбалансом классов в данных, было преодолено путем придания объектам минорного класса большего веса в классификаторе CatboostClassifier, а ограничение, связанное с возможностями современных методов распознавания речи и диаризации, — путем полуавтоматической предобработки данных. Проблему

небольшого количества данных в корпусе теоретически можно решить, объединив несколько корпусов (что, однако, не исключает зашумления данных ввиду различных условий их записи), либо путем аугментации данных (что также несет в себе риски зашумления данных).

Практическое применение предложенного метода тоже имеет ограничения, среди которых относительно низкое качество распознавания депрессии (повышается путем комплексирования предложенного метода) и необходимость участия специалистов для проведения корректировки на первичных этапах внедрения. Отдельно стоит отметить, что предложенный метод может быть использован в качестве вспомогательного средства, а не самостоятельного, ввиду описанных выше ограничений.

Полученные в ходе предобработки аудиоданных корпуса транскрипции планируется использовать в ходе дальнейших исследований на базе корпуса E-DAIC для многомодального распознавания депрессии, а также для многозадачных систем определения различных паралингвистических явлений и аффективных состояний по разговорной речи людей [15, 27]. Такие системы потенциально могут быть полезны при телеконсультировании в первичном звене здравоохранения для скрининга тревожно-депрессивных расстройств ввиду необходимости обработки многомодальной информации в условиях удаленного консультирования и лечения специалистами [28].

## Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-11-00321, <https://www.rscf.ru/project/22-11-00321/>).

## Литература

1. *Depressive disorder WHO (depression)*. WHO. 2023. <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/depression> (дата обращения: 12.06.2024).
2. Singer K. Depressive disorders from a transcultural perspective. *Social Science & Medicine*, 1975, no. 9, pp. 289–301. doi:10.1016/0037-7856(75)90001-3
3. Alghowinem Sh., Goecke R., Epps J., Wagner M., Cohn J. Cross-cultural depression recognition from vocal biomarkers. *Proc. of INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 1943–1947. doi:10.21437/Interspeech.2016-1339
4. Kaya H., Fedotov D., Dresvyanskiy D., Doyran M., Mamontov D., Markitantov M., Salah A., Kavcar E., Karpov A., Salah A. Predicting depression and emotions in the crossroads of cultures, paralinguistics, and non-linguistics. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/visual Emotion Challenge (AVEC '19)*, Nice, France, 2019, pp. 27–35. doi:10.1145/3347320.3357691
5. Браницкий А. А., Шарма Я. Д., Котенко И. В., Федорченко Е. В., Красов А. В., Ушаков И. А. Определение психического состояния пользователей социальной сети Reddit на основе методов машинного обучения. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 1, с. 8–18. doi:10.31799/1684-8853-2022-1-8-18
6. Браницкий А. А., Дойникова Е. В., Котенко И. В. Использование нейросетей для прогнозирования подверженности пользователей социальных сетей деструктивным воздействиям. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 1, с. 24–33. doi:10.31799/1684-8853-2020-1-24-33

7. Stankevich M., Ignatiev N., Smirnov I. Predicting depression with social media images. *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM 2020)*, 2020, pp. 235–240. doi:10.5220/0009168602350240
8. Stankevich M., Smirnov I., Kiselnikova N., Ushakova A. Depression Detection from Social Media Profiles. *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. DAMDID/RCDL 2019. Communications in Computer and Information Science*, 2019, no. 1223, pp. 181–194. doi:10.1007/978-3-030-51913-1\_12
9. Pampouchidou A., Simos P. G., Marias K., Meriaudeau F., Yang F., Padiaditis M., Tsiknakis M. Automatic assessment of depression based on visual cues: A systematic review. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 445–470. doi:10.1109/TAFFC.2017.2724035
10. Wu P., Wang R., Lin H., Zhang F., Tu J., Sun M. Automatic depression recognition by intelligent speech signal processing: A systematic survey. *CAAI Trans. Intell. Technol*, 2023, no. 8(3), pp. 701–711. doi:10.1049/cit2.12113
11. Величко А. Н., Карпов А. А. Аналитический обзор систем автоматического определения депрессии по речи. *Информатика и автоматизация*, 2021, т. 20, № 3, с. 497–529. doi:10.15622/ia.2021.3.1
12. Ringeval F., Schuller B., Valstar M., Cummins N., Cowie R., Tavabi L., Schmitt M., Alisamir S., Amiriparian S., Messner E.-M., Song S., Liu S., Zhao Z., Malloi-Ragolta A., Ren Z., Soleymani M., Pantic M. AVEC 2019 Workshop and Challenge: State-of-mind, detecting depression with AI, and cross-cultural affect recognition. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/visual Emotion Challenge (AVEC '19)*, Nice, France, 2019, pp. 3–12. doi:10.1145/3347320.3357688
13. Sadeghi M., Egger B., Agahi R., Richer R., Capito K., Rupp L. H., Schindler-Gmelch L., Berking M., Eskofier B. M. Exploring the capabilities of a language model-only approach for depression detection in text data. *Proc. of 2023 IEEE EMBS Intern. Conf. on Biomedical and Health Informatics (BHI)*, Pittsburgh, USA, 2023, pp. 1–5. doi:10.1109/BHI58575.2023.10313367
14. Величко А. Н. Методы и программная система интегрального анализа деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи: дис. ... канд. техн. наук. СПб ФИЦ РАН, 2023. 136 с.
15. Величко А. Н., Карпов А. А. Методика и программная система интегрального анализа деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 4, с. 2–11. doi:10.31799/684-8853-2023-4-2-11, EDN: FHUWJ
16. Gratch J., Artstein R., Lucas G. M., Stratou G., Scherer S., Nazarian A., Wood R., Boberg J., DeVault D., Marsella S., Traum D., Rizzo S., Morency L.-P. The distress analysis interview corpus of human and computer interviews. *Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Language Resources and Evaluation (LREC'14)*, Reykjavik, Iceland, 2014, pp. 3123–3128.
17. Ravi V., Wang J., Flint J., Alwan A. Fraug: A frame rate based data augmentation method for depression detection from speech signals. *Proc. of ICASSP 2022–2022 IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Singapore, 2022, pp. 6267–6271. doi:10.1109/ICASSP43922.2022.9746307
18. Bailey A., Plumbley M. D. Gender bias in depression detection using audio features. *Proc. of 2021 29th European Signal Processing Conf. (EUSIPCO)*, Dublin, Ireland, 2021, pp. 596–600. doi:10.23919/EUSIPCO54536.2021.9615933
19. Radford A., Kim J. W., Xu T., Brockman G., McLeavey C., Sutskever I. Robust speech recognition via large-scale weak supervision. *Proc. of the 40th Intern. Conf. on Machine Learning (ICML'23)*, Honolulu, Hawaii, 2023, no. 202, pp. 28492–28518. doi:10.5555/3618408.3619590
20. Bredin H. Pyannote.audio 2.1 speaker diarization pipeline: principle, benchmark, and recipe. *Proc. of INTERSPEECH-2023*, Dublin, Ireland, 2023, pp. 1983–1987. doi:10.21437/Interspeech.2023-105
21. Boersma P. Praat, a system for doing phonetics by computer. *Glott International*, 2001, no. 5(9/10), pp. 341–345.
22. Eyben F., Scherer K. R., Schuller B. W., Sundberg J., Andre E., Busso C., Devillers L. Y., Epps J., Laukka P., Narayanan S. S., Truong K. P. The Geneva Minimalistic Acoustic Parameter Set (GeMAPS) for voice research and affective computing. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2015, no. 7(2), pp. 190–202. doi:10.1109/TAFFC.2015.2457417
23. Huang G., Liu Z., Van Der Maaten L., Weinberger K. Q. Densely connected convolutional networks. *Proc. of 2017 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, Hawaii, 2017, pp. 2261–2269. doi:10.1109/CVPR.2017.243
24. Arik S. O., Pfister T. TabNet: Attentive interpretable tabular learning. *Proc. of the AAAI Conf. on Artificial Intelligence*, Virtual Event, 2021, no. 35(8), pp. 6679–6687. doi:10.1609/aaai.v35i8.16826
25. Ray A., Kumar S., Reddy R., Mukherjee P., Garg R. Multi-level attention network using text, audio and video for depression prediction. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/visual Emotion Challenge (AVEC '19)*, Nice, France, 2019, pp. 81–88. doi:10.1145/3347320.3357697
26. Makiuchi M. R., Warnita T., Uto K., Shinoda K. Multimodal fusion of BERT-CNN and Gated CNN representations for depression detection. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/visual Emotion Challenge (AVEC '19)*, Nice, France, 2019, pp. 55–63. doi:10.1145/3347320.3357694
27. Velichko A., Markitantov M., Kaya H., Karpov A. Complex paralinguistic analysis of speech: Predicting

gender, emotions and deception in a hierarchical framework. *Proc. of INTERSPEECH-2022*, Incheon, Korea, 2022, pp. 4735–4739. doi:10.21437/Interspeech.2022-11294

28. Ушаков И. Б., Бубеев Ю. А., Сыркин Л. Д., Карпов А. А., Поляков А. В., Иванов А. В., Усов В. М.

Дистанционное телеконсультирование в первичном звене здравоохранения для скрининга тревожно-депрессивных расстройств с контуром обратной связи от пациента. *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*, 2023, № 22(4), с. 140–153. doi:10.36622/VSTU.2023.22.4.022

UDC 004.934.2

doi:10.31799/1684-8853-2024-4-2-11

EDN: RBUXLJ

### An approach to depression detection in speech using a semi-automatic data annotation

A. N. Velichko<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-8503-8512

A. A. Karpov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-3424-652X, karpov@iias.spb.su

<sup>a</sup>St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, 39, 14th Line, 191778, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Automatic speech recognition tools have been significantly improved since the release of one of the biggest corpora containing speech of the people diagnosed with depression, Extended Distress Analysis Interview Corpus. New methods make it possible to enhance the annotation quality as well as the depression detection quality. **Purpose:** To improve the depression detection quality by combining an automatic audio transcription with getting timestamps for each phrase and manual data validation for error correction if needed. **Results:** We present a semi-automatic approach for data annotation using the Faster-Whisper models for transcribing, a set of scripts for data preprocessing and Praat software for manual data validation. In the experiments we use several different machine learning techniques for classification and regression tasks. An attempt of data normalizing results in enhancing the values for k-Nearest Neighbours method on the preprocessed data but it doesn't involve any significant changes and even worsens the values for the original data. The analysis of the experimental results shows that despite the decrease in the average values, the gap between the values for each class has been reduced. This indicates that the purpose of the work is achieved. **Practical relevance:** We have improved the quality of annotation as well as depression detection in experiments using the presented approach. **Discussion:** In subsequent studies we are going to use this annotation for building the automatic multimodal method for depression detection.

**Keywords** – speech analysis, speech technologies, computational paralinguistics, destructive phenomena, data preprocessing, automatic depression detection in speech.

**For citation:** Velichko A. N., Karpov A. A. An approach to depression detection in speech using a semi-automatic data annotation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 4, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-4-2-11, EDN: RBUXLJ

#### Financial support

This work was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-11-00321, <https://www.rscf.ru/project/22-11-00321/>).

#### References

1. *Depressive disorder WHO (depression)*. WHO. 2023. Available at: <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/depression> (accessed 12 June 2024).
2. Singer K. Depressive disorders from a transcultural perspective. *Social Science & Medicine*, 1975, no. 9, pp. 289–301. doi:10.1016/0037-7856(75)90001-3
3. Alghowinem Sh., Goecke R., Epps J., Wagner M., Cohn J. Cross-cultural depression recognition from vocal biomarkers. *Proc. of INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 1943–1947. doi:10.21437/Interspeech.2016-1339
4. Kaya H., Fedotov D., Dresvyanskiy D., Doyran M., Mamontov D., Markitantov M., Salah A., Kavcar E., Karpov A., Salah A. Predicting depression and emotions in the crossroads of cultures, paralinguistics, and non-linguistics. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audiovisual Emotion Challenge (AVEC '19)*, Nice, France, 2019, pp. 27–35. doi:10.1145/3347320.3357691
5. Branitskiy A. A., Sharma Y. D., Kotenko I. V., Fedorchenko E. V., Krasov A. V., Ushakov I. A. Determination of the mental state of users of the social network Reddit based on machine learning methods. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 1, pp. 8–18 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-1-8-18
6. Branitskiy A. A., Doynikova E. V., Kotenko I. V. Use of neural networks for forecasting of the exposure of social network users to destructive impacts. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 1, pp. 24–33 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-1-24-33
7. Stankevich M., Ignatiev N., Smirnov I. Predicting depression with social media images. *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM 2020)*, 2020, pp. 235–240.
8. Stankevich M., Smirnov I., Kiselnikova N., Ushakova A. *Depression Detection from Social Media Profiles*. In: *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. DAMDID/RCDL 2019. Communications in Computer and Information Science*, 2019, no. 1223, pp. 181–194.
9. Pampouchidou A., Simos P. G., Marias K., Meriaudeau F., Yang F., Padiaditis M., Tsiknakis M. Automatic assessment of depression based on visual cues: A systematic review. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 445–470. doi:10.1109/TAFFC.2017.2724035
10. Wu P., Wang R., Lin H., Zhang F., Tu J., Sun M. Automatic depression recognition by intelligent speech signal processing: A systematic survey. *CAAI Trans. Intell. Technol.*, 2023, no. 8(3), pp. 701–711. doi:10.1049/cit2.12113
11. Velichko A., Karpov A. Analytical survey of automatic systems for depression detection by speech. *Informatics and Automation*, 2021, vol. 20, no. 3, pp. 497–529 (In Russian). doi:10.15622/ia.2021.3.1
12. Ringeval F., Schuller B., Valstar M., Cummins N., Cowie R., Tavabi L., Schmitt M., Alisamir S., Amiriparian S., Messner E.-M., Song S., Liu S., Zhao Z., Malloj-Ragolta A., Ren Z., Soleymani M., Pantic M. AVEC 2019 Workshop and Challenge: State-of-mind, detecting depression with AI, and cross-cultural affect recognition. *Proc. of the 9th ACM Intern. Work-*

- shop on Audio/visual Emotion Challenge (AVEC '19), Nice, France, 2019, pp. 3–12. doi:10.1145/3347320.3357688
13. Sadeghi M., Egger B., Agahi R., Richer R., Capito K., Rupp L. H., Schindler-Gmelch L., Berking M., Eskofier B. M. Exploring the capabilities of a language model-only approach for depression detection in text data. *Proc. of 2023 IEEE EMBS Intern. Conf. on Biomedical and Health Informatics (BHI)*, Pittsburgh, USA, 2023, pp. 1–5. doi:10.1109/BHI58575.2023.10313367
  14. Velichko A. N. *Metody i programmaja sistema integralnogo analiza destruktivnyh paralingvističeskikh javlenij v razgovornoj reči*. Dis. kand. tekhn. nauk [Methods and software for integral analysis of destructive paralinguistic phenomena in colloquial speech. PhD Tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, SPb FIC RAN, 2023. 136 p. (In Russian).
  15. Velichko A. N., Karpov A. A. An approach and software system for integral analysis of destructive paralinguistic phenomena in colloquial speech. *Informacionno-upravljaiušchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2023, no. 4, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/684-8853-2023-4-2-11, EDN: FHUUWJ
  16. Gratch J., Artstein R., Lucas G. M., Stratou G., Scherer S., Nazarian A., Wood R., Boberg J., DeVault D., Marsella S., Traum D., Rizzo S., Morency L.-P. The distress analysis interview corpus of human and computer interviews. *Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Language Resources and Evaluation (LREC'14)*, Reykjavik, Iceland, 2014, pp. 3123–3128.
  17. Ravi V., Wang J., Flint J., Alwan A. Fraug: A frame rate based data augmentation method for depression detection from speech signals. *Proc. of ICASSP 2022–2022 IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Singapore, 2022, pp. 6267–6271. doi:10.1109/ICASSP43922.2022.9746307
  18. Bailey A., Plumbley M. D. Gender bias in depression detection using audio features. *Proc. of 2021 29th European Signal Processing Conf. (EUSIPCO)*, Dublin, Ireland, 2021, pp. 596–600. doi:10.23919/EUSIPCO54536.2021.9615933
  19. Radford A., Kim J. W., Xu T., Brockman G., McLeavey C., Sutskever I. Robust speech recognition via large-scale weak supervision. *Proc. of the 40th Intern. Conf. on Machine Learning (ICML'23)*, Honolulu, Hawaii, 2023, no. 202, pp. 28492–28518. doi:10.5555/3618408.3619590
  20. Bredin H. Pyannote.audio 2.1 speaker diarization pipeline: principle, benchmark, and recipe. *Proc. of INTER-SPEECH-2023*, Dublin, Ireland, 2023, pp. 1983–1987. doi:10.21437/Interspeech.2023-105
  21. Boersma P. Praat, a system for doing phonetics by computer. *Glot International*, 2001, no. 5(9/10), pp. 341–345.
  22. Eyben F., Scherer K. R., Schuller B. W., Sundberg J., Andre E., Busso C., Devillers L. Y., Epps J., Laukka P., Narayanan S. S., Truong K. P. The Geneva Minimalistic Acoustic Parameter Set (GeMAPS) for voice research and affective computing. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2015, no. 7(2), pp. 190–202. doi:10.1109/TAFFC.2015.2457417
  23. Huang G., Liu Z., Van Der Maaten L., Weinberger K. Q. Densely connected convolutional networks. *Proc. of 2017 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, Hawaii, 2017, pp. 2261–2269. doi:10.1109/CVPR.2017.243
  24. Arik S. O., Pfister T. TabNet: Attentive interpretable tabular learning. *Proc. of the AAAI Conf. on Artificial Intelligence*, Virtual Event, 2019, vol. 35, no. 8, pp. 6679–6687. doi:10.1609/aaai.v35i8.16826
  25. Ray A., Kumar S., Reddy R., Mukherjee P., Garg R. Multi-level attention network using text, audio and video for depression prediction. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/visual Emotion Challenge (AVEC '19)*, Nice, France, 2019, pp. 81–88. doi:10.1145/3347320.3357697
  26. Makiuchi M. R., Warnita T., Uto K., Shinoda K. Multimodal fusion of BERT-CNN and Gated CNN representations for depression detection. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/visual Emotion Challenge (AVEC '19)*, Nice, France, 2019, pp. 55–63. doi:10.1145/3347320.3357694
  27. Velichko A., Markitantov M., Kaya H., Karpov A. Complex paralinguistic analysis of speech: Predicting gender, emotions and deception in a hierarchical framework. *Proc. of INTERSPEECH-2022*, Incheon, Korea, 2022, pp. 4735–4739. doi:10.21437/Interspeech.2022-11294
  28. Ushakov I. B., Bubeev Yu. A., Syrkin L. D., Karpov A. A., Polyakov A. V., Ivanov A. V., Usov V. M. Remote tele-counseling in primary healthcare for screening of anxiety-depressive disorders with a feedback loop from the patient. *System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2023, vol. 22, no. 4, pp. 140–153 (In Russian). doi:10.36622/VSTU.2023.22.4.022

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.



## Адаптивное управление роботами для работы в условиях действия высоких температур

Р. В. Рудаков<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0009-0000-8345-2800](https://orcid.org/0009-0000-8345-2800)

М. В. Сержантова<sup>б</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0009-0006-7629-7316](https://orcid.org/0009-0006-7629-7316)

В. И. Бойков<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0003-2561-0270](https://orcid.org/0000-0003-2561-0270), [viboikov@mail.ru](mailto:viboikov@mail.ru)

А. Б. Бушуев<sup>б</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0001-7826-4645](https://orcid.org/0000-0001-7826-4645)

О. С. Нуйя<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0009-0005-7857-3137](https://orcid.org/0009-0005-7857-3137)

Ю. В. Литвинов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0003-0714-4624](https://orcid.org/0000-0003-0714-4624)

С. В. Быстров<sup>б</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-6900-0506](https://orcid.org/0000-0002-6900-0506)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

<sup>б</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, РФ

**Введение:** специфика работы роботов-манипуляторов в высокотемпературных зонах с точки зрения управления связана с изменением параметров модели их движения. Обеспечение качественной и эффективной работы роботов в таких условиях возможно при использовании адаптивных систем управления, способных подстраиваться под изменяющиеся условия работы и парящих воздействия окружающей среды. **Цель:** для нелинейного нестационарного объекта синтезировать адаптивный регулятор с эталонной моделью и обобщенным пропорционально-интегральным законом регулирования, работающий в скользящем режиме. **Результаты:** показано, что движение робота-манипулятора может быть задано нелинейным уравнением с характерной нелинейностью, удовлетворяющей секторным ограничениям. Для принятой модели движения робота синтезирован адаптивный пропорционально-интегральный закон управления, использующий скользящий режим работы с настраиваемой поверхностью переключения. Основное отличие процедуры синтеза от существующих решений связано с использованием в законе управления дополнительной интегральной компоненты по сигналу рассогласования и с рассмотрением сходимости алгоритма по части переменных вектора состояния. Моделирование показало, что за счет подстройки параметров поверхности переключения установившаяся ошибка стремится к нулю во всех точках рабочего пространства робота. Показатели качества работы системы управления в области неопределенности параметров движения соответствуют качеству, заданному эталонной моделью. **Практическая значимость:** синтезированный регулятор формирует управление в виде бинарного релейного сигнала, что обеспечивает работу силовых модулей в ключевом режиме. При практической реализации это позволяет добиться максимальной энергетической эффективности и минимальных габаритных размеров устройства управления.

**Ключевые слова** – робот-манипулятор, адаптивное управление, скользящий режим, пропорционально-интегральное управление.

**Для цитирования:** Рудаков Р. В., Сержантова М. В., Бойков В. И., Бушуев А. Б., Нуйя О. С., Литвинов Ю. В., Быстров С. В. Адаптивное управление роботами для работы в условиях действия высоких температур. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 4, с. 12–23. doi:10.31799/1684-8853-2024-4-12-23, EDN: SMXJVV

**For citation:** Rudakov R. V., Serzhantova M. V., Boikov V. I., Bushuev A. B., Nuyya O. S., Litvinov Y. V., Bystrov S. V. Adaptive control of robots for high-temperature operations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 4, pp. 12–23 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-4-12-23, EDN: SMXJVV

### Введение

Специфика работы роботов-манипуляторов в высокотемпературных зонах с точки зрения управления связана с изменением параметров их модели движения. В первую очередь это изменение параметров электроприводов: активного сопротивления обмоток статора и ротора, магнитных свойств материалов. Кроме того, в механизмах изменяются силы сухого и вязкого трения, изменяются КПД подвижных сочленений и т. д. Для робота-манипулятора характерно также изменение массы переносимой детали в зависимости от выполняемой работы и, как следствие, изменение моментов инерции его подвижных ча-

стей. Обеспечение качественной и эффективной работы в условиях параметрической неопределенности возможно при применении адаптивных систем управления, способных парировать негативное влияние окружающей среды на показатели качества функционирования роботов.

В данной работе на простом примере управления одним подвижным звеном рассмотрены основные особенности синтеза адаптивного регулятора, характерные для роботов-манипуляторов. Учтено базовое требование современной электронной преобразовательной техники: силовые элементы должны работать в ключевом режиме. Этим обеспечивается высокий КПД силового преобразователя и его малые габариты.

Другими словами, требуется, чтобы выходной управляющий сигнал регулятора либо был релейным, либо имел широтно-импульсную модуляцию. Поэтому из большого разнообразия адаптивных систем был выбран способ адаптации с эталонной моделью и обобщенным пропорционально-интегральным регулятором, работающим в скользящем режиме. Синтезированный регулятор формирует релейный двухпозиционный управляющий сигнал.

Предполагается, что желаемая траектория движения робота в операционном пространстве задана последовательностью реперных точек. В этом случае задающий сигнал системы можно рассматривать как последовательность ступенчатых функций, а движение робота представлять суммой реакций на ступенчатые входные воздействия. При этом считаем, что конструкция робота рассчитана на работу в высокотемпературных зонах и физические неисправности не возникают.

### Обзор существующих решений

Изменение параметров роботов в процессе функционирования влечет за собой ухудшение качества их работы. Для борьбы с подобным явлением в теории управления разработан ряд методов, базирующихся на теории инвариантности, теории комбинированного управления, теории адаптации, теории нечеткого управления и др. Основной особенностью динамической модели робота является ее существенная нелинейность и параметрическая нестационарность [1]. Нелинейность характеристик робота порождает целый ряд проблем, связанных с принципиальной возможностью определения параметров объекта в процессе его функционирования [2, 3].

Неопределенность параметров модели объекта управления зачастую можно рассматривать как некоторое внешнее возмущение, действующее на объект. В этой связи интересен обзор методов оценки возмущений, построенных на основе теории наблюдателей [4, 5].

В данной статье рассматриваются особенности управления роботом, представляемым нелинейной непрерывной моделью, с использованием адаптивного регулятора с настраиваемыми переменными параметрами. Некоторые алгоритмы адаптации, применимые в системах управления роботами-манипуляторами, рассмотрены в работах [6–10]. Как правило, рассматриваемые регуляторы формируют либо пропорциональные, либо комбинированные релейно-пропорциональные сигналы управления, приводящие к снижению КПД управляющих устройств. Синтезируемый в работе регулятор

формирует исключительно релейный сигнал управления.

Для обеспечения работы в скользящем режиме с заданным качеством функционирования необходимо, чтобы изображающая точка системы двигалась в фазовом пространстве по поверхности переключения, зависящей от параметров объекта. При неопределенности параметров объекта управления поверхность переключения оказывается также неопределенной. В этой связи является актуальной задача адаптивной настройки поверхности переключения в процессе функционирования. Анализ способов решения указанной задачи приводится, например, в работах [11, 12]. Следует отметить, что в обеих работах для подстройки параметров поверхности переключения использован известный алгоритм скоростного градиента.

В настоящей работе рассмотрены основные особенности синтеза адаптивного регулятора с эталонной моделью и подстраиваемой поверхностью переключения для однозвенного роботоманипулятора. Робот представлен нелинейной непрерывной моделью известной структуры с медленно меняющимися неопределенными параметрами. Подстройка параметров выполняется по методу скоростного градиента. Основное отличие рассматриваемой процедуры синтеза регулятора от процедуры, описанной в работе [12], связано с использованием в законе управления дополнительной интегральной компоненты по сигналу рассогласования. В частности, указанное отличие приводит к сходимости алгоритма по части переменных вектора состояния системы.

### Модель движения звена робота-манипулятора с электродвигателем постоянного тока

Основные проблемы и особенности управления роботами-манипуляторами в условиях неопределенности их параметров рассмотрим на примере простейшего однозвенного робота, перемещающего груз заранее неизвестной массы.

Рассмотрим звено робота, состоящее из самого звена, электродвигателя постоянного тока и редуктора. Считаем, что звено закреплено на выходном валу редуктора. Таким образом, электропривод создает вращающий момент  $M_0$ , а поворачивающееся звено робота создает момент нагрузки  $M_H$ .

При выводе модели движения звена робота будем придерживаться следующих допущений:

– привод устанавливается на звене, предшествующем вращаемому сочленению, поэтому

масса двигателя и масса редуктора не оказывают влияния на динамику рассматриваемого звена;

– рассматриваемое звено робота закреплено на выходном валу редуктора;

– момент инерции ротора двигателя и момент инерции редуктора учитываются в общей кинетической энергии рассматриваемого звена, т. е. приводятся к оси сочленения;

– скорости, ускорения и моменты сил приводятся к оси сочленения;

– редуктор считается обратимым;

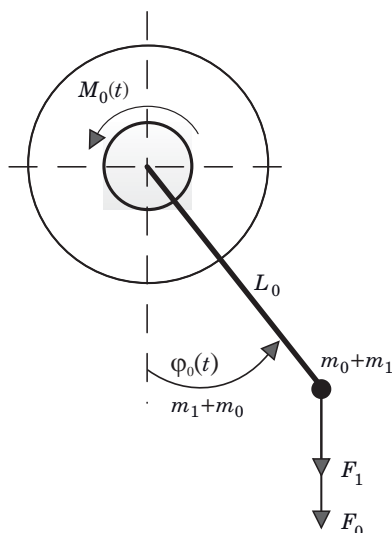
– люфт в редукторе отсутствует;

– редуктор считается абсолютно жестким.

Расчетная схема звена робота показана на рис. 1. Звено имеет длину  $L_0$  и массу  $m_0$ , которая приведена к дальнему от сочленения концу звена. В процессе функционирования к звену может подключаться внешняя масса  $m_1$ , которая обычно априорно неизвестна. Массы определяют силы веса  $F_0$  и  $F_1$  и, соответственно, момент нагрузки  $M_H(t)$ . Электропривод создает вращающий момент  $M_0(t)$ , под действием которого звено поворачивается на угол  $\varphi_0(t)$ . Угол отсчитывается от вертикали для того, чтобы состояние  $\varphi_0(t) = 0$  соответствовало устойчивому положению равновесия звена.

Для вывода уравнений движений робота в обобщенных координатах используем уравнение Лагранжа второго рода [13, 14]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$



■ **Рис. 1.** Расчетная схема звена робота-манипулятора  
 ■ **Fig. 1.** Calculation diagram of the robot manipulator link

где  $T(q_i, \dot{q}_i, t)$  – кинетическая энергия системы;  $q_i$  – обобщенные координаты;  $Q_i$  – обобщенная сила. Отметим, что уравнение (1) описывает движение механической системы, подчиненной идеальным связям.

Уравнение (1) для рассматриваемого объекта принимает вид

$$(J_0 + J_1) \ddot{\varphi}(t) + K_0 \dot{\varphi}(t) + (m_0 + m_1) g L_0 \sin \varphi(t) = M_0(t), \quad (2)$$

где  $J_0, J_1$  – моменты инерции звена робота и переносимой детали соответственно;  $K_0$  – коэффициент вязкого трения;  $g$  – ускорение свободного падения.

В частности, уравнение содержит параметры, зависящие от массы  $m_1$  переносимой детали, и поэтому априорно неизвестны.

Вращающий момент  $M_0(t)$  создается электроприводом постоянного тока.

Если сформированные регулятором токи в обмотках управления считать известными (могут быть измерены), то математическое описание электродвигателя постоянного тока можно упростить и представить следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} L_{я} \frac{dI_{я}(t)}{dt} + R_{я} I_{я}(t) + e(t) &= u_{я}(t); \\ J \frac{d\omega(t)}{dt} &= M_{вр}(t) - M_H(t); \\ e(t) &= K_e \cdot \omega(t); \\ M_{вр}(t) &= K_M \cdot I_{я}(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $L_{я}, R_{я}$  – индуктивность и активное сопротивление обмотки якоря;  $I_{я}(t), u_{я}(t)$  – сила тока и напряжение в цепи якоря;  $J$  – суммарный момент инерции ротора и редуктора, приведенный к валу двигателя;  $\omega(t)$  – угловая скорость вращения ротора двигателя;  $M_{вр}(t), M_H(t)$  – момент вращения и момент нагрузки на валу двигателя;  $K_e, K_M$  – коэффициенты передачи двигателя по напряжению и по моменту (конструктивные параметры).

В уравнениях (3) момент инерции  $J$ , моменты  $M_{вр}$  и  $M_H$  приведены к ротору двигателя. Так как двигатель передает вращение на манипулятор через редуктор с коэффициентом редукции  $i$ , то требуется согласование переменных уравнений (2) и (3).

За счет редуктора скорость вращения ротора связана со скоростью вращения манипулятора соотношением

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{1}{i} \omega(t).$$



Вращающий момент на выходе редуктора

$$M_0(t) = \eta \cdot i \cdot M_{\text{вр}}(t),$$

где  $\eta$  – КПД редуктора.

Суммарный момент инерции  $J$  ротора и момент инерции редуктора, приведенные к оси сочленения, увеличивают общий момент инерции звена:

$$J_0 = m_0 L_0^2 + Ji^2.$$

В результате с учетом момента инерции редуктора объединение уравнений (2) и (3) приводит к следующей модели звена робота:

$$\begin{aligned} L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}(t)}{dt} + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}(t) + i \cdot K_e \cdot \dot{\varphi}(t) &= u_{\text{я}}(t); \\ (J_0 + J_1) \ddot{\varphi}(t) + K_0 \dot{\varphi}(t) + (m_0 + m_1)gL_0 \sin \varphi(t) &= \\ &= i \cdot K_M \cdot I_{\text{я}}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Следует отметить, что параметры базовой конфигурации робота без нагрузки и при обычной температуре могут быть определены заранее и их можно считать известными. В процессе работы при изменении температуры часть параметров подвержены медленным изменениям, и их значения оказываются заранее неизвестными (например, сопротивление якорной цепи, коэффициент вязкого трения, КПД редуктора и др.), однако перечисленные параметры можно считать условно постоянными. Параметры  $J_1$  и  $m_1$  обычно неизвестны и могут изменяться скачкообразно в процессе функционирования, оставаясь постоянными достаточно длительное время при перемещениях манипулятора.

Используя терминологию пространства состояний (физический базис), уравнения (4) запишем в виде [15, 16]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -a_{22} & a_{23} \\ 0 & -a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ -b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \sin(x_1(t)) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix} u(t); \\ y(t) &= [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $x_1(t) = \varphi(t)$ ,  $x_2(t) = \dot{\varphi}(t)$ ,  $x_3(t) = I_{\text{я}}(t)$  – компоненты вектора состояния;  $y(t) = \varphi(t)$  – выход модели звена;

$$\begin{aligned} a_{22} &= \frac{K_0}{J_0 + J_1}, \quad a_{23} = \frac{\eta \cdot i \cdot K_M}{J_0 + J_1}, \quad a_{32} = \frac{i \cdot K_e}{L_{\text{я}}}, \\ a_{33} &= \frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}, \quad b_2 = \frac{(m_0 + m_1)gL_0}{J_0 + J_1}, \quad b_3 = \frac{1}{L_{\text{я}}} \end{aligned}$$

– параметры модели.

При задании численных значений параметров моделей (4), (5) следует учитывать энергетические соотношения, связывающие мощность выбранного электродвигателя и мощность, требуемую для перемещения звена с необходимыми скоростью и ускорением в условиях ограничения величины переносимой детали массой  $m_1$ . Так, при моделировании системы в среде MatLab были использованы численные значения электропривода постоянного тока мощностью 100 Вт. Напряжение питания двигателя 24 В, активное сопротивление цепи якоря двигателя  $R_{\text{я}} = 1,16$  Ом, коэффициент передачи по моменту 0,019 Н·м/А. Длина звена робота  $L_0 = 0,5$  м, масса  $m_0 = 1,5$  кг. Коэффициент передачи редуктора  $i = 80$ , КПД  $\eta = 0,7$ , коэффициент вязкого трения  $K_0 = 0,031$  Н·м·с. Максимальная масса переносимой детали 0,5 кг.

### Линеаризованная модель робота и синтез базового закона управления

Разработка регулятора, работающего в скользящем режиме, обычно выполняется в два этапа. На первом этапе определяется поверхность скольжения  $s(x)$ , движение по которой задает «желаемую» (эталонную) динамику системы. На втором этапе разрабатывается адаптивный регулятор с переменной структурой, который обеспечивает достижение поверхности скольжения за конечное время при заданной области начальных условий [17].

Специфика нелинейного уравнения (5) заключается в том, что нелинейность  $f(\varphi(t)) = \sin(\varphi(t))$  в области изменения  $|\varphi(t)| < n$  относится к нелинейностям, удовлетворяющим секторному условию  $\varphi(t) \cdot f(\varphi(t)) \leq k\varphi^2$ . О динамических свойствах таких систем можно судить, исследуя динамику линеаризованной системы (так называемой системы первого приближения). В частности, известно, что если тривиальное решение линеаризованной системы экспоненциально устойчиво, то тривиальное решение исходной нелинейной системы будет устойчиво асимптотически [17, 18]. Используем указанную теорему для синтеза базового закона управления нелинейной системы.

Зададим параметры базовой конфигурации робота без нагрузки и при обычной температуре, которые считаем известными. Линеаризуем

уравнение (5) в точке  $\varphi = 0$  и запишем получившееся линейное уравнение в регулярной форме

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{10}(t) &= \mathbf{A}_{11}^0 \mathbf{X}_{10}(t) + \mathbf{A}_{12}^0 \mathbf{X}_{20}(t); \\ \dot{\mathbf{X}}_{20}(t) &= \mathbf{A}_{21}^0 \mathbf{X}_{10}(t) + \mathbf{A}_{22}^0 \mathbf{X}_{20}(t) + \mathbf{B}_2^0 u(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\mathbf{X}_{10}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{X}_{20}(t) = \mathbf{x}_3(t)$  – переменные состояния;  $\mathbf{A}_{11}^0, \mathbf{A}_{12}^0, \mathbf{A}_{21}^0, \mathbf{A}_{22}^0, \mathbf{B}_2^0$  – матрицы с известными постоянными параметрами линеаризованной системы. Для модели (5) указанные матрицы равны:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{11}^0 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_2 & -a_{22} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_{12}^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ a_{23} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{A}_{21}^0 &= [0 - a_{32}]; \quad \mathbf{A}_{22}^0 = -a_{33}; \quad \mathbf{B}_2^0 = b_3. \end{aligned}$$

Нетрудно проверить, что объект (6) полностью управляем. Закон управления для работы в скользящем режиме будем искать в виде

$$u(t) = -\gamma \cdot \text{sign}(s(X(t))), \quad (7)$$

где  $\gamma$  – максимальное значение управляющего сигнала, подаваемого на исполнительное устройство (в примере – электродвигатель,  $\gamma = 24$  В);  $s(X(t)) = K_1 \cdot X_1(t) + X_2(t) = 0$  – поверхность переключения.

Непосредственное применение закона управления (7) в системе управления роботом-манипулятором при отработке постоянного задающего воздействия  $g(t) = \text{const} \neq 0$  (движение к очередной реперной точке заданной траектории) приводит к возникновению ненулевой установившейся ошибки. Устранить установившуюся ошибку в случае точно известных параметров объекта можно путем масштабирования величины задающего воздействия  $g(t)$ . Однако при наличии изменяющихся и неизвестных параметров объекта такой подход оказывается малопродуктивным. Поэтому для компенсации статической ошибки слежения введем в закон управления интегральную составляющую по ошибке. Для этого будем рассматривать расширенные векторы состояния объекта (6) в виде

$$\mathbf{X}_1(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) \\ \mathbf{X}_{10}(t) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}_2(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{X}_{20}(t) \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{X}_{10}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{X}_{20}(t) = \mathbf{x}_3(t)$  – векторы состояния объекта;  $x_i(t)$  – дополнительная интегральная компонента от выходной переменной:  $\dot{x}_i(t) = x_1(t)$ .

Соответственно, должны быть изменены размеры матриц  $\mathbf{A}_{11}^0, \mathbf{A}_{12}^0, \mathbf{A}_{21}^0, \mathbf{A}_{22}^0, \mathbf{B}_2^0$ .

При движении по поверхности переключения из условия  $s(X) = 0$  следует, что

$$\mathbf{X}_2(t) = -K_1 \mathbf{X}_1(t). \quad (8)$$

Выполнение условия (8) требует, чтобы движения системы (6) подчинялись редуцированной системе уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_1^*(t) &= \mathbf{A}_{11}^* \mathbf{X}_1^*(t) - \mathbf{A}_{12}^* U(t), \\ U(t) &= \mathbf{K}_1^* \mathbf{X}_1^*(t). \end{aligned} \quad (9)$$

Выбор параметров матрицы  $\mathbf{K}_1^*$  обратной связи для (9) произведем из условия экспоненциальной устойчивости системы. Экспоненциальная устойчивость определяет наиболее сильные притягивающие свойства для положения равновесия.

Для этого, следуя результатам работы, зададим желаемую степень сходимости  $\lambda > 0$  и интегральный критерий качества функционирования системы (9) в виде

$$J = \int_0^t (\mathbf{X}_1^{*T} \mathbf{Q} \mathbf{X}_1^* + U^T R U) dt, \quad (10)$$

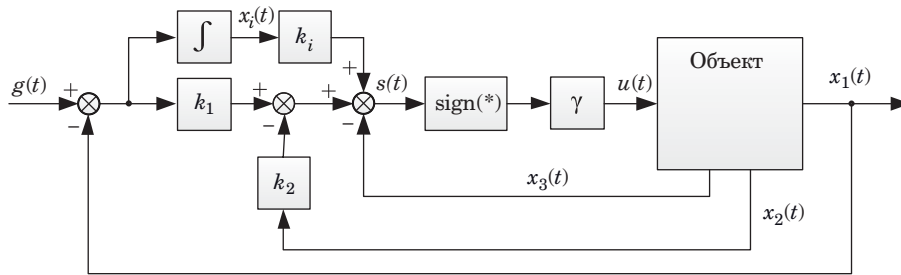
где  $\mathbf{Q}$  – симметричная, положительно определенная матрица;  $R = r$  – в данной модели положительное число, определяющее штрафы по состоянию и управлению. Искомое управление  $U$  для системы (9) находится на основе второго метода Ляпунова путем решения матричного уравнения типа Риккати относительно симметричной положительно определенной матрицы  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{A}_{11}^{*T} \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_{11}^* - 2\mathbf{P} \mathbf{A}_{12}^* R^{-1} \mathbf{A}_{12}^* \mathbf{P} + \mathbf{Q} + 2\lambda \mathbf{P} = 0; \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_1 = R^{-1} \mathbf{A}_{12}^* \mathbf{P}. \quad (12)$$

Получившаяся в результате схема базовой системы управления манипулятором показана на рис. 2. Манипулятор обрабатывает входную последовательность кусочно-постоянных входных воздействий (последовательность реперных точек), определяющих заданную траекторию движения робота с нулевой установившейся ошибкой [19].

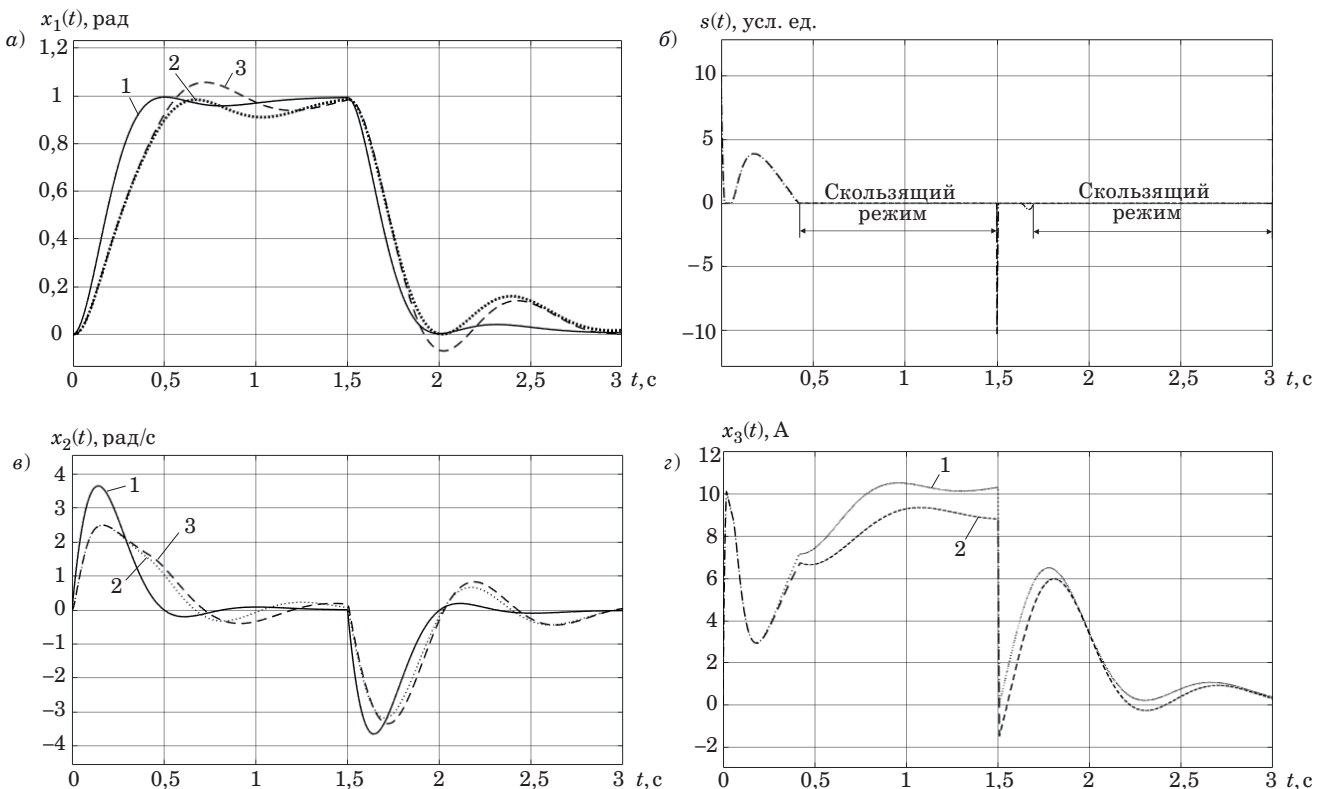
Проверку сходимости траекторий движения замкнутой системы к поверхности переключения  $s(X) = 0$  удобно осуществлять, наблюдая изменение скалярной переменной  $s(t)$ . При функционировании робота эта переменная должна сходиться к нулю за конечное время, что означает факт возникновения в системе устойчивого скользящего режима. На рис. 3, а показаны реакции  $x_1(t)$  систем на кусочно-постоянное за-



■ **Рис. 2.** Схема базовой системы управления роботом-манипулятором  
 ■ **Fig. 2.** Diagram of the basic control system of the robot manipulator

дающее воздействие  $g(t) = 1(t) - 1(t - 1,5)$  при базовых значениях параметров регулятора и объекта управления. Кривая 1 – изменение угла поворота редуцированной эталонной системы (9) с линейным законом управления; кривая 2 – изменение угла поворота линеаризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 3 – изменение угла поворота нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). Видно, что кривые подобны и выходные

сигналы стремятся к значению задающего воздействия (т. е. ошибка отработки стремится к нулю). На рис. 3, б показаны кривые  $s(t)$  линеаризованной и нелинейной систем. Кривые почти совпадают. В обеих системах возникает устойчивый скользящий режим за конечное время функционирования. На рис. 3, в показаны реакции  $x_2(t)$  систем при том же кусочно-постоянном задающем воздействии. Кривая 1 – изменение угловой скорости редуцированной эталонной си-



■ **Рис. 3.** Динамические свойства замкнутой системы при базовых значениях параметров: а – переходные характеристики эталонной 1, линеаризованной 2 и нелинейной 3 систем; б – кривые изменения переменной  $s(X)$ ; в – сравнение угловых скоростей эталонной 1, линеаризованной 2 и нелинейной 3 систем; г – сравнение токов линеаризованной 1 и нелинейной 2 систем

■ **Fig. 3.** Dynamic properties of a closed system at basic parameter values: а – transient characteristics of the reference 1, linearized 2 and nonlinear 3 systems; б – curves of change of the variable  $s(X)$ ; в – comparison of angular velocities of the reference 1, linearized 2 and nonlinear 3 systems; г – comparison of currents of linearized 1 and nonlinear 2 systems

стемы (9) с линейным законом управления; кривая 2 – изменение угловой скорости линейризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 3 – изменение угловой скорости нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). Кривые у расширенных систем подобны кривой в редуцированной эталонной системе. На рис. 3, *з* показаны реакции  $x_3(t)$  систем при том же кусочно-постоянном задающем воздействии. Кривая 1 – изменение силы тока в электроприводе линейризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 2 – изменение силы тока в электроприводе нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). У эталонной системы эта переменная отсутствует, поэтому задача приведения переменных к одинаковому значению не ставится. Из рис. 3 видно, что переменные  $x_3(t)$  линейризованной и нелинейной систем сходятся к различным установившимся значениям.

### Адаптивное управление в условиях неопределенности параметров объекта

Полученную по уравнениям (9) с линейным законом управления и параметрами из уравнений (11) и (12) базовую редуцированную модель поведения системы будем рассматривать как эталонную. Целью данного этапа синтеза регулятора является определение закона изменения параметров поверхности переключения (8), стабилизирующего динамические показатели качества расширенной нелинейной системы управления в условиях неопределенности части ее параметров. При этом нас будет интересовать только изменение переменных  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  модели (5), относительно которых потребуем сходимость их поведения к поведению редуцированной эталонной модели (9) с обратной связью (12).

Изменение параметров объекта управления в процессе функционирования требует подстройки параметров поверхности переключения (8) [20, 21]. В частности, одним из возможных подходов к решению данной задачи является метод скоростного градиента.

Введем вектор отклонения движения системы от эталонного поведения по интересующим переменным

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{X}_1(t) - \mathbf{C} \cdot \mathbf{X}_1^*(t),$$

где  $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}$  – матрицы «выходов» систем, определяющие требуемые переменные. Следуя работе, введем целевой функционал, характеризующий различия в поведении систем:

$$\mathbf{J} = \mathbf{E}^T(t) \mathbf{H} \mathbf{E}(t),$$

где  $\mathbf{H}$  – симметричная положительно определенная матрица. В рассматриваемом примере размерность вектора  $\mathbf{E}$  равна двум.

Тогда, в соответствии с методом скоростного градиента, закон изменения параметров поверхности переключения будет иметь вид

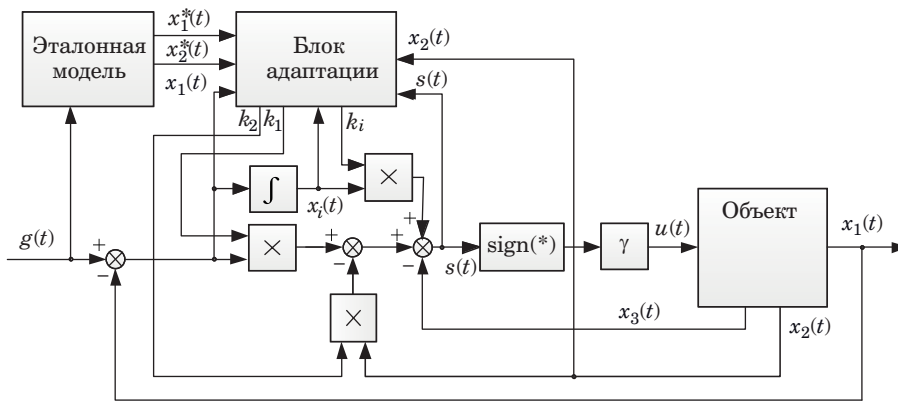
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{K}}_1 &= -\alpha \mathbf{A}_{12}^{*T} \mathbf{C}^T \mathbf{H} \mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{X}_1^T(t); \\ \mathbf{K}_1(0) &= \mathbf{K}_1^*. \end{aligned} \quad (13)$$

В законе управления (13) использована матрица базовой конфигурации робота с известными параметрами. Кроме того, в качестве весовой матрицы  $\mathbf{H}$  выберем матрицу  $\mathbf{H} = \mathbf{C} \mathbf{P} \mathbf{C}^T$ , где  $\mathbf{P}$  – положительно определенная матрица, полученная при синтезе параметров закона управления базовой модели и гарантирующая ее устойчивость. В этом случае для сходимости процедуры подстройки параметров (13) требуется, чтобы матрица неизвестных параметров  $\mathbf{A}_{12}$  удовлетворяла неравенству  $\mathbf{A}_{12}^T \cdot \mathbf{A}_{12}^* > 0$ , которое в рассматриваемом примере сводится к положительности значений неопределенных параметров матрицы  $\mathbf{A}_{12}$ .

Итоговая схема адаптивной системы управления показана на рис. 4. Адаптивный регулятор содержит редуцированную линейную эталонную модель системы по уравнениям (9) с базовыми параметрами поверхности переключения из решения (11), (12). Блок адаптации в соответствии с уравнением (13) вычисляет текущие параметры поверхности переключения, реализуемые адаптивным регулятором по уравнению (7). Так как подстройка параметров (13) требует работы системы в скользящем режиме, в блок адаптации добавлена проверка условия его работы  $S(\mathbf{X}) < \Delta$ , где  $\Delta > 0$ .

Как и в случае базовой конфигурации системы, переменная  $s(\mathbf{X})$  при функционировании робота должна сходиться к нулю за конечное время, что означает факт возникновения в системе устойчивого скользящего режима. Кроме того, скалярная переменная  $w(t) = \mathbf{A}_{12}^{*T} \mathbf{C}^T \mathbf{H} \mathbf{E}(t)$  закона адаптации (13) при постоянном входном воздействии должна сходиться к нулю, что означает факт завершения процесса адаптации. Эти две скалярные переменные являются удобными индикаторами корректного функционирования регулятора.

На рис. 5, *а* показаны реакции  $x_1(t)$  систем на кусочно-постоянное задающее воздействие  $g(t) = 1(t) - 1(t - 3)$  при переносе роботом детали массой  $m_1 = 0,5$  кг, изменившихся активном сопротивлении цепи якоря двигателя  $R_a = 1,66$  Ом и КПД редуктора  $n = 0,6$ . Кривая 1 показывает изменение угла поворота редуцированной эталонной системы (9) с линейным законом управ-

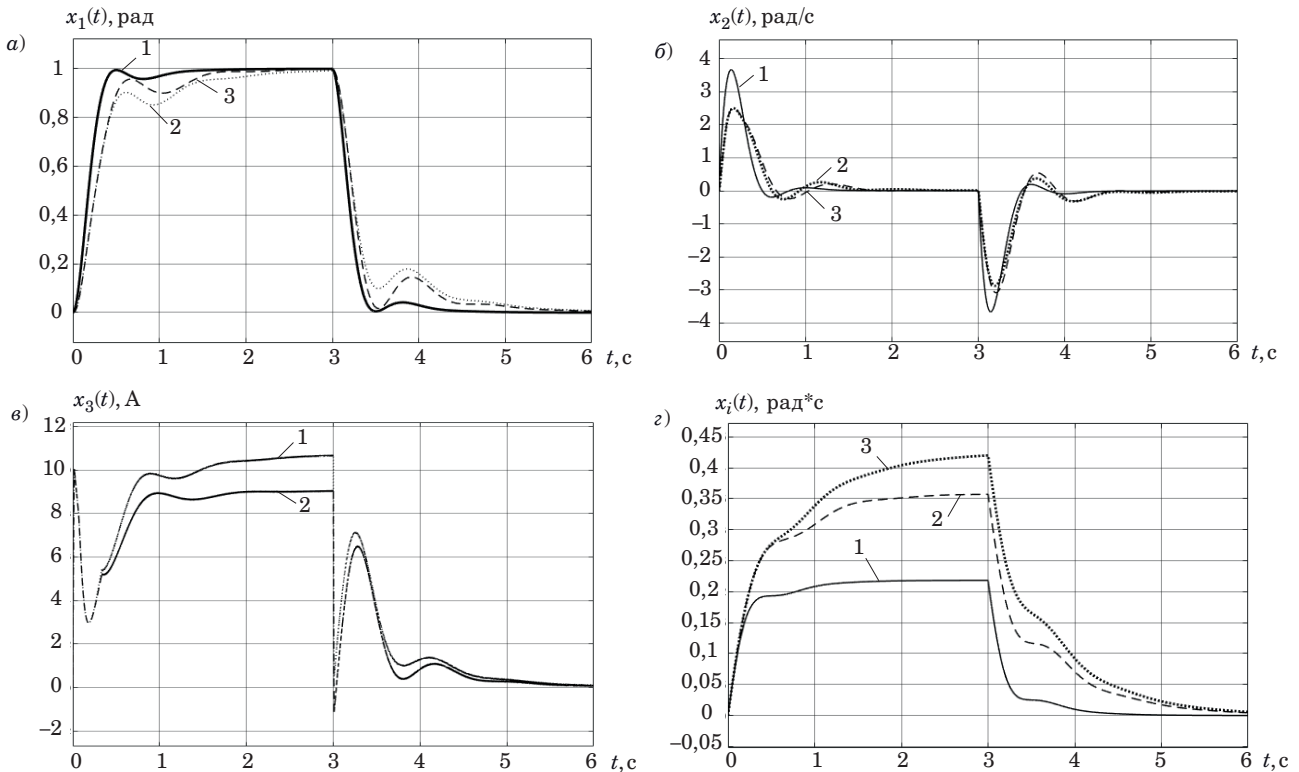


■ **Рис. 4.** Схема адаптивной системы управления манипулятором  
 ■ **Fig. 4.** Diagram of the adaptive manipulator control system

ления; кривая 2 — изменение угла поворота линеаризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 3 — изменение угла поворота нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). Видно, что кривые подобны и выходные сигналы стремятся к значению

задающего воздействия (т. е. ошибка обработки стремится к нулю). Длительность переходных процессов в системе увеличилась из-за влияния процесса адаптации параметров.

На рис. 5, б показаны реакции  $x_2(t)$  систем при том же кусочно-постоянном задающем



■ **Рис. 5.** Динамические свойства замкнутой адаптивной системы: а — переходные характеристики эталонной 1, линеаризованной 2 и нелинейной 3 систем; б — кривые изменения переменной  $s(t)$ ; в — сравнение угловых скоростей линеаризованной 1 и нелинейной 2 систем; з — сравнение интегральных компонент управления эталонной 1, линеаризованной 2 и нелинейной 3 систем

■ **Fig. 5.** Dynamic properties of a closed adaptive system: а — transient characteristics of the reference 1, linearized 2 and nonlinear 3 systems; б — curves of change of the variable  $s(t)$ ; в — comparison of angular velocities of linearized 1 and nonlinear 2 systems; з — comparison of the integrated control components of the reference 1, linearized 2 and nonlinear 3 systems

воздействии. Кривая 1 показывает изменение угловой скорости редуцированной эталонной системы (9) с линейным законом управления и базовыми значениями параметров [22, 23]; кривая 2 – изменение угловой скорости линейризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 3 – изменение угловой скорости нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). Кривые изменения переменных у расширенных систем подобны кривой в редуцированной эталонной системе. На рис. 5, в показаны реакции  $x_3(t)$  систем при том же кусочно-постоянном задающем воздействии. Кривая 1 – изменение силы тока в электроприводе линейризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 2 – изменение силы тока в электроприводе нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). У эталонной системы эта переменная отсутствует, поэтому задача приведения переменных к одинаковому значению не ставится. Из приведенного рисунка видно, что переменные  $x_3(t)$  линейризованной и нелинейной систем сходятся к различным установившимся значениям. Аналогично поведение дополнительных пере-

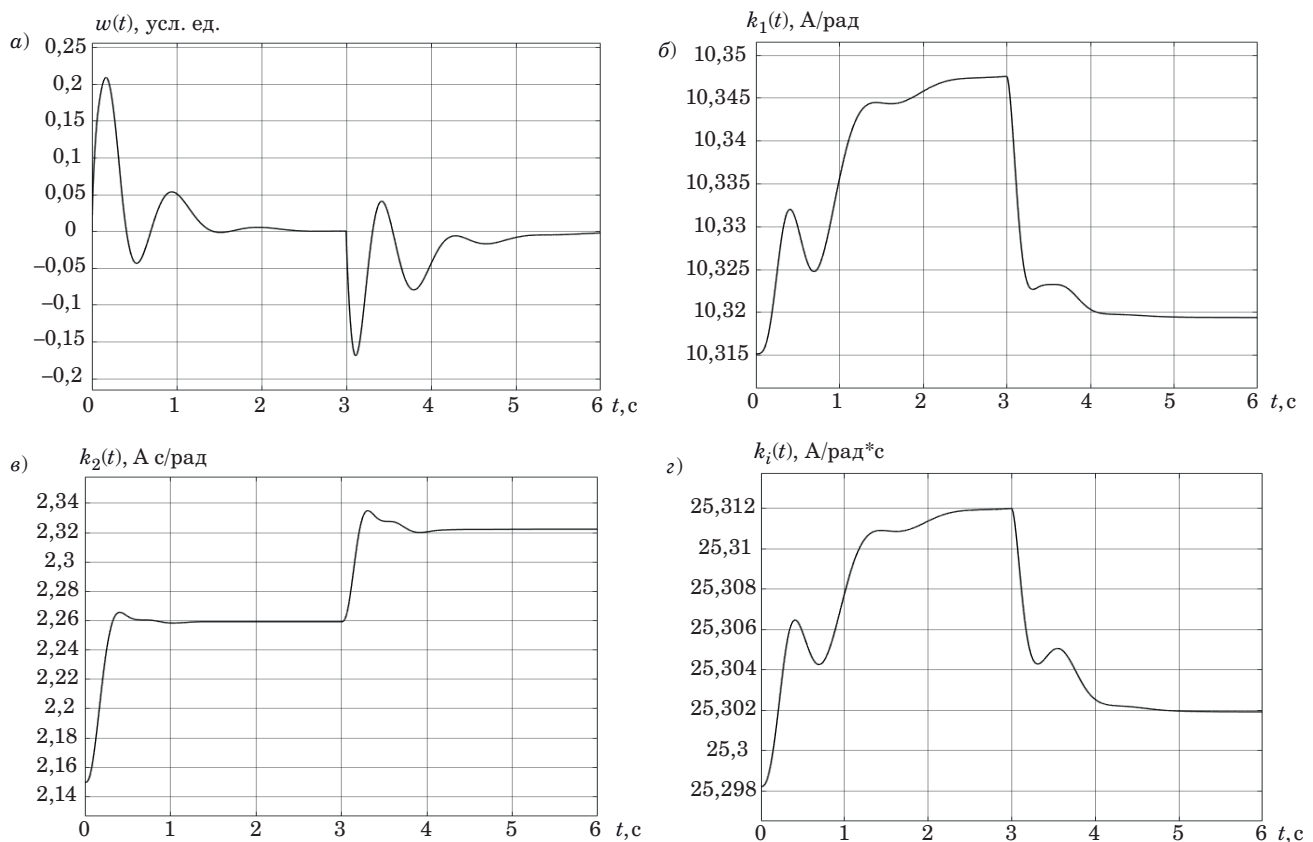
менных  $x_i(t)$  эталонной 1, линейризованной 2 и нелинейной 3 систем на рис. 5, з.

На рис. 6, а показана кривая индикатора процесса адаптации  $w(t)$  адаптивной нелинейной системы. Видно, что индикатор  $w(t)$  сходится к нулю, т. е. подстраиваемые параметры  $k_1(t)$ ,  $k_2(t)$  и  $k_i(t)$  стремятся к постоянным значениям. На рис. 6, б–г показаны кривые изменения параметров  $k_1(t)$ ,  $k_2(t)$  и  $k_i(t)$  нелинейной системы соответственно при обработке кусочно-постоянного задающего воздействия.

Подводя итог моделирования, выделим следующие особенности алгоритма управления.

1. Введение интегральной составляющей в закон управления позволило полностью скомпенсировать установившуюся ошибку при обработке постоянного задающего воздействия. За счет подстройки параметров поверхности переключения установившаяся ошибка стремится к нулю во всех точках рабочего пространства робота и при изменениях его параметров в широких пределах. При этом силовая электроника функционирует в ключевом режиме, обеспечивая высокий КПД.

2. Получено упрощенное управление алгоритма и расчета параметров робота благодаря



■ **Рис. 6.** Изменение параметров нелинейной системы при обработке ступенчатого воздействия: а – индикаторная переменная  $w(t)$ ; б–г – коэффициенты регулятора  $k_1(t)$ ,  $k_2(t)$  и  $k_i(t)$  соответственно

■ **Fig. 6.** Changing parameters of a nonlinear system when working out a stepwise effect: а – the indicator variable  $w(t)$ ; б–г – the coefficients of the regulator  $k_1(t)$ ,  $k_2(t)$  and  $k_i(t)$  respectively

использованию линеаризованных уравнений движений робота в качестве эталонной модели. Применение линеаризации обосновано секторными ограничениями, характерными для типовой нелинейности модели робота-манипулятора.

3. При номинальных значениях параметров робота в системе через небольшое конечное время возникает устойчивый скользящий режим. При возникновении скользящего режима начинает функционировать алгоритм адаптации, приводя показатели качества системы к показателям эталонной модели.

4. По графикам результатов моделирования можно сделать вывод, что алгоритм адаптации достаточно быстро сходится, т. е. приводит параметры поверхности переключения к установившимся значениям. За счет подстройки параметров происходит компенсация нежелательного влияния условий работы на показатели качества системы.

5. В качестве индикаторов успешной работы алгоритма удобно использовать скалярные переменные  $s(t)$  (регулятор силы тока) и  $w(t)$  (алгоритм адаптации). Равенство нулю переменной  $s(t)$  указывает на наличие в системе скользящего режима. Равенство нулю переменной  $w(t)$  указывает на сходимость подстраиваемых параметров поверхности переключения к постоянным значениям.

## Заключение

Адаптивные системы управления играют решающую роль в обеспечении безопасной и эф-

фективной работы роботов в высокотемпературных процессах. По мере дальнейшего развития технологий адаптивного управления ожидается, что такого типа алгоритмы будут занимать ведущее положение в системах управления роботами, используемых в различных отраслях промышленности.

В модели движения робота выделена характерная нелинейность, удовлетворяющая секторным ограничениям. Кроме того, из-за влияния внешней среды и условий работы модель движения робота получается для класса непрерывных нелинейных динамических уравнений с медленно меняющимися неопределенными параметрами.

В данной работе была успешно решена задача синтеза релейного адаптивного регулятора робота-манипулятора, работающего в скользящем режиме, с подстройкой параметров поверхности переключения. В законе управления использованы эталонная модель и обобщенный адаптивный пропорционально-интегральный алгоритм регулирования. Подстройка параметров поверхности переключения позволяет обеспечить показатели качества работы системы, определяемые линейной стационарной эталонной моделью, во всей области неопределенности параметров модели робота.

Регулятор формирует управление в виде бинарного релейного сигнала, что обеспечивает работу силовых модулей в ключевом режиме. При практической реализации алгоритма управления это позволяет добиться максимальной энергетической эффективности и минимальных габаритных размеров устройства управления.

## Литература

1. Пыркин А. А., Бобцов А. А., Нгуен Х. Т. Алгоритм адаптивного оценивания параметров для класса нелинейных нестационарных систем. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2023, т. 66, № 4, с. 266–275. doi:10.17586/0021-3454-2023-66-4-266-275
2. Авдеенко Т. В. Проблемы параметрической идентификации в математическом моделировании процессов. *Образовательные ресурсы и технологии*, 2014, № 1 (4), с. 115–124. EDN: RVDRQF
3. Нгуен Х. Т., Власов С. М., Пыркин А. А., Попков И. В. Новый алгоритм идентификации частоты синусоидального сигнала с постоянными параметрами. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2022, т. 22, № 1, с. 18–24. doi:10.17586/2226-1494-2022-22-1-18-24, EDN: UECMLF
4. Андриевский Б. Р., Фуртат И. Б. Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Ч. 1. Методы. *Автоматика и телемеханика*, 2020, № 9, с. 3–61. doi:10.31857/S0005231020090019, EDN: GZYVGA
5. Андриевский Б. Р., Фуртат И. Б. Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Ч. 2. Приложения. *Автоматика и телемеханика*, 2020, № 10, с. 35–92. doi:10.31857/S0005231020100025, EDN: IBYUUE
6. Туан Л. В., Бобцов А. А., Пыркин А. А. Новый алгоритм идентификации нестационарных параметров для линейной регрессионной модели. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2017, т. 17, № 5, с. 952–955. doi:10.17586/2226-1494-2017-17-5-952-955, EDN: ZQQFQB
7. Дыда А. А., Оськин Д. А. Адаптивное субоптимальное управление приводом манипуляционного робота. *Современные наукоемкие технологии*, 2015, № 12-2, с. 230–233.
8. Та М. Ш., Пыркин А. А. Алгоритм параметризации нестационарных систем с использованием динамического регулятора. *Изв. вузов. Приборостро-*

- ение, 2023, т. 66, № 12, с. 1050–1059. doi:10.17586/0021-3454-2023-66-12-1050-1059
9. Маргун А. А., Зименко К. А., Базылев Д. Н., Бобцов А. А., Кремлев А. С. Адаптивное управление двухзвенным роботом-манипулятором на базе метода последовательного компенсатора. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2014, № 2 (90), с. 79–85.
  10. Добриборщ Д., Колюбин С. А. Адаптивное управление роботом-манипулятором с параллельной кинематической схемой. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2017, т. 60, № 9, с. 850–857. doi:10.17586/0021-3454-2017-60-9-850-857, EDN: ZITFBL
  11. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Адаптивное управление летательным аппаратом с идентификацией на скользящих режимах. Управление большими системами: сб. тр. М., ИПУ РАН, 2009. Вып. 26. EDN: KWATCB. <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnoe-upravlenie-letatelnyy-apparatom-s-identifikatsiey-na-skolzyaschih-rezhimah> (дата обращения: 23.05.2024).
  12. Мышляев Ю. И. Алгоритмы адаптивного управления на основе настраиваемого скользящего режима: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тула, Тул. гос. ун-т., 2009. 20 с.
  13. Крутиков С. Л. Базовые инерционные параметры манипуляционных роботов. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение»*, 2011, № 1(82), с. 28–45. EDN: NDXJND
  14. Рудаков Р. В., Сержантова М. В., Бойков В. И. Идентификация n-звенных робототехнических манипуляторов. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2024, № 1(139). doi:10.23670/IRJ.2024.139.166
  15. Быстров С. В., Григорьев В. В., Рабыш Е. Ю., Черевко Н. А. Экспоненциальная устойчивость непрерывных динамических систем. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2011, № 3(73), с. 44–47. EDN: NRAJUP
  16. Афанасьев В. Н., Колмановский В. Б., Носов В. Р. *Математическая теория конструирования систем управления*. М., Высш. шк., 2003. 447 с.
  17. Хоанг Дык Тхинь, Пыркин А. А. Синтез алгоритма робастного управления движением мобильного робота вдоль гладкой траектории. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2022, т. 65, № 7, с. 500–512. doi:10.17586/0021-3454-2022-65-7-500-512
  18. Андриевский Б. Р., Бобцов А. А., Фрадков А. Л. *Методы анализа и синтеза нелинейных систем управления*. СПб., ИПМаш РАН, 2018. 336 с.
  19. Kozachek O., Nikolaev N., Slita O., Bobtsov A. A. Parameter identification algorithm for a LTV system with partially unknown state matrix. 2024, *arXiv preprint arXiv:2402.13772*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.13772>
  20. Romero J. G., Ortega R., Bobtsov A. A. Parameter estimation and adaptive control of Euler – Lagrange systems using the power balance equation parameterisation. *International Journal of Control*, 2021, vol. 96, iss. 2, pp. 475–487. <https://doi.org/10.1080/00207179.2021.2002935>
  21. Хак Б. Д., Пыркин А. А., Бобцов А. А., Ведяков А. А. Идентификация полиномиальных параметров нестационарных линейных систем. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2021, т. 64, № 6, с. 459–468. doi:10.17586/0021-3454-2021-64-6-459-468
  22. Уткин В. И. *Скользющие режимы и их применение в системах с переменной структурой*. М., Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1974. 272 с.
  23. Фрадков А. Л. Схема скоростного градиента и ее применение в задачах адаптивного управления. *Автоматика и телемеханика*, 1979, вып. 9, с. 90–101.

UDC 681.50

doi:10.31799/1684-8853-2024-4-12-23

EDN: SMXJVV

**Adaptive control of robots for high-temperature operations**R. V. Rudakov<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, [orcid.org/0009-0000-8345-2800](https://orcid.org/0009-0000-8345-2800)M. V. Serzhantova<sup>b</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0009-0006-7629-7316](https://orcid.org/0009-0006-7629-7316)V. I. Boikov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0003-2561-0270](https://orcid.org/0000-0003-2561-0270), [viboikov@mail.ru](mailto:viboikov@mail.ru)A. B. Bushuev<sup>b</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0001-7826-4645](https://orcid.org/0000-0001-7826-4645)O. S. Nuyya<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0009-0005-7857-3137](https://orcid.org/0009-0005-7857-3137)Y. V. Litvinov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0003-0714-4624](https://orcid.org/0000-0003-0714-4624)S. V. Bystrov<sup>b</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-6900-0506](https://orcid.org/0000-0002-6900-0506)<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii Pr., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation**Introduction:** The peculiarities of robot manipulator operation in high-temperature zones from the point of view of control are associated with the changes in the parameters of their motion model. To ensure high-quality operation and efficiency of robots in such



conditions it is possible to use adaptive control systems that are capable to adjust to changing operating conditions and parrying external influences. **Purpose:** To synthesize an adaptive controller with a reference model and a generalized proportional integral control law operating in a sliding mode for a nonlinear nonstationary object. **Results:** We demonstrate that the motion of a robot manipulator can be specified by a nonlinear equation with a characteristic nonlinearity satisfying sectoral constraints. For the adopted robotic motion model we synthesize an adaptive proportional integral control law using the sliding mode operation with a tunable switching surface. The main difference between the synthesis procedure and the existing solutions consists in the use of an additional integral component in the control law for the mismatch signal and in the consideration of the convergence of the algorithm on the part of state vector variables. Modeling has shown that by adjusting the parameters of the switching surface, the steady-state error tends to zero in all points of the robot workspace. The quality indicators of the control system operation in the area of uncertainty of motion parameters correspond to the quality given by the reference model. **Practical relevance:** The synthesized controller forms the control as a binary relay signal, which ensures the operation of power modules in the key mode. In practical implementations it allows one to maximize energy efficiency and minimize overall dimensions of the control device.

**Keywords** – robot manipulator, adaptive control, sliding mode, proportional integral control.

**For citation:** Rudakov R. V., Serzhantova M. V., Boikov V. I., Bushuev A. B., Nuyya O. S., Litvinov Y. V., Bystrov S. V. Adaptive control of robots for high-temperature operations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 4, pp. 12–23 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-4-12-23, EDN: SMXJVJ

## References

1. Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Nguyen K. T. Algorithm of adaptive estimation of parameters for a class of non-linear non-stationary systems. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, vol. 66, no. 4, pp. 266–275 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2023-66-4-266-275
2. Avdeenko T. V. Parameter identification problems in mathematical modelling of processes. *Educational Resources and Technologies*, 2014, no. 1 (4), pp. 115–124 (In Russian). EDN: RVDRQF
3. Nguyen K. T., Vlasov S. M., Pyrkin A. A., Popkov I. V. A new algorithm for the identification of sinusoidal signal frequency with constant parameters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 18–24 (In Russian). doi:10.17586/2226-1494-2022-22-1-18-24
4. Andrievsky B. R., Furtat I. B. Disturbance observers: Methods and applications. I. Methods. *Automation and Remote Control*, 2020, vol. 81, no. 9, pp. 1563–1610. doi:10.1134/S0005117920090015, EDN: LHWYGH
5. Andrievsky B. R., Furtat I. B. Disturbance observers: Methods and applications. II. Applications. *Prilozheniya. Automation and Remote Control*, 2020, no. 10, pp. 1775–1818. doi:10.1134/S0005117920100021, EDN: GRKGYO
6. Tuan Le Van, Bobtsov A. A., Pyrkin A. A. New algorithm of variable parameters identification for linear regression model. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 952–955 (In Russian). doi:10.17586/2226-1494-2017-17-5-952-955, EDN: ZQQFQB
7. Dyda A. A., Oskin D. A. An adaptive sub-optimal control for robot manipulator drive. *Modern High Technologies*, 2015, no. 12-2, pp. 230–233 (In Russian).
8. Ta M. S., Pyrkin A. A. Parameterization algorithm for non-stationary systems using a dynamic controller. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, vol. 66, no. 12, pp. 1050–1059 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2023-66-12-1050-1059
9. Margun A. A., Zimenko K. A., Bazylev D. N., Bobtsov A. A., Kremlev A. S. Adaptive control of two-link robot manipulator based on the method of consecutive compensator. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 2 (90), pp. 79–85 (In Russian).
10. Dobriborsci D., Kolyubin S. A. Adaptive control of parallel kinematics robot manipulator. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 850–857 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2017-60-9-850-857, EDN: ZITFBL
11. Andrievsky B. R., Fradkov A. L. *Adaptivnoe upravlenie letatel'ny'm apparatom s identifikatsiej na skol'zashhix rezhimakh*. In: *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Adaptive aircraft control with sliding mode identification]. In: Collection of works "Managing Large Systems". Moscow, IPU RAN Publ., 2009, iss. 26. EDN: KWATCB. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnoe-upravlenie-letatel'ny'm-apparatom-s-identifikatsiej-na-skolzashchih-rezhimakh> (accessed: 23 May 2024) (In Russian).
12. Myshlyaev Yu. I. *Algoritmy adaptivnogo upravleniya na osnove nastraivaemogol'zashhego rezhima*. Dis. kand. tekhn. nauk [Adaptive control algorithms based on tunable sliding mode]. PhD Tech. sci. diss.]. Tula, TGU Publ., 2009. 20 p.
13. Krutikov S. L. Base inertia parameters of manipulation robots. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2011, no. 1(82), pp. 28–45 (In Russian). EDN: NDXJND
14. Rudakov R. V., Sergeantova M. V., Boikov V. I. Identification of n-link robotic manipulators. *International Scientific Research Journal*, 2024, no. 1(139) (In Russian). doi:10.23670/IRJ.2024.139.166
15. Bystrov S. V., Grigoriev V. V., Rabysh E. Y., Cherevko N. A. Exponential stability of continuous dynamic systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 3(73), pp. 44–47 (In Russian). EDN: NRAJUP
16. Afanasev V. N., Kolmanovskij V. B., Nosov V. R. *Matematicheskaya teoriya konstruirovaniya sistem upravleniya* [Mathematical theory of control system design]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 447 p. (In Russian).
17. Hoang D., Pyrkin A. A. Synthesis of an algorithm for robust control of a mobile robot movement along a smooth trajectory. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, vol. 65, no. 7, pp. 500–512 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2022-65-7-500-512
18. Andrievsky B. R., Bobczov A. A., Fradkov A. L. *Metody analiza i sinteza nelinejnykh sistem upravleniya* [Methods of analysis and synthesis of nonlinear control systems]. Saint-Petersburg, IPMash RAN Publ., 2017. 327 p. (In Russian).
19. Kozachek O., Nikolaev N., Slita O., Bobtsov A. A. Parameter identification algorithm for a LTV system with partially unknown state matrix. 2024. *arXiv preprint arXiv:2402.13772*, <https://doi.org/10.48550/arXiv:2402.13772>
20. Romero J. G., Ortega R., Bobtsov A. A. Parameter estimation and adaptive control of Euler – Lagrange systems using the power balance equation parameterisation. *International Journal of Control*, 2021, vol. 96, iss. 2, pp. 475–487. <https://doi.org/10.1080/00207179.2021.2002935>
21. Khak B. D., Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Vedyakov A. A. Identification of polynomial parameters of nonstationary linear systems. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 459–468 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2021-64-6-459-468
22. Utkin V. I. *Skol'zashchie rezhimy i ih primenenie v sistemah s peremennoj strukturoj* [Sliding modes and their application in systems with variable structure]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 272 p. (In Russian).
23. Fradkov A. L. Scheme of a velocity gradient and its application in problems of adaptive control. *Automation Remote Control*, 1979, no. 9, pp. 90–101 (In Russian).



## Моделирование поведения функций стандартной библиотеки в задачах анализа программ

В. М. Ицыксон<sup>а</sup>, канд. техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-0276-4517](https://orcid.org/0000-0003-0276-4517), [itsykson@yandex.ru](mailto:itsykson@yandex.ru)

М. П. Онищук<sup>б</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0001-5359-0161](https://orcid.org/0000-0001-5359-0161)

В. В. Кечин<sup>а</sup>, магистрант, [orcid.org/0009-0006-0845-2740](https://orcid.org/0009-0006-0845-2740)

Я. А. Алексеев<sup>в</sup>, инженер-программист, [orcid.org/0009-0002-6925-6541](https://orcid.org/0009-0002-6925-6541)

<sup>а</sup>Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, РФ

<sup>в</sup>ООО «Коулмэн Тех», Мира пр., 40, помещ. 3/1, Москва, 129090, РФ

**Введение:** статический анализ программных проектов, использующих внешние библиотеки, сопряжен с экспоненциальным ростом числа анализируемых трасс программы. Это приводит к необходимости искусственно ограничивать время анализа или использовать какие-либо упрощения, в результате чего ухудшаются полнота и точность анализа, снижается тестовое покрытие. **Цель:** разработать подход к моделированию поведения внешних библиотек на основе формальных спецификаций, аппроксимирующих поведение исходных функций, позволяющий упростить анализируемые проекты и снизить время анализа. **Методы:** моделирование функций стандартной библиотеки с помощью формальных спецификаций на языке LibSL и последующий автоматический синтез простых эквивалентов библиотечных функций на основе формальных описаний. **Результаты:** предложен подход к спецификации функций стандартной библиотеки языка Java на языке LibSL, заменяющий наиболее часто используемые библиотеки и их функции на формальные спецификации, повторяющие видимое извне поведение функций. Полученные аппроксимирующие описания транслируются в эффективные для анализа замены функций стандартной библиотеки и подставляются анализатору вместо исходных библиотечных функций. Предложенный подход реализован в виде набора спецификаций части стандартной библиотеки Java и транслирующих утилит. Проведенные эксперименты на части стандартной библиотеки языка Java показали применимость подхода: время анализа промышленных проектов сократилось в среднем на треть. **Практическая значимость:** разработанный подход позволяет значительно расширить область применения статического анализа в задачах обнаружения дефектов и генерации тестов, так как ввиду сокращения пространства состояний увеличивается точность и полнота обнаружения дефектов и в большинстве случаев обеспечивается более высокое покрытие программы сгенерированными тестами.

**Ключевые слова** – стандартная библиотека языка, формальные спецификации библиотек, моделирование поведения библиотеки, статический анализ программ, генерация тестов.

**Для цитирования:** Ицыксон В. М., Онищук М. П., Кечин В. В., Алексеев Я. А. Моделирование поведения функций стандартной библиотеки в задачах анализа программ. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 4, с. 24–39. doi:10.31799/1684-8853-2024-4-24-39, EDN: RIUJGA

**For citation:** Itsykson V. M., Onischuck M. P., Kechin V. V., Alekseev Y. A. Modeling the behavior of standard library functions in program analysis. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 4, pp. 24–39 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-4-24-39, EDN: RIUJGA

### Введение

В то время как объем программного обеспечения (ПО) увеличивается, сферы его применения расширяются, а количество критически важных областей жизни человека, зависящих от программного обеспечения, растет, проблема качества ПО встает все более остро. Ошибки в программном обеспечении все сильнее влияют на процессы жизнедеятельности человека. Компании-разработчики ПО уделяют все больше времени качеству разрабатываемого продукта. Одними из самых перспективных методов оценки и повышения качества ПО являются методы, основанные на статическом анализе. К ним относятся, например, методы статиче-

ского анализа для обнаружения дефектов ПО и для автоматической генерации тестов. Первые находят имеющиеся в программном коде ошибки, вторые генерируют тесты, запуск которых позволяет обойти всевозможные пути исполнения программы и обнаружить ошибки.

Основными характеристиками методов поиска ошибок являются ресурсоемкость, полнота и точность обнаружения. Полнота обнаружения (recall) показывает долю найденных методом ошибок в программе по отношению ко всем ошибкам в программе. Точность обнаружения (precision) показывает долю истинных ошибок среди всех найденных анализатором ошибок.

Основными характеристиками методов генерации тестов являются ресурсоемкость, тестовое по-

крытие и качество тестов. Тестовое покрытие показывает долю покрытых тестами элементов программы по отношению ко всем элементам программы. В зависимости от типов элементов фактически могут использоваться разные виды покрытия: покрытие строк, операторов, ветвлений, условий и т. п. Под качеством тестов понимается несколько характеристик сгенерированного множества тестов, в том числе доля дублирующихся тестов, доля тестов, не расширяющих тестового покрытия, и т. д.

Главным вызовом для всех статических методов является анализ многокомпонентных проектов, активно использующих внешние библиотеки. В таких проектах объем анализируемого программного кода чрезвычайно большой, так как анализ программы, созданных разработчиками, инструменты должны обрабатывать огромные массивы артефактов, связанных с используемыми внешними библиотеками: исходный код, байт-код или объектные модули. Анализ таких больших объемов данных сопряжен с рядом проблем.

В данной статье описывается разработанный авторами подход к решению проблемы анализа многокомпонентных проектов, основанный на моделировании поведения стандартных библиотек. Подход заключается в создании формальных спецификаций библиотек на языке LibSL, последующей трансляции построенных спецификаций в упрощенные эквиваленты функций стандартных библиотек и замене в анализируемом проекте реальных библиотечных функций на модельные в целях снижения пространства состояний анализа, и, как следствие, времени работы анализатора. Разработанный подход был апробирован на части стандартной библиотеки языка Java и показал существенное снижение времени анализа на промышленных проектах.

### Существующие подходы к моделированию библиотек

Проблема моделирования сторонних библиотек находит свое решение во многих инструментах статического анализа. Существует несколько основных подходов, реализуемых разными анализаторами:

- полный анализ программы вместе со всеми используемыми библиотеками;
- игнорирование при анализе внешних библиотек;
- встраивание в анализаторы моделей наиболее часто используемых функций стандартной библиотеки;
- замена библиотечных функций при анализе на примитивные модели, описанные с использованием предметно-ориентированного языка (Domain-Specific Language, DSL);

- замена библиотечных функций при анализе на сложные аппроксимации, написанные на целевом языке;

- замена библиотечных функций при анализе на аппроксимации, полученные из модельного представления функции.

При полном анализе многокомпонентных проектов инструменты сталкиваются с взрывом числа состояний, который, как следствие, приводит к катастрофическому увеличению времени анализа. Для сокращения времени работы инструментов анализа используются разные подходы, связанные с искусственным лимитированием глубины или времени анализа, что позволяет снизить ресурсоемкость, но приводит к ухудшению параметров полноты и точности обнаружения ошибок и снижению покрытия и ухудшению качества тестов при генерации тестов.

Другой крайностью является игнорирование внешних компонентов при анализе. Вызовы внешних функций в таком сценарии заменяются грубыми аппроксимациями сверху или снизу. При использовании такого подхода за сокращение времени анализа приходится платить низкой полнотой или точностью обнаружения ошибок, или невысоким покрытием и низким качеством тестов при решении задачи генерации тестов.

Альтернативой двум крайним подходам является группа подходов, основанная на моделировании поведения внешних компонентов. Внешние компоненты (функции, библиотеки и т. п.) в таком случае заменяются в процессе анализа на их упрощенные модели.

Характеристики подходов в задачах обнаружения ошибок и генерации тестов в многокомпонентных программах приведены в табл. 1.

Рассмотрим основные используемые подходы в отдельности более детально.

### Игнорирование внешних зависимостей

В инструменте статического анализа программ oo7 [1] в целях определения наличия угроз информационной безопасности и автоматической корректировки их поведения механизм анализа основывается на наборе правил упрощения и аппроксимации ряда аспектов исполнения анализируемой программы. Одним из таких правил является маркировка возвращаемого значения как небезопасного (подконтрольного злоумышленнику) для функций, анализ которых не может быть осуществлен, включая внешние библиотеки и другое стороннее ПО. Стандартная библиотека при этом выступает как подходящая для анализа зависимость, однако взаимодействие со средой исполнения остается за гранью анализа. Подобный подход, как это подчеркивается авторами инструмента [1],

- **Таблица 1.** Подходы к анализу в задачах поиска ошибок в программах и генерации тестов
- **Table 1.** Approaches to analysis in the tasks of finding errors and test generation

Подход	Метод повышения эффективности	Поиск ошибок			Генерация тестов		
		Время анализа	Полнота анализа	Точность анализа	Время генерации	Покрытие	Качество тестов
Анализ всего проекта с внешними компонентами	Ограничение глубины анализа	Очень высокое	Высокая	Средняя	Очень высокое	Высокое	Высокое
		Среднее / высокое	Средняя	Средняя	Среднее	Среднее	Среднее
	Ограничение времени анализа	Управляемое	Средняя	Средняя	Управляемое	Среднее	Среднее
Анализ проекта с игнорированием компонентов	Аппроксимация сверху	Низкое	Высокая	Очень низкая	Низкое	Низкое	Низкое
	Аппроксимация снизу	Низкое	Очень низкая	Высокая	Низкое	Низкое	Низкое
Анализ проекта с моделированием поведения компонентов	Управляемая аппроксимация поведения внешних компонентов	Среднее / низкое	Высокая	Управляемая	Среднее / низкое	Высокое	Высокое

приводит к появлению большого числа ложноположительных срабатываний, что негативно сказывается на практической полезности подобных инструментов и требует ручной корректировки ограничений и механизмов фильтрации при выполнении анализа.

CryptoGuard [2] – еще один пример инструмента, в котором игнорируются внешние зависимости. Вместо анализа зависимостей авторы с помощью набора алгоритмов уточнения пытаются выяснить, может ли используемый в конкретном месте вызов внешней библиотеки быть причиной уязвимости. Такой подход позволяет снизить количество ложноположительных срабатываний, однако, как отмечают сами авторы, это может приводить к ложноотрицательным результатам.

### Полный анализ программы

Анализаторы в общей массе направлены на работу с подконтрольным пользователю кодом. При необходимости анализа зависимостей проекта есть возможность подключить их в качестве модулей или явно передать анализатору путь к ним. В таком случае код проекта и его зависимостей будет рассматриваться инструментом анализа как единое целое. Однако, как уже было отмечено, при полном анализе многокомпонентных проектов инструменты сталкиваются с взрывом числа состояний, который приводит к катастрофическому увеличению времени анализа. Следует также отметить, что не всегда подключаемые модули имеют представление, пригодное к анализу выбранным инструментом или методом, что также затрудняет поиск ошибок на практике.

К такого рода подходу при всей сложности исполнения можно прибегнуть лишь в случаях, когда внешние зависимости могут быть явно подключены и задействованы анализируемым ПО в рамках составленной модели. Данное ограничение исключает применение в качестве подобной «внешней» зависимости широко распространенные операционные системы общего назначения с богатыми возможностями для абстрагирования от аппаратного уровня, использующие специализированные статические или динамические программные модули для работы напрямую с аппаратным обеспечением среды исполнения. Функционирование же последнего, в свою очередь, может быть успешно смоделировано.

### Встроенные механизмы анализа стандартных библиотек

Подавляющее большинство разработанных программных продуктов опирается в своей работе на некоторые модули и коллекции функций, считающиеся для целевой платформы и среды исполнения стандартными. Из этого прямо следует, что именно эти фрагменты программного кода будут использоваться наиболее часто и, как следствие, будут наиболее востребованы в процессе анализа. Необходимо также подчеркнуть, что упомянутые элементы нередко имеют нетривиальное поведение, которое требует создания упрощенной модели для эффективного использования. Для решения этой проблемы распространенным подходом можно назвать создание примитивных «заглушек» – фрагментов кода анализатора, отражающих очень упрощенное, грубое поведение функции или модуля [3].

Например, это могут быть жестко заданные последовательные проверки свойств ключевых параметров функции и возвращаемого значения. Подобным образом организована работа в компиляторе Clang (<https://clang-analyzer.llvm.org>) для языков C, C++ и Objective-C. Clang Static Analyzer по умолчанию содержит набор различных проверок. Это могут быть как проверки небезопасного использования API, проверки на основе каких-либо известных стандартов безопасного кодирования, например CERT (<https://wiki.sei.cmu.edu/confluence/display/c/2+Rules>), так и отдельно созданные пользователем модули. Анализ выполняется для пользовательского кода, а не для сторонних библиотек. Тем не менее если используемые зависимости были собраны при помощи Clang, то стандартные проверки были пройдены. Подобный подход обладает низкой гибкостью и эффективностью вследствие необходимости внесения изменений в инструмент анализа при изменении состава и содержания функций стандартной библиотеки. Кроме того, прямой перенос или адаптация «заглушек» невозможны по причине сильной привязки к методологии анализа, на которой базируется инструмент, и особенностей его программной архитектуры.

#### DSL-описания примитивных моделей

Некоторые средства анализа предоставляют механизмы для описания простых свойств внешних функций. Обычно это простые DSL, основанные на структурированных текстовых форматах. Например, инструмент анализа безопасности FlowDroid [4] поддерживает интерфейс для моделирования внешних библиотек в виде специализированных XML-файлов. Подобного рода правила (<https://github.com/secure-software-engineering/FlowDroid/tree/develop/soot-infoflow-summaries/testSummaries>) содержат примитивные описания правил тaint-анализа (источники, подверженные стороннему влиянию, и потенциальные цели для проведения атак) и позволяют сократить и упростить процесс анализа потока данных. Инструмент изначально включает в себя некоторые predefined правила, которые обрабатывают классы коллекций, строковые буферы и аналогичные часто используемые структуры данных, указывая таким образом, например, что добавление испорченного элемента в набор искажает весь набор целиком. Если вызов метода библиотеки не имеет связанного правила, он анализируется полностью при наличии соответствующего ему байт-кода. Похожий подход реализуется в инструменте статического анализа Vorealis [5]. В нем используются JSON-описания для задания паттернов доступа и ра-

боты с памятью внешних зависимостей на основе упрощенного подмножества языка ACSL [6], а также специализированные аннотации в секции комментариев в исходном коде анализируемых проектов (программ и (или) библиотек). Следует отметить, что данный подход к организации моделей позволяет проводить исследование проектов, программные модули которых не имеют представления, подходящего для целей анализа. В работе [7] описывается язык CrySL, созданный для составления простых спецификаций использования Java объектов. Основной акцент сделан на применении конечных автоматов для описания сценариев корректного использования криптографических алгоритмов и библиотек. Подобные описания полагается использовать в сочетании с представленным в той же работе CogniCrypt<sub>sast</sub> — инструментом статического анализа — для выявления ошибок в Android-приложениях. Применительно к описанию программных интерфейсов в индустрии широкое распространение получил стандарт OpenAPI Specification (<https://spec.openapis.org/oas/latest.html>, ранее — Swagger). В сущности, OpenAPI — это стандарт документации для описания API, нацеленный на обеспечение взаимопонимания между разработчиками различных систем и технологий. Этот стандарт предоставляет подробную информацию о том, как использовать API, включая определение структуры запросов, ответов, параметров, методов обработки ошибок, аутентификации и авторизации. Необходимо отметить, что данный стандарт позволяет в ограниченном виде применять конечно-автоматные модели (<https://schemathesis.readthedocs.io/en/stable/stateful.html>) для организации сервисов со скрытым внутренним состоянием. OpenAPI-спецификации формируются в виде YAML- или JSON-описаний.

#### Комплексные описания функций библиотек

В инструменте UnitTestBot Java [8], целью которого является генерация модульных тестов, применяются аппроксимации некоторых классов стандартной библиотеки Java, так как часть из них сложна для статического анализа и их обработка ведет к большому числу ложных срабатываний. Для преодоления этого в инструменте используется механизм «фиктивных» (mock) объектов, моделирующий поведение некоторых символьных примитивов. Аппроксимации написаны на языке Java и являются упрощенной версией классов стандартной библиотеки. Благодаря тому, что они являются частью инструмента анализа и написаны с учетом специфики применяемого механизма анализа, обеспечивается более быстрая и точная работа инструмента. В работе [9] описыва-

ется подход Dione с использованием ограниченного подмножества языка Python для создания спецификаций на базе конечных автоматов ввода-вывода. Подход предполагает использование специализированных аннотаций (декораторов) в сочетании с созданием классов с особой структурой ([https://github.com/cyphyhouse/Dione/tree/master/system\\_tests/iaa\\_examples](https://github.com/cyphyhouse/Dione/tree/master/system_tests/iaa_examples)) для описания основных элементов автомата на языке Dione с последующей трансляцией в представление, пригодное для использования статическим анализатором Dafny (<https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/dafny-automatic-program-verifier-functional-correctness/>).

Однако возможность применения аппроксимаций и спецификаций на подобной основе ограничена выбранным языком написания. Кроме того, при написании подобных оболочек необходимо искусственно контролировать использование различных конструкций, так как язык общего назначения, такой как, например, Java или Python, обладает гораздо большей выразительностью, чем того требует аппроксимация. Ошибка разработчика при создании такой упрощенной модели (например, использование циклов с неизвестным числом итераций или явных или неявных рекурсий) может привести к взрыву пространства состояний при анализе и, как следствие, к критическому увеличению времени его проведения.

### Моделирование библиотек на основе спецификаций

Подходы, использующие спецификации библиотек и библиотечных функций, активно развиваются и находят свое применение в различных средствах анализа программ. По способу организации спецификаций их можно разделить на две подгруппы: подходы на основе встроенных спецификаций и подходы на основе внешних спецификаций.

Подходы на основе *встроенных спецификаций* предполагают, что спецификации библиотек и библиотечных функций встраиваются внутрь исходного текста самих программных библиотечных модулей. Для этого применяются механизмы структурированных комментариев и аннотаций в зависимости от особенностей применяемого средства моделирования и (или) представления. Одним из примеров такого описания спецификации является язык JML [10]. Он позволяет описывать поведения в виде логических выражений (высказываний, пред- и постусловий, инвариантов) для отдельных методов и полей на основе специальным образом оформленных комментариев в исходном тексте модуля на языке Java. Концептуально идентичными средствами моделирования обладают также инструменты,

базирующиеся на языках, схожих с ACSL, такие как Mopsa [11] или C-kernel [12], отличительной особенностью которых является фокус на языках семейства C и на работе с указателями и моделями памяти.

К недостаткам этих инструментов можно отнести невозможность поведенческого описания в явном виде, а также привязанность к окружению определенного языка программирования. Для таких спецификаций имеется одно существенное ограничение, связанное с необходимостью доступа к исходному коду. Как следствие, не всегда возможно встроить спецификацию в код библиотеки, а аппроксимация больших библиотек затруднительна в силу необходимости, зачастую, повторять уже реализованное поведение, тем самым значительно увеличивая объем кодовой базы и повышая вероятность возникновения ошибок. Но даже при наличии исходного кода любое обновление внешней библиотеки приведет к необходимости переноса и переработки спецификации.

Подходы на основе *внешних спецификаций* предполагают создание спецификации библиотеки или отдельных ее функций в виде отдельных артефактов. Такой подход реализован в языке SLIC [13]. SLIC предназначен для описания программ на языке C, он позволяет в близких к C синтаксисе и семантике описывать спецификации без модификаций исходного кода. Поддерживается машина состояний, пред- и постусловия. Спецификация компилируется в C, позволяет выполнять инструментирование и отслеживать работу программы в виде трасс. Схожим образом построено взаимодействие анализатора с языком MetaL [14]. Спецификация MetaL исполняется с помощью компилятора XGCC и позволяет проверять выполнение определенных свойств, ограничений и соответствие переходам в машине состояний. Несмотря на потенциальную возможность абстрагироваться от целевого языка программирования, SLIC и MetaL ориентированы на совместное использование с языком C, и для их применения используются специальные препроцессоры.

К подходу на основе внешних спецификаций относится также язык CASL [15]. Он позволяет задать представленную в логике первого порядка алгебраическую спецификацию, предназначенную для описания поведения и структуры программ. В основе подхода лежит функциональная парадигма программирования. Для CASL реализован набор инструментов, позволяющий взаимодействовать со спецификацией для выполнения необходимых задач, однако функциональная природа полученных моделей значительно отличается от парадигм и методологий,

применяемых современными промышленными языками общего назначения.

Очевидными достоинствами подходов на основе внешних спецификаций являются:

- отсутствие необходимости доступа к исходным кодам библиотеки;
- отсутствие необходимости внесения изменений в чужой программный код;
- возможность абстрагирования спецификаций от целевого языка программирования;
- возможность управления уровнем детализации моделирования.

### Выводы

Перечисленные подходы в разной степени решают проблему моделирования сторонних библиотек. При этом реализации, использующие тот или иной подход, имеют специфичные для него недостатки: большое время анализа, низкую точность, недостаточную универсальность. Некоторые системы, такие как, например, SharpChecker [16], одновременно сочетают несколько подходов (встроенные определения, коллекцию примитивных описаний, аппроксимацию на целевом языке) с целью повысить полноту и точность анализа, но при этом также не позволяют создавать гибкие аппроксимации разного уровня детализации. Цель данной работы – предложить универсальный, не зависящий от языка программирования подход, позволяющий моделировать библиотеки с разной степенью точности в зависимости от задач анализа.

### Предлагаемый подход к моделированию библиотек

Отсутствие каких-либо сведений об используемой библиотеке сильно снижает точность анализа, увеличивая количество обнаруженных ложноположительных или ложноотрицательных дефектов. В то же время анализ всех зависимостей вместе с программой проверки приводит к взрыву состояний и критическому росту времени анализа, вследствие чего его применение становится нецелесообразно.

Одним из возможных путей решения указанных проблем является моделирование поведения библиотеки с использованием формальных спецификаций. Основная идея подхода состоит в создании механизма, позволяющего разработчику описывать видимое извне поведение библиотечных функций, используя ограниченные выразительные средства. Основные требования, предъявляемые к такому механизму:

- выразительность, достаточная для описания возможностей большинства существующих библиотек;

- поддержка основных возможностей процедурных и объектно-ориентированных языков программирования;

- ограниченная вычислительная сложность, не позволяющая создавать спецификации, способные привести к взрыву числа состояний системы при анализе;

- возможность раздельного хранения спецификации и библиотеки.

В рамках данной работы для написания спецификаций использовался язык LibSL [17]. Этот язык, уже много лет развиваемый авторами статьи, показал свою эффективность в решении нескольких задач программной инженерии, связанных с описанием свойств и моделированием поведения программных библиотек. При помощи его можно создавать описания поведения различных функций и методов в семантике, близкой к целевому языку программирования. Предлагаемый в данной работе подход к моделированию поведения объектов программной библиотеки основывается на ручном создании аппроксимированного, но при этом наиболее приближенного к оригиналу внутреннего модельного поведения публичных элементов библиотеки (соответствующих семантическим отображениям типов данных, функций и методов). Ключевым элементом является использование наборов специализированных семантических действий (ключевое слово *action* в языке LibSL), свойственных целевой среде исполнения модели. Дополнительные семантические действия позволяют выполнять моделирование таких элементов и взаимодействий, как циклы (обычные и индексированные), захват и выброс исключений, вызов методов с динамической диспетчеризацией (интерфейсы и абстрактные типы данных), обращение к примитивам синхронизации и пр.

Необходимо отметить, что в языке LibSL применяется комбинированный подход к организации функциональных блоков: публичные функции, обеспечивающие доступ к функциональности библиотеки внешним приложениям для прямого обращения и применяемые на этапе связывания с основной программой и другими библиотеками, группируются в рамках какого-либо конечного автомата (ключевое слово *automaton*), выполняющего моделирование состояния экземпляра сущности какого-то одного выбранного семантического типа данных. Примером такой сущности может быть как структура и статические функции, описывающие работу с файлом [17], так и динамический список элементов или публичный интерфейс, предоставляющий доступ к базе данных.

Однако напрямую использовать созданные таким образом спецификации затруднительно, поэтому необходима трансляция на промежуточ-

ный исполняемый язык программирования, для которого уже существуют инструменты анализа программ. Для решения этой проблемы был создан инструмент, основными задачами которого являются: разбор входных спецификаций; поиск примитивных семантических ошибок; преобразование в файловые объекты в представлении, пригодном для использования целевым инструментом анализа (program analysis engine, PAE). В рамках данной работы основным выходным представлением являлись исходные тексты объектных классов на языке Java, взаимодействующих с PAE посредством специализированного программного интерфейса (API). В дополнение к этому был разработан, как часть вспомогательного инструментария, комплект вспомогательных методов, реализующих работу с примитивными типами данных, и другие функции общего назначения (сериализация, поиск элемента коллекции, проверка эквивалентности коллекций и их элементов и т. д.). Общая архитектура предлагаемого подхода представлена на рис. 1.

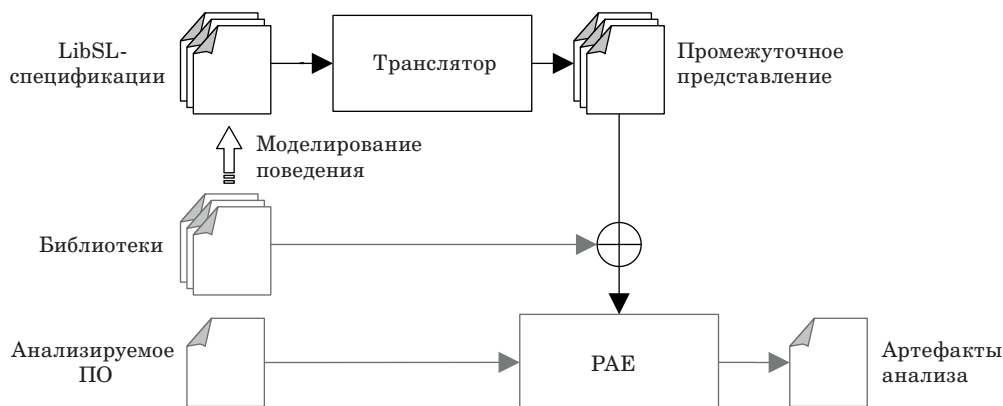
Поведение вспомогательных программных модулей (библиотек) частично или полностью описывается в форме коллекции LibSL-спецификаций. Далее, при помощи утилиты-транслятора, выполняется преобразование их в требуемое (целевое) представление, пригодное к использованию выбранным инструментом PAE. Представленная архитектура опирается на существование в PAE механизма, позволяющего подменять (статически или динамически) внешние зависимости анализируемого ПО на предоставляемые модели библиотек при их наличии. В случае же отсутствия аппроксимаций предполагается использовать оригинальные программные модули или выполнить их автоматическое упрощение при наличии возможности.

Для демонстрации принципов организации предлагаемого подхода и механизмов работы

инструмента рассмотрим пример использования циклической конструкции и ее реализации в сочетании с использованием PAE, имеющего встроенную поддержку этой конструкции.

Модель поведения для метода *lastIndexOf* класса *ArrayList* из пакета *java.util* стандартной библиотеки языка Java изображена на рис. 2, а соответствующая ей реализация на целевом языке программирования – на рис. 3 (числовые метки соответствуют элементам рис. 2). Оригинальный класс *ArrayList* предназначен для выполнения операций, свойственных динамическому списку элементов, индексированному целыми неотрицательными числами. Назначение метода *lastIndexOf* заключается в поиске порядкового номера элемента (отсчет ведется с нуля), эквивалентного объекту, который был передан в качестве аргумента. В случае неудачи (список пуст или эквивалентных элементов найдено не было) метод возвращает значение  $-1$ . Модель такого поведения описывается на языке LibSL (см. рис. 2) функцией (ключевое слово *fun*) с названием, соответствующим названию исходного метода. Сигнатура функции аналогична сигнатуре оригинального метода, однако дополнительно включает указание на экземпляр объекта класса *ArrayList* (параметр *self*). Для указания объекта, для типа которого предназначено описание моделирующего конечного автомата, используется аннотация *@target*, позволяющая применять сокращенный синтаксис при обращении к автоматным переменным, таким как, например, *storage*.

Меткой 1 (см. рис. 2) выделены встроенные типы данных специального назначения и сопутствующие им наборы примитивных действий, позволяющие повысить эффективность процесса анализа модели, используя механизмы и модели, поставляемые в конкретной реализации целевого PAE. В рамках данной работы такими



■ **Рис. 1.** Общая схема архитектуры подхода  
 ■ **Fig. 1.** General architecture outline



```

18 automaton ArrayListAutomaton
19 (
20     var storage: list<Object>
21 )
22 : ArrayList
23 {
24     ...
25
26 fun *.LastIndexOf (@target self: ArrayList, o: Object): int
27 {
28     result = -1;
29     val size: int = action LIST_SIZE(this.storage);
30     if (size != 0)
31     {
32         action ASSUME(size > 0);
33         var i: int = 0;
34         action LOOP_FOR(
35             i, size - 1, -1, -1,
36             LastIndexOf_Loop(i, o, result)
37         );
38     }
39 }
40
41 @Phantom proc LastIndexOf_Loop (i: int, o: Object, result: int): void
42 {
43     val e: Object = action LIST_GET(this.storage, i);
44     if (action OBJECT_EQUALS(o, e))
45     {
46         result = i;
47         action LOOP_BREAK();
48     }
49 }
50
51 ...
52 }

```

- **Рис. 2.** Описание циклической конструкции средствами языка LibSL
- **Fig. 2.** Description of a loop in LibSL

```

743 /**
744  * [FUNCTION] ArrayListAutomaton::lastIndexOf(ArrayList, Object) -> int
745  * Source: java/util/ArrayList.main.lsl:761
746  */
747 public int lastIndexOf(Object o) {
748     int result = 0;
749     Engine.assume(this.__lsl_state == __lsl_States.Initialized);
750     /* body */ {
751         result = -1;
752         final int size = this.storage.size();
753         if (size != 0) {
754             Engine.assume(size > 0);
755             int i = 0;
756             for (i = size - 1; i > -1; i += -1) {
757                 final Object e = this.storage.get(i);
758                 if (LibSLRuntime.equals(o, e)) {
759                     result = i;
760                     break;
761                 }
762             }
763         }
764     }
765 }
766 return result;
767 }

```

- **Рис. 3.** Реализация циклической конструкции. Результат трансляции на язык Java
- **Fig. 3.** Implementation of a loop. Translation result (Java)

типами данных являются «список» ( $list<E>$ , где  $E$  – тип элемента списка;  $list<Object>$  на рис. 2) и «сопоставление» ( $map<K, V>$ , где  $K$  и  $V$  – некоторые типы данных, являющиеся ключом и значением сопоставления соответственно). Поддерживаемые операции ограничиваются возможностями предоставляемого интерфей-

са взаимодействия со средой исполнения PAE и включают такие действия, как: создание пустой коллекции, добавление элемента, проверка вхождения ключа в коллекцию, определение количества элементов в коллекции, получение элемента (по ключу или индексу), удаление сопоставления «ключ=значение». Дополнительно

была организована поддержка таких операций, как пересечение и объединение ключей для пары сопоставлений с выборкой значений по одному из сопоставлений, а также получение случайного существующего ключа. Стоит отметить, что в рамках реализации трансляции на язык Java (см. рис. 3) для одновременной поддержки моделирования поведения классов *java.util.IdentityHashMap* и *java.util.HashMap* (и им подобных) была реализована прослойка, состоящая из интерфейса контейнера и двух частных реализаций: с обращением к методам *hashCode* и *equals* (для *HashMap* и *LinkedHashMap*) и без с использованием операции сравнения ссылок на объекты ключей (для *IdentityHashMap*).

Меткой 2 на рис. 2 отмечены действия, являющиеся специфичными для подхода к моделированию исполнения, применяемого целевым РАЕ, позволяющие повысить эффективность процесса анализа, сократив исследуемое пространство состояний. Выражение *ASSUME*, в частности, широко применяется при моделировании элементов стандартной библиотеки, частично или полностью полагающихся на способность РАЕ оперировать символьными переменными. В примере на рис. 2 использование этого действия позволяет уменьшить время анализа для случаев, когда РАЕ примет допустимым отрицательное значение для переменной *size*.

Метками 3 и 5 отмечены действия, изменяющие порядок исполнения операций. В примере на рис. 2 действие *LOOP\_FOR* используется для моделирования цикла со счетчиком для перебора элементов списка, вмещающего в себя отдельные элементы (поле *storage*), и для поиска элемента, эквивалентного заданному (входной параметр “*o*”). Параметрами действия являются: переменная-счетчик, начальное (включительно) и конечное (исключительно) значение счетчика, приращение счетчика на каждой итерации. На рис. 3 показано, что условие остановки цикла организовано с использованием оператора «больше». Выбор оператора основывается на значении приращения для счетчика: для константного числового значения результат выбора зависит от знака, иначе, если константное значение не удалось определить, используется оператор «не равно». Для моделирования тела цикла используется вызов подпрограммы *lastIndexOf\_loop* (ключевое слово *proc*). При выполнении трансляции действия *LOOP\_FOR* вместо тела цикла подставляются выражения из вызываемой подпрограммы. Переменные, которые требуется использовать внутри тела цикла, описываются как параметры используемой подпрограммы (переменные “*i*”, “*o*” и “*result*” на рис. 2 и 3).

Меткой 4 отмечены действия общего назначения, являющиеся широко применимыми, та-

кие, как, например, сравнение двух значений на эквивалентность. В рассматриваемом примере образцом такового является *OBJECT\_EQUALS*. Это действие преобразуется в вызов внешнего статического метода и выполняет сравнение, опираясь на тип передаваемых параметров в соответствии с правилами целевого языка (Java в данном случае). Приведенная реализация позволяет проводить модификацию поведения указанного действия независимо от преобразованного набора спецификаций, однако ее недостатком является использование вызова статического метода, что может оказаться затратным для некоторых видов анализа.

Аннотация *@Phantom* позволяет предотвратить появление переменной, функции или подпрограммы в результирующем выводе. Подобного рода функциональность дает возможность, в сочетании с механизмом подстановки выражений, как уже было упомянуто, описывать и использовать исполнимое тело динамической структуры, такой как цикл, лямбда-выражение или иной функтор. Очевидным достоинством такого подхода является контроль захвата и использования переменных и других объектов внутри исполняемого фрагмента. Вторым преимуществом является возможность переиспользования одной реализации в разных участках одной спецификации. Недостатком же, в свою очередь, является повышение разрозненности кодовой базы спецификаций вследствие разделения места использования от места объявления подпрограммы.

Результатом трансляции для вышеуказанных действий является вызов соответствующего метода для переменной, переданной в качестве одного из параметров действия. Исключения составляют действия, назначения которых схожи с метками 3 и 5 рис. 2, порождая синтаксическую конструкцию, соответствующую специфике и возможностям РАЕ и целевого представления (метки 3 и 5 на рис. 3).

Как уже сказано, одним из отличительных преимуществ использования языка LibSL является поддержка описаний конечных автоматов. Реализовать поддержку конечных автоматов в промежуточном представлении возможно различными способами при наличии средств, позволяющих моделировать чтение текущего состояния, сверку состояния с фиксированным значением, сохранение нового значения состояния. Дополнительные действия зависят от возможностей выбранного промежуточного состояния, среды моделирования и целей анализа.

Показан вызов статического метода *Engine.assume* в начале метода аппроксимации (строка 749 на рис. 3). В данном случае это позволяет ограничить исследование возможных путей ис-

полнения только теми, при которых аппроксимация (автомат) была инициализирована корректно.

Моделирование исполнения осуществляется в рамках поддержки taint-анализа с применением виртуальных семантических меток (рис. 4). Для работы с метками организован набор соответствующих семантических действий, позво-

```

18 automaton fileIo_Stream(): fileIo_Stream
19 {
20     initstate Open;
21     finishstate Closed;
22
23     shift Open -> self by [ readSync, ... ];
24     shift Open -> Closed by [ closeSync ];
25
26     ...
27
28     fun *.readSync(@target self: fileIo_Stream,
29                   buffer: ArrayBuffer,
30                   @nullable options: ReadOptions
31                   ): number
32     {
33         if (action HAS_MARK(self, TM_FILE_WRITEONLY))
34             action SINK_ALARM(ERR_READ_FROM_WRITEONLY);
35
36         action COPY_MARKS_ALL(buffer, result);
37     }
38     ...

```

■ **Рис. 4.** Описание метода и автоматной модели  
 ■ **Fig. 4.** Description of a method and associated automaton model

```

67 ...
68 fun *.readSync(@target self: fileIo_Stream,
69               buffer: ArrayBuffer,
70               @nullable options: ReadOptions
71               ): number
72 {
73     if (action HAS_MARK(self, `TM-fileIo_Stream-#-Closed`))
74         action SINK_ALARM(<err:state>fileIo_Stream.readSync`);
75
76     if (action HAS_MARK(self, TM_FILE_WRITEONLY))
77         action SINK_ALARM(ERR_READ_FROM_WRITEONLY);
78
79     action COPY_MARKS_ALL(buffer, result);
80 }
81 ...

```

■ **Рис. 5.** Коррекция описания метода по автоматной модели  
 ■ **Fig. 5.** Automatic correction of the method description

ляющих добавить, проверить наличие (*HAS\_MARK*), удалить метку, сигнализировать об обнаруженной ошибке (действие *SINK\_ALARM*). С использованием этих действий выполняется контроль текущего состояния путем проверки наличия метки состояния, исполнение функции в котором не предусмотрено спецификацией. Данная функциональность требует от пользователя лишь выполнить сопоставление функций с состояниями конечного автомата через группы переходов (ключевое слово *shift*). Механизмы проверки и изменения состояния будут добавлены автоматически на этапе трансляции (рис. 5).

Использование конечного автомата, описанного выше, с помощью синтаксиса создания нового экземпляра автомата-объекта продемонстрировано на рис. 6.

Видно, что конструкция, обозначающая создание нового экземпляра автомата и выражение присваивания значения переменной *result*, заменяется вызовом действия, добавляющего метку состояния автомата к указанной переменной. Необходимо отметить, что в приведенном примере используются метки без применения параметризации, что значительно сужает спектр возможных автоматных состояний из-за ограниченной только значениями псевдопеременной *state*, заданными при объявлении структуры автомата (ключевые слова *state*, *initstate*, *finishstate*). При использовании более функционального средства моделирования потенциально возможно описывать более сложные состояния, применяя дополнительные пользовательские автоматные переменные.

### Экспериментальные исследования предлагаемого подхода

Для оценки применимости предлагаемого подхода и корректности его реализации было проведено два эксперимента. Цель первого экс-

```

17 automaton fileIo(): fileIo
18 {
19     ...
20
21     static fun *.createStreamSync (path: string, mode: string): fileIo_Stream
22     {
23         if (mode == "r") action ADD_MARK(result, TM_FILE_READONLY);
24         if (mode == "w" || "a" == mode) action ADD_MARK(result, TM_FILE_WRITEONLY);
25
26         if (action VALUE_CONTAINS(path, "../"))
27             action SINK_ALARM(CWE_23);
28
29         action COPY_MARKS_ALL(path, result);
30
31         result = new fileIo_Stream(state = Open); // -> action ADD_MARK(result, `TM-fileIo_Stream-#-Open`);
32     }
33     ...

```

■ **Рис. 6.** Применение автомата  
 ■ **Fig. 6.** Automaton usage example

перимента — проверка корректности создания спецификаций классов коллекций стандартной библиотеки Java. Второй эксперимент проводился в целях анализа эффективности предложенного подхода моделирования стандартной библиотеки.

### Корректность поведенческих аппроксимаций

Первый эксперимент был поставлен с целью убедиться, что сгенерированные по LibSL-спецификациям классы Java имеют поведение, максимально приближенное к поведению оригинальных классов. Множество классов для моделирования было ограничено только некоторыми из представленных для работы с коллекциями из пакета *java.util*, так как стандартная библиотека языка Java предлагает программисту очень широкий спектр возможностей для реализации различных программных систем, и полное ее исследование существенно превысило бы рамки журнальной статьи. Тем не менее наиболее сложными для моделирования и наиболее часто используемыми классами стандартной библиотеки Java являются коллекции, что подтверждается данными из статьи [18]. Поэтому для проведения эксперимента авторы ограничились только этой частью спецификаций.

Эксперимент заключался в следующем. С помощью генератора тестов Randoor (<https://randoor.github.io/randoor/>) создавался набор тест-кейсов для определенного класса коллекций Java. После этого создавалась новая версия программы, в которой при помощи технологии Java Agent обращения к оригинальным классам коллекций динамически заменялись на обращения к сгенерированным классам аппроксимаций. В итоге сравнению поведения подвергались две версии программ: с классами исходной библиотеки и со смоделированными классами. Все сгенерированные тесты успешно были скомпилированы и запущены в среде разработки IntelliJ Idea, что подтверждает их синтаксическую корректность. Ошибки другого типа в тестах не являются критичными, так как тесты используются исключительно для сравнения поведения эталонной и модельной реализаций.

Следует отметить следующие особенности эксперимента: в рамках разработанных спецификаций классы *java.util.HashSet* и *java.util.LinkedHashSet* имеют одинаковое поведение: они построены на структурах, которые, в отличие от оригинального класса *java.util.HashSet*, всегда выдают элементы в порядке их добавления. В рамках работ по моделированию стандартной библиотеки Java было принято решение применить такую аппроксимацию: пренебречь порядком элементов. С учетом данного допущения все сгенерированные тест-кейсы с помощью Randoor

могут быть пройдены, если создавать их для всех методов класса *java.util.LinkedHashSet*, за исключением конструктора *HashSet(int, float, boolean)*, который позволяет изменить порядок доступа к элементам. В этом случае при вызове метода *toString* порядок всегда сохраняется, как в классе *java.util.LinkedHashSet*. Поэтому тесты генерировались для *java.util.LinkedHashSet* и *java.util.LinkedHashMap*, а заменялись на *generated.java.util.HashSet* и *generated.java.util.HashMap*.

На текущем этапе разработки инструментария парсер и транслятор не предоставляют средств для работы с объявлениями обобщенных типов данных. Их поддержка будет добавлена в будущем. Вследствие этого метод *toArray* класса *java.util.LinkedList* (и других обобщенных коллекций) после выполнения трансляции имеет немного отличающуюся сигнатуру. В оригинальном классе его объявление применяет типовой параметр (рис. 7, строка А), а в сгенерированном классе метод применяет тип *java.lang.Object* (рис. 7, строка В). На работу применяемого инструмента статического анализа данное отличие не оказало большого влияния, однако это различие необходимо учитывать при использовании других инструментов.

Следует отметить, что реализация аппроксимации данного метода намеренно нарушает правила типизации языка Java: результирующий массив состоит из ссылок на элементы типа *java.lang.Object* вместо обращения к методам *java.lang.Class.getComponentType()* и *java.lang.reflect.Array.newInstance()*. При использовании аппроксимаций по прямому назначению (с применением РАЕ) данное отличие не оказало существенного влияния на результаты моделирования и анализа. По этой причине этот метод был исключен из генерации тест-кейсов при использовании утилиты Randoor. Иначе это приводило к выбросу исключения *java.lang.ClassCastException*. Пример теста, демонстрирующего ошибку, показан на рис. 8.

Для проведения эксперимента использовалась среда исполнения OpenJDK и инструмент Randoor (версии 4.3.2). При генерации тест-кейсов с помощью Randoor использовался детерминированный подход. Параметры запуска генератора тестов и список целевых методов доступны публично (<https://github.com/vpa->

```
A) public <T> T[] toArray(T[] a) { ... }
B) public Object[] toArray(Object[] a) { ... }
```

■ **Рис. 7.** Вариации сигнатуры метода класса *LinkedList*

■ **Fig. 7.** Method signature variations of the *LinkedList* class

```

1 LinkedList<String> list = new LinkedList<>();
2 String[] empty = new String[0];
3 String[] array = list.toArray(empty); // <- error
...

```

■ **Рис. 8.** Упрощенный фрагмент исходного кода генерируемого теста

■ **Fig. 8.** Simplified generated test source code

research/jsl-spec-validation). В табл. 2 приведены результаты эксперимента. Как видно из таблицы, количество удачно выполненных тест-кейсов почти для всех коллекций 100 %. Однако некоторые тест-кейсы для класса *java.util.Optional* завершились ошибкой. Это связано с вызовом метода *getClass*, который возвращает внутреннее имя класса JVM. В указанных тест-кейсах он вместо ожидаемого оригинального класса *java.util.Optional* возвращает имя подмененного с по-

■ **Таблица 2.** Оценка корректности моделей

■ **Table 2.** Evaluation of the correctness of the models

Имя класса	Общее количество сгенерированных тест-кейсов	Удачно выполненные тест-кейсы	Неудачно выполненные тест-кейсы
java.util.ArrayList	1099	1099	0
java.util.LinkedList	1065	1065	0
java.util.LinkedHashSet	1042	1042	0
java.util.LinkedHashMap	987	987	0
java.util.Optional	1017	1013	4
java.util.OptionalInt	1100	1100	0
java.util.OptionalLong	1106	1106	0
java.util.OptionalDouble	1117	1117	0

```

1 Optional<?> optA = Optional.of(1);
2 Class<?> clazz = optA.getClass();
3 Optional<?> optB = Optional.of(clazz);
4 String str = optB.toString();
5 assertEquals(
6     "" + str + " != 'Optional[class java.util.Optional]'",
7     str,
8     "Optional[class java.util.Optional]"
9 );

```

■ **Рис. 9.** Упрощенный исходный код генерируемого теста

■ **Fig. 9.** Simplified source code of a generated test

мощью *java agent* класса, т. е. *generated.java.util.Optional*. В рамках данного эксперимента это отличие не является критическим, так как не влияет на функциональность сгенерированного кода при использовании в составе PAE. Сценарий непройденных тест-кейсов выглядит следующим образом (рис. 9).

Из приведенного эксперимента видно, что поведение классов коллекций, сгенерированных по разработанным спецификациям, идентично поведению оригинальных классов из JDK.

### Эффективность подхода

Второй эксперимент был поставлен с целью оценить эффект от использования аппроксимаций поведения при выполнении анализа программ. Эксперимент заключался в следующем: был произведен запуск символьной виртуальной машины USVM (<https://github.com/UnitTestBot/usvm>) в режиме генерации тестов для классов пакета *org.apache.commons.collections4.set* проекта Apache Commons-collections (<https://github.com/apache/commons-collections/tree/commons-collections-4.5.0-M1-RC1>). Запуск производился в двух конфигурациях: с применением аппроксимаций, полученных после трансляции LibSL-спецификаций, и без них.

Результаты эксперимента представлены в табл. 3. Для каждого класса были получены такие характеристики, как количество методов, среднее покрытие по методам и общее время анализа. Из рассмотрения исключены конструкторы для данных классов, являющиеся тривиальными или явно (и только) использующие методы, анализ которых уже проводился отдельно. Показатель покрытия оценивался USVM автоматически на основе выполненных инструкций. Также было вычислено сокращение покрытия и сокращение времени анализа.

Полученные данные демонстрируют сокращение общего времени анализа более чем на 30 %, сокращение времени анализа для каждого класса не менее чем на 10 %, а также поддержание приемлемого (3 %) сокращения общего уровня покрытия при использовании LibSL-аппроксимаций. Значительное падение показателя покрытия для некоторых методов было вызвано применением неточных аппроксимаций в контексте малого количества методов в классе, что может быть ликвидировано повышением точности модели. При этом необходимо отметить, что при проведении экспериментов с усилением временных ограничений на анализ каждого метода до 30 с значение показателя «Покрытие» сохраняется, а сокращение времени анализа по-прежнему остается на уровне 30 %.

Разработанные один раз аппроксимации функций стандартной библиотеки могут в даль-

■ **Таблица 3.** Оценка эффективности применения аппроксимаций  
 ■ **Table 3.** Evaluation of the effectiveness of using approximations

Имя класса (число методов в классе)	Без аппроксимаций		С применением аппроксимаций		Сокращение	
	Покрытие, %	Время анализа, с	Покрытие, %	Время анализа, с	покрытия, %	времени анализа, %
CompositeSet (23)	84,04	634,3	78,74	327,8	5,30	48,32
ListOrderedSet (19)	91,05	364,3	86,58	205,6	4,47	43,56
MapBackedSet (18)	99,22	424,0	90,00	289,1	9,22	31,82
PredicatedNavigableSet (12)	100,00	349,9	100,00	244,1	0,00	30,24
PredicatedSet (3)	100,00	75,4	100,00	1,8	0,00	97,61
PredicatedSortedSet (7)	100,00	265,5	100,00	218,5	0,00	17,70
TransformedNavigableSet (13)	99,15	349,9	97,54	273,0	1,61	21,98
TransformedSet (4)	100,00	92,2	92,00	0,5	8,00	99,46
TransformedSortedSet (8)	98,63	287,2	96,00	219,9	2,63	23,43
UnmodifiableNavigableSet (19)	100,00	366,9	100,00	325,0	0,00	11,42
UnmodifiableSet (9)	100,00	28,5	94,44	0,1	5,56	99,65
UnmodifiableSortedSet (12)	100,00	152,5	100,00	131,3	0,00	13,90
<b>Общее</b>	<b>97,67</b>	<b>3390,6</b>	<b>94,61</b>	<b>2236,7</b>	<b>3,07</b>	<b>34,03</b>

нейшем неоднократно применяться при анализе проектов, использующих стандартную библиотеку, а таких проектов – большинство. Таким образом, временные затраты на создание моделей классов и функций многократно окупаются. Кроме того, очевидный выигрыш использования моделей проявляется также в ситуациях, когда анализ исходных проектов не может завершиться либо из-за чрезмерной сложности этих проектов, либо из-за слишком жестких ограничений по времени, накладываемых на анализ.

#### Ограничения подхода и дальнейшее развитие

Как было отмечено выше, спецификации, представленные отдельно от кода моделируемой функциональности, требуют правки при появлении изменений в оригинальном поведении и интерфейсе, а также при новых возможностях и оптимизациях, предоставляемых применяемым целевым представлением и инструментами анализа.

Кроме того, одним из ограничений к широкому применению представленного подхода к моделированию поведения библиотек является необходимость ручного создания спецификаций, что считается рутинной работой и требует особого внимания при описании моделей. Для автоматизации этого процесса уже реализованы инструменты (<https://github.com/vpa-research/jsl-спеc-skeleton-generator>), позволяющие генерировать заготовки LibSL-спецификаций на

основе интерфейсных объявлений классов и их публичных элементов. Частичной автоматизации можно добиться, применив инструменты, базирующиеся на восстановлении упрощенной модели [19], с последующим формированием человеко-читаемой формы, используя, например, технологии машинного обучения, как это было сделано для языков ACSL [20] и JML [21], на основе подстройки существующей искусственной нейронной сети [22].

Стоит отметить, что сам язык LibSL продолжает активно развиваться. В нем появляются дополнительные возможности для описания все более сложных структур данных и различных взаимодействий для обобщенных и специализированных типов данных. Развиваются также и инструменты языковой поддержки в современных средах разработки (<https://plugins.jetbrains.com/plugin/23222-libsl-support>).

#### Заключение

В статье описаны основные подходы к моделированию внешних библиотек, а также предлагается новый подход на основе спецификаций на базе языка LibSL. Этот подход позволяет моделировать поведение библиотек с разной степенью точности в зависимости от задач анализа. Также представлены экспериментальные исследования, показывающие эффективность предлага-

гаемого подхода. Полученные модели продемонстрировали сокращение времени анализа для каждого метода при сохранении приемлемого уровня покрытия автоматически сгенерированных тестов. Однако есть и некоторые ограничения: необходимость выполнять трансляцию спецификаций в некоторое промежуточное представление, требование их актуализации (моде-

лей и артефактов трансляции) при появлении изменений в поведении и интерфейсе, а также ограниченность возможностей для автоматизации процесса создания спецификаций. В целом предлагаемый подход представляет собой универсальное масштабируемое, не зависящее от языка программирования решение по моделированию внешних библиотек.

## Литература

1. Wang G., Chattopadhyay S., Gotovchits I., Mitra T., Roychoudhury A. oo7: Low-overhead defense against spectre attacks via program analysis. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2019, vol. 47, no. 11, pp. 2504–2519. doi:10.1109/TSE.2019.2953709
2. Rahaman S., Xiao Y., Afrose S., Shaon F., Tian K., Frantz M., Yao D., Kantarcioglu M. Cryptoguard: High precision detection of cryptographic vulnerabilities in massive-sized java projects. *Proc. of the 2019 ACM SIGSAC Conf. on Computer and Communications Security*, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery, 2019, pp. 2455–2472. doi:10.1145/3319535.3345659
3. Madsen M., Livshits B., Fanning M. Practical static analysis of JavaScript applications in the presence of frameworks and libraries. *Proc. of the 2013 9th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering*, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery, 2013, pp. 499–509. doi:10.1145/2491411.2491417
4. Arzt S., Rasthofer S., Fritz C., Bodden E., Bartel A., Klein J., Le Traon Y., Outeau D., McDaniel P. Flowdroid: Precise context, flow, field, object-sensitive and lifecycle-aware taint analysis for android apps. *Acm Sigplan Notices*, 2014, vol. 49, no. 6, pp. 259–269. doi:10.1145/2666356.2594299
5. Akhin M., Belyaev M., Itsykson V. *Borealis Bounded Model Checker: The Coming of Age Story*. Present and Ulterior Software Engineering. M. Mazzara, B. Meyer (eds). Springer, Cham, 2017, pp. 119–137. doi:10.1007/978-3-319-67425-4\_8
6. Delahaye M., Kosmatov N., Signoles J. Common specification language for static and dynamic analysis of C programs. *28th ACM Symp. on Applied Computing*, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery, 2013, pp. 1230–1235. doi:10.1145/2480362.2480593
7. Krüger S., Spath J., Ali K., Bodden E., Mezini M. Crysl: An extensible approach to validating the correct usage of cryptographic apis. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2019, vol. 47, no. 11, pp. 2382–2400. doi:10.1109/TSE.2019.2948910
8. Ivanov D., Menshutina A., Fokin D., Kamenev Y. UT-Bot java at the SBST2022 tool competition. *Proc. of the 15th Workshop on Search-Based Software Testing*, Pittsburgh, PA, USA, 2022. IEEE, 2022, pp. 39–40. doi:10.1145/3526072.3527529
9. Hsieh C., Mitra S. Dione: A protocol verification system built with Dafny for i/o automata. *Integrated Formal Methods: 15th Intern. Conf.*, Bergen, Norway, 2–6 December 2019. Springer International Publishing, 2019, pp. 227–245. doi:10.1007/978-3-030-34968-4\_13
10. Huisman M., Ahrendt W., Bruns D., Hentschel M. *Formal Specification with JML*. Karlsruhe, Karlsruhe Institute of Technology, 2014. 51 p.
11. Ouadjaout A., Miné A. A library modeling language for the static analysis of C programs. *Intern. Static Analysis Symp.*, Springer, Cham, 2020, pp. 223–247. doi:10.1007/978-3-030-65474-0\_11
12. Промский А. В. Верификация Си-программ: объяснение условий корректности и стандартная библиотека. *Моделирование и анализ информационных систем*, 2011, т. 18, № 4, с. 157–167. doi:10.3103/S0146411612070127
13. Ball T., Rajamani S. K. *SLIC: A Specification Language for Interface Checking (of C)*. Technical Report MSR-TR-2001-21, Microsoft Research, 2001. Vol. 105. 106 p.
14. Chelf B., Engler D., Hallem S. How to write system-specific, static checkers in Metal. *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, 2002, no. 28, pp. 51–60. doi:10.1145/634636.586097
15. Mossakowski T., Haxthausen A. E., Sannella D., Tarlecki A. *CASL – the Common Algebraic Specification Language*. Logics of Specification Languages. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 241–298. doi:10.1007/978-3-540-74107-7\_5
16. Беляев М. В., Романенков Е. С., Игнатьев В. Н. Моделирование библиотечных функций в промышленном статическом анализаторе кода. *Труды Института системного программирования РАН*, 2020, т. 32, № 3, с. 21–31. doi:10.15514/ISPRAS-2020-32(3)-2
17. Itsykson V. LibSL: language for specification of software libraries. *Softw. Eng.*, 2018, vol. 9, pp. 209–220. doi:10.17587/prin.9.209-220
18. Qiu D., Li B., Leung H. Understanding the API usage in Java. *Information and Software Technology*, 2016, vol. 73, pp. 81–100. doi:10.1016/j.infsof.2016.01.011
19. Astorga A., Srisakaokul S., Xiao X., Xie T. PreInfer: Automatic inference of preconditions via symbolic analysis. *2018 48th Annual IEEE/IFIP Intern. Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN)*, Luxem-

bourg, Luxembourg, 2018. IEEE, 2018, pp. 678–689. doi:10.1109/DSN.2018.00074

20. Wen C., Cao J., Su J., Xu Z., Qin S., He M., Li H., Cheung S., Tian C. *Enchanting Program Specification Synthesis by Large Language Models Using Static Analysis and Program Verification*. Computer Aided Verification. CAV 2024. A., Gurfinkel, V. Ganesh (eds). Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham, 2024, vol. 14682, pp. 302–328. doi:10.1007/978-3-031-65630-9\_16

21. Ma L., Liu S., Li Y., Xie X., Bu L. SpecGen: Automated generation of formal program specifications via large language models. arXiv preprint arXiv:2401.08807. 2024.

22. Kogler P., Falkner A., Sperl S. Reliable generation of formal specifications using large language models. *SE 2024-Companion*. Gesellschaft für Informatik eV, 2024, pp. 141–153. doi:10.18420/sw2024-ws\_10

UDC 004.4'42, 004.4'418, 004.434  
doi:10.31799/1684-8853-2024-4-24-39  
EDN: RIUJGA

### Modeling the behavior of standard library functions in program analysis

V. M. Itsykson<sup>a</sup>, PhD, Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-0276-4517, itsykson@yandex.ru

M. P. Onischuck<sup>b</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0001-5359-0161

V. V. Kechin<sup>a</sup>, Master Student, orcid.org/0009-0006-0845-2740

Y. A. Alekseev<sup>c</sup>, Research Engineer, orcid.org/0009-0002-6925-6541

<sup>a</sup>ITMO University, 49, Kronverksky Pr., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikheskaia St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>c</sup>Coleman Tech LLC, 40, Mira Ave., room. 3/1, 129090, Moscow, Russian Federation

**Introduction:** The static analysis of software projects using external libraries is a difficult task, since it is associated with an exponential increase in the number of analyzed program traces, which leads to the need to artificially limit the analysis time or use simplifications leading to a deterioration in the completeness and accuracy of the analysis or to a decrease in test coverage. **Purpose:** To develop an approach for modeling the behavior of external libraries based on formal specifications approximating the behavior of the original functions, which makes it possible to simplify the analyzed projects and reduce the analysis time. **Methods:** Modeling the functions of the standard library using formal specifications in the LibSL language and subsequent automatic synthesis of simple equivalents of library functions based on formal descriptions. **Results:** We propose an approach to the specification of functions of the standard library of the Java language in the LibSL language, which replaces the most commonly used libraries and their functions with formal specifications that repeat the externally visible behavior of functions. The resulting approximating descriptions are translated into efficient replacements for the functions of the standard library and substituted for the analyzer instead of the original library functions. Experiments conducted on a part of the standard library of the Java language have shown the applicability of the approach: the analysis time of industrial-grade projects has been reduced by 30%. **Practical relevance:** The developed approach makes it possible to significantly expand the scope of static analysis in the tasks of defect detection and test generation, since due to the reduction of the state space, the accuracy and completeness of defect detection increases, and higher coverage of the program with generated tests is ensured.

**Keywords** – standard library, formal specifications, library behavior modeling, static program analysis, test generation.

**For citation:** Itsykson V. M., Onischuck M. P., Kechin V. V., Alekseev Y. A. Modeling the behavior of standard library functions in program analysis. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 4, pp. 24–39 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-4-24-39, EDN: RIUJGA

### References

1. Wang G., Chattopadhyay S., Gotovchits I., Mitra T., Roychoudhury A. 007: Low-overhead defense against spectre attacks via program analysis. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2019, vol. 47, no. 11, pp. 2504–2519. doi:10.1109/TSE.2019.2953709
2. Rahaman S., Xiao Y., Afrose S., Shaon F., Tian K., Frantz M., Yao D., Kantarcioglu M. Cryptoguard: High precision detection of cryptographic vulnerabilities in massive-sized java projects. *Proc. of the 2019 ACM SIGSAC Conf. on Computer and Communications Security*, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery, 2019, pp. 2455–2472. doi:10.1145/3319535.3345659
3. Madsen M., Livshits B., Fanning M. Practical static analysis of JavaScript applications in the presence of frameworks and libraries. *Proc. of the 2013 9th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering*, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery, 2013, pp. 499–509. doi:10.1145/2491411.2491417
4. Arzt S., Rasthofer S., Fritz C., Bodden E., Bartel A., Klein J., Le Traon Y., Octeau D., McDaniel P. Flowdroid: Precise con-  
text, flow, field, object-sensitive and lifecycle-aware taint analysis for android apps. *Acm Sigplan Notices*, 2014, vol. 49, no. 6, pp. 259–269. doi:10.1145/2666356.2594299
5. Akhin M., Belyaev M., Itsykson V. *Borealis Bounded Model Checker: The Coming of Age Story*. In: *Present and Ulterior Software Engineering*. M. Mazzara, B. Meyer (eds). Springer, Cham, 2017, pp. 119–137. doi:10.1007/978-3-319-67425-4\_8
6. Delahaye M., Kosmatov N., Signoles J. Common specification language for static and dynamic analysis of C programs. *28th ACM Symp. on Applied Computing*, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery, 2013, pp. 1230–1235. doi:10.1145/2480362.2480593
7. Krüger S., Spath J., Ali K., Bodden E., Mezini M. Crysl: An extensible approach to validating the correct usage of cryptographic apis. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2019, vol. 47, no. 11, pp. 2382–2400. doi:10.1109/TSE.2019.2948910
8. Ivanov D., Menshutin A., Fokin D., Kamenev Y. UTBot java at the SBST2022 tool competition. *Proc. of the 15th Work-*



- shop on Search-Based Software Testing, Pittsburgh, PA, USA, 2022. IEEE, 2022, pp. 39–40. doi:10.1145/3526072.3527529
9. Hsieh C., Mitra S. Dione: A protocol verification system built with Dafny for i/o automata. *Integrated Formal Methods: 15th Intern. Conf.*, Bergen, Norway, 2–6 December 2019. Springer International Publishing, 2019, pp. 227–245. doi:10.1007/978-3-030-34968-4\_13
  10. Huisman M., Ahrendt W., Bruñs D., Hentschel M. *Formal Specification with JML*. Karlsruhe, Karlsruhe Institute of Technology, 2014. 51 p.
  11. Ouadjaout A., Miné A. A library modeling language for the static analysis of C programs. *International Static Analysis Symp.*, Springer, Cham, 2020, pp. 223–247. doi:10.1007/978-3-030-65474-0\_11
  12. Promsky A. V. C Program Verification: VC Explanation and the Standard Library. *Modeling and Analysis of Information Systems*, 2011, vol. 18, no. 4, pp. 157–167 (In Russian). doi:10.3103/S0146411612070127
  13. Ball T., Rajamani S. K. *SLIC: A Specification Language for Interface Checking (of C)*. Technical Report MSR-TR-2001-21, Microsoft Research, 2001. Vol. 105. 106 p.
  14. Chelf B., Engler D., Hallem S. How to write system-specific, static checkers in Metal. *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, 2002, no. 28, pp. 51–60. doi:10.1145/634636.586097
  15. Mossakowski T., Haxthausen A.E., Sannella D., Tarlecki A. *CASL – the Common Algebraic Specification Language*. In: *Logics of Specification Languages*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 241–298. doi:10.1007/978-3-540-74107-7\_5
  16. Belyaev M. V., Romanenkov E. S., Ignatyev V. N. Modeling of library functions in an industrial static code analyzer. *Proc. of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*, 2020, vol. 32, no. 3, pp. 21–31 (In Russian). doi:10.15514/ISPRAS-2020-32(3)-2
  17. Itsykson V. LibSL: language for specification of software libraries. *Softw. Eng.*, 2018, vol. 9, pp. 209–220. doi:10.17587/prin.9.209-220
  18. Qiu D., Li B., Leung H. Understanding the API usage in Java. *Information and Software Technology*, 2016, vol. 73, pp. 81–100. doi:10.1016/j.infsof.2016.01.011
  19. Astorga A., Srisakaokul S., Xiao X., Xie T. PreInfer: Automatic inference of preconditions via symbolic analysis. *2018 48th Annual IEEE/IFIP Intern. Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN)*, Luxembourg, Luxembourg, 2018. IEEE, 2018, pp. 678–689. doi:10.1109/DSN.2018.00074
  20. Wen C., Cao J., Su J., Xu Z., Qin S., He M., Li H., Cheung S., Tian C. *Enchanting Program Specification Synthesis by Large Language Models Using Static Analysis and Program Verification*. In: *Computer Aided Verification. CAV 2024*. A. Gurfinkel, V. Ganesh (eds). Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham, 2024, vol. 14682, pp. 302–328. doi:10.1007/978-3-031-65630-9\_16
  21. Ma L., Liu S., Li Y., Xie X., Bu L. SpecGen: Automated generation of formal program specifications via large language models. arXiv preprint arXiv:2401.08807. 2024.
  22. Kogler P., Falkner A., Sperl S. Reliable generation of formal specifications using large language models. *SE 2024-Companion*. Gesellschaft für Informatik eV, 2024, pp. 141–153. doi:10.18420/sw2024-ws\_10

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая Scopus и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>



## Метод синтеза квазиоптимальных систем с дефицитом управления на базе редукции задачи Лагранжа

А. А. Костоглотов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-4006-2436](https://orcid.org/0000-0003-4006-2436), [kostoglotov@me.com](mailto:kostoglotov@me.com)

В. О. Зехцер<sup>а</sup>, младший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0001-7307-8325](https://orcid.org/0000-0001-7307-8325)

<sup>а</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., 2, Ростов-на-Дону, 344079, РФ

**Введение:** актуальность совершенствования методов синтеза систем с дефицитом управления обусловлена тем, что они находят широкое применение в беспилотных летательных аппаратах, роботах-манипуляторах и других устройствах, у которых существуют режимы работы, когда система становится ограниченно управляемой. Линейные законы управления, как известно, оказываются недостаточно эффективны в этом случае, что определяет необходимость проведения процедуры синтеза в исходной нелинейной постановке. **Цель:** разработать метод синтеза, обеспечивающий повышение эффективности процессов управления и расширение области устойчивости нелинейной динамической системы в сравнении с традиционным методом принципа декомпозиции. **Методы:** принцип декомпозиции в совокупности с редукцией оптимизационной задачи Лагранжа к изопериметрической позволяет провести процедуру синтеза с использованием фиктивных управлений и учетом коррекции поверхности переключения. **Результаты:** на основе принципа декомпозиции и редукции задачи Лагранжа определена структура квазиоптимальной системы управления; выбор параметров поверхности переключения дает возможность достичь минимума квадратичного критерия управления нелинейной системы с дефицитом управления в положении неустойчивого равновесия. Путем численного моделирования установлено, что предлагаемое решение позволяет увеличить область устойчивости на 10 % и повысить качество функционирования по квадратичному критерию в режиме больших отклонений в среднем на 20–25 % в сравнении с законом, полученным на основе прямого применения принципа декомпозиции. **Практическая значимость:** благодаря оригинальности предложенной процедуры синтеза повышена эффективность функционирования системы с дефицитом управлений, что представляет практический интерес для решения задач проектирования управляющих контроллеров.

**Ключевые слова** — квазиоптимальный закон управления, динамическая система с дефицитом управляющих воздействий, многомерная нестационарная нелинейная динамическая система, поверхность переключения, обратный маятник на тележке.

**Для цитирования:** Костоглотов А. А., Зехцер В. О. Метод синтеза квазиоптимальных систем с дефицитом управления на базе редукции задачи Лагранжа. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 4, с. 40–49. doi:10.31799/1684-8853-2024-4-40-49, EDN: RJAFOE

**For citation:** Kostoglotov A. A., Zekhtser V. O. Synthesis method of quasi-optimal underactuated systems based on the reduction of Lagrange problem. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 4, pp. 40–49 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-4-40-49, EDN: RJAFOE

### Введение

Беспилотные летательные аппараты, роботы-манипуляторы и другие устройства имеют совокупность режимов работы, когда система становится ограниченно управляемой и может быть приближенно описана моделью обратного маятника [1, 2]. При этом такие динамические системы характеризуются существенной нелинейностью [3, 4], и перекрестные связи могут привести к неконтролируемым возмущениям и флуктуациям [5]. Широко распространенные линейные законы управления обеспечивают функционирование выделенного режима движения [6] и малоэффективны при априорно неизвестных воздействиях и дефиците управления, что требует использования методов адаптации [7–9], скользящих режимов [10] или модели прогнозирующего управления [11].

Еще более продуктивным является подход к синтезу управления в нелинейной постановке, которым является принцип декомпозиции [6, 12–14].

В работах [15–17] показано, что использование редукции оптимизационной задачи Лагранжа к изопериметрической приводит к коррекции кривой переключения и определяет квазиоптимальное решение задачи синтеза [18], что позволяет повысить эффективность управления [19] в сравнении с известными методами [6, 12, 13, 20].

Научной задачей является разработка метода синтеза квазиоптимальных нелинейных систем с дефицитом управления на базе принципа декомпозиции с коррекцией поверхности переключения, результатом решения которой станет повышение качества процессов управления и расширение области устойчивости на основе разработанного метода в сравнении с известными [6, 12, 13, 20].

## Постановка задачи управления

Объект управления описывается системой уравнений в обобщенных координатах  $\mathbf{q} = \|q_s\|_{s=1}^n$ , которая относится к классу уравнений Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + u_i(t), \quad i = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n a_{ik}(\mathbf{q}) \dot{q}_i \dot{q}_k, \quad a_{ik}(\mathbf{q}) = a_{ki}(\mathbf{q}). \quad (2)$$

Относительно коэффициентов  $a_{ik}(\mathbf{q})$  предполагается, что они ограничены при всех  $\mathbf{q}$  вместе с частными производными первого порядка. Матрица коэффициентов  $\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \|a_{ik}(\mathbf{q})\|_{i,k=1}^n$  в выражении кинетической энергии механических систем при всех  $q$  является матрицей положительно определенной квадратичной формы. Через  $Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$  обозначены ограниченные обобщенные силы, обусловленные наличием различного рода внешних воздействий. Обозначим  $\|q_v\|_{v=1}^m$  обобщенные координаты, уравнения Лагранжа которых содержат управления, а  $\|q_j\|_{j=m+1}^n$  – обобщенные координаты, в уравнениях движения которых отсутствуют управляющие воздействия. Рассматривается случай  $m < n$ , и объект управления (1) относится к классу систем с дефицитом управлений.

Вектор допустимых управлений содержит нулевые компоненты и представляет собой вектор суммируемых функций  $\mathbf{u}(t) = \|u_s(t)\|_{s=1}^n$  в выпуклой области  $U$ :

$$\mathbf{u}(t) \in U = \left\{ u_s(t) : |u_s(t)| \leq h_s, \quad s = \overline{1, n} \right\}. \quad (3)$$

Пусть требуется обеспечить переход системы (1) из состояния  $t = t_0, \mathbf{q}(t_0), \dot{\mathbf{q}}(t_0)$  в допустимое для системы (1)–(3) состояние  $t = t_1, \mathbf{q}(t_1), \dot{\mathbf{q}}(t_1)$  за конечный промежуток времени  $[t_0, t_1]$ .

Рассмотрим задачу поиска такого управления (3), чтобы интегральный критерий достигал минимума:

$$J(\mathbf{q}) = \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{q}(t)) dt \rightarrow \min. \quad (4)$$

Целевая функция  $F(\mathbf{q})$  удовлетворяет требованиям к положительно определенной выпуклой функции.

Решение задачи синтеза управляемой системы (1)–(3) без учета критерия (4) подробно изложено в работах Пятницкого [12–14].

Решение рассмотренной экстремальной задачи при условии выпуклости (4) существует и может быть получено с использованием принципа

максимума Понтрягина в форме программного управления, что не позволяет эффективно его применять, поскольку любое изменение параметров системы и ограничений приводит к необходимости поиска соответствующей структуры обратной связи.

Редукция рассмотренной оптимизационной задачи к изопериметрической дает возможность получить приближенное решение в смысле минимума расширенного функционала, который построен на базе аддитивной свертки критерия (4) и интеграла действия [16]. Это позволяет найти структуру множества квазиоптимальных решений, полученных в форме синтеза, для рассмотренного класса задач управления. На примере классической задачи А. Т. Фуллера [16] показано, что полученное множество содержит оптимальное решение, что определяет связь квазиоптимального и оптимального управления.

В настоящей работе предложен метод синтеза квазиоптимальных систем с дефицитом управления на базе редукции задачи Лагранжа [16, 17] и принципа декомпозиции, обеспечивающий повышение качества управления в сравнении с прямым применением принципа декомпозиции.

## Принцип декомпозиции при дефиците управлений

Установлено [20], что если учесть ограничение на параметры состояния по тем степеням свободы, где нет управлений, то задачу можно свести к случаю нестационарных объектов, кинетическая энергия которых представляется в виде суммы однородных форм  $T_2 + T_1 + T_0$ , где

$$T_2 = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n a_{ik}(\mathbf{q}, t) \dot{q}_i \dot{q}_k; \quad T_1 = \sum_{i=1}^n a_i(\mathbf{q}, t) \dot{q}_i; \\ T_0 = T_0(\mathbf{q}, t).$$

Уравнение Лагранжа нестационарной механической системы можно записать в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_2}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_2}{\partial q_i} = Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) - \\ - \left[ \frac{d}{dt} \frac{\partial T_1}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_1}{\partial q_i} \right] + \frac{\partial T_0}{\partial q_i} + u_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где члены, связанные с составляющими  $T_1$  и  $T_0$  кинетической энергии, могут рассматриваться как дополнительные обобщенные силы. Введем обозначения

$$\tilde{Q}_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) - \left[ \frac{d}{dt} \frac{\partial T_1}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_1}{\partial q_i} \right] + \frac{\partial T_0}{\partial q_i}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Запишем систему (5) в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_2}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_2}{\partial q_i} = \tilde{Q}_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + u_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

предположим, что выполнены условия

$$\sup |\tilde{Q}_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)| < h_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Условия (7) требуют выполнения требований ограниченности

$$\left[ \frac{d}{dt} \frac{\partial T_1}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_1}{\partial q_i} \right] + \frac{\partial T_0}{\partial q_i}, \quad i = \overline{1, n},$$

которые можно сформулировать следующим образом. Если через  $\mathbf{q} = \|q_v\|_{v=1}^m$  обозначить те обобщенные координаты, уравнения Лагранжа которых содержат управления, а через  $\mathbf{x} = \|x_j\|_{j=m+1}^n$  — обобщенные координаты, в уравнениях движения которых отсутствуют управляющие воздействия, то движение объекта будет описываться дифференциальными уравнениями Лагранжа

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_v} - \frac{\partial T}{\partial q_v} &= Q_v(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) + u_v(t), \quad v = \overline{1, m}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_j} - \frac{\partial T}{\partial x_j} &= \bar{Q}_j(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t), \\ j &= \overline{m+1, n}, \end{aligned} \quad (8)$$

где через  $T = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$  обозначена кинетическая энергия.

Предполагается, что для некоторых классов движений системы (8) при  $\mathbf{u}(t) \in U$  переменные  $x_j(t)$  изменяются так, что выполняются неравенства

$$|x_j| \leq c_0, \quad |\dot{x}_j| \leq c_1, \quad j = \overline{m+1, n}. \quad (9)$$

Оценки (9) бывают известны либо из экспериментальных исследований, либо из результатов теоретического анализа. При наличии оценок (9) можно исключить из рассмотрения переменные  $x_j(t)$  и от системы (8) перейти к анализу упрощенной системы

$$\begin{aligned} \bar{T}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) &= \bar{T}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t)) + \\ &+ \bar{T}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t)) + \bar{T}_0(\mathbf{q}, \mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t)), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\bar{T}_2$ ,  $\bar{T}_1$  и  $\bar{T}_0$  — квадратичные формы для  $\dot{q}_v$ ,  $v = 1, m$ , а  $\mathbf{x}(t)$  можно произвольно выбирать из множества, удовлетворяющего (9).

Это позволяет синтез управления механической системой (6), (7) провести с использованием принципа декомпозиции. При этом необходимо ввести соответствующий аналог условий полной управляемости (7), которые должны выполняться по  $x(t)$  из класса функций, удовлетворяющих неравенствам (9) [20].

### Метод синтеза квазиоптимальной системы управления на основе принципа декомпозиции с коррекцией поверхности переключения

В развернутой форме уравнения (1) записываются в виде

$$\begin{aligned} &\sum_{k=1}^n a_{ik}(\mathbf{q}) \ddot{q}_k + \\ &+ \sum_{k,v=1}^n \left( \frac{\partial a_{ik}}{\partial q_v} \dot{q}_k \dot{q}_v - \frac{1}{2} \frac{\partial a_{ik}}{\partial q_i} \dot{q}_k \dot{q}_v \right) = \\ &= Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + u_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (11)$$

Из (11) вытекает, что движение механической системы описывается существенно нелинейными дифференциальными уравнениями, где  $a_{ik}(\mathbf{q})$  определяют степень взаимовлияния степеней свободы. Взаимовлияние в системе (11) осуществляется также и через силовое поле, т. е. через обобщенные силы  $Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ . Однако взаимовлияние через силовое поле не является существенным, и основное проявление перекрестных связей между степенями свободы определяется коэффициентами  $a_{ik}(\mathbf{q})$  [12].

Уравнения движения механических систем в форме уравнений Лагранжа (1) ковариантны по отношению к преобразованиям обобщенных координат [13]. Это значит, что в любых обобщенных координатах  $\boldsymbol{\varphi} = \|\varphi_i\|_{i=1}^n$  уравнения движения выписываются по тому же алгоритму, что и уравнения (1) и в общем случае с учетом коэффициентов интенсивности управлений  $\bar{b}_{ik}(\boldsymbol{\varphi})$ :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \dot{\varphi}_i} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varphi_i} &= \bar{Q}_i(\boldsymbol{\varphi}, \dot{\boldsymbol{\varphi}}, t) + \\ &+ \sum_{k=1}^n \bar{b}_{ik}(\boldsymbol{\varphi}) u_k(t), \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (12)$$

Функция  $\bar{T}(\boldsymbol{\varphi}, \dot{\boldsymbol{\varphi}})$  получается из  $T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  подстановкой формул невырожденного преобразования  $\mathbf{q} = \mathbf{q}(\boldsymbol{\varphi})$  и выражений для обобщенных скоростей

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \boldsymbol{\varphi}} \dot{\boldsymbol{\varphi}}, \quad \det \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \boldsymbol{\varphi}} = \det \left\| \frac{\partial q_i}{\partial \varphi_k} \right\|_{i,k=1}^n \neq 0.$$

Обобщенные силы  $\bar{Q}_i$  и коэффициенты  $\bar{b}_{ik}(\boldsymbol{\varphi})$  определяются из равенств [6]

$$\sum_{i=1}^n (Q_i + u_i) dq_i = \sum_{s=1}^n \left( \bar{Q}_s + \sum_{v=1}^n \bar{b}_{sv}(\boldsymbol{\varphi}) u_v \right) d\varphi_s$$

с учетом преобразования  $\mathbf{q} = \mathbf{q}(\boldsymbol{\varphi})$ .

Такие преобразования не выводят систему из класса уравнений Лагранжа, дают возможность выбирать форму представления управляющих воздействий и использовать принцип декомпозиции для синтеза структуры управляемой системы.

Рассмотрим систему (11) с фиктивным управлением [21]. Введем вектор фиктивного управления  $\mathbf{u}_\Phi$ ,  $|u_{\Phi i}| < h_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , элементы которого не содержат нулевых компонент, т. е. все уравнения движения содержат управляющие воздействия. Система (11) в векторной форме имеет следующий вид:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{S}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + \mathbf{u}_\Phi, \quad (13)$$

$$\text{где } S_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \sum_{k,v=1}^n \left( \frac{\partial \alpha_{ik}}{\partial q_v} \dot{q}_k \dot{q}_v - \frac{1}{2} \frac{\partial \alpha_{ik}}{\partial q_i} \dot{q}_k \dot{q}_v \right), \quad i = \overline{1, n}.$$

Система (13) допускает представление в виде

$$\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{S}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{Q}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{u}_\Phi, \quad (14)$$

где  $\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{q})$  — матрица, обратная  $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ ;  $\mathbf{S}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{S}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ ;  $\mathbf{Q}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ .

Фиктивное управление в соответствии с принципом декомпозиции [20] имеет вид

$$u_{\Phi k} = -h_k \operatorname{sign} \left[ \sum_{s=1}^n \alpha_{sk}^{-1}(\mathbf{q})(\dot{q}_s - v_s(t)) \right], \quad k = \overline{1, n}. \quad (15)$$

где функции  $v_i$  определяются начальным и конечным состоянием системы (1) и принадлежат множеству  $V$ ,  $V = \{v_i(t) : |v_i(t)| \leq \alpha_i, |\dot{v}_i(t)| \leq \beta_i, i = \overline{1, n}\}$ , существование величин  $\alpha_i, \beta_i$  гарантируется известной теоремой [12].

Тогда действительное управление  $u$  имеет ненулевые компоненты

$$u_i = -h_i \operatorname{sign} \left[ \sum_{s=1}^n \alpha_{si}^{-1}(\mathbf{q})(\dot{q}_s - v_s(t)) \right] \quad (16)$$

при  $i = \overline{1, m}$  и нулевые при  $i = \overline{m+1, n}$  в замкнутой системе управления (1)

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \alpha_{ik}(\mathbf{q})\dot{q}_i + \sum_{k,i=1}^n \left( \frac{\partial \alpha_{ik}}{\partial q_v} \dot{q}_k \dot{q}_v - \frac{1}{2} \frac{\partial \alpha_{ik}}{\partial q_i} \dot{q}_k \dot{q}_v \right) = \\ = Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + u_i. \end{aligned} \quad (17)$$

Для системы (17) при переводе из начального состояния  $t = t_0$ ,  $\mathbf{q}(t_0)$ ,  $\dot{\mathbf{q}}(t_0)$  в допустимое  $t = t_1$ ,  $\mathbf{q}(t_1)$ ,  $\dot{\mathbf{q}}(t_1)$ , функции  $v_i = ((\dot{q}_i - \dot{q}_i(t_1)) + \lambda_i(q_i - q_i(t_1)))$ ,  $\lambda_i > 0$ ,  $i = \overline{1, n}$  [12].

В случае, когда требуется обеспечить движение системы по заданной программе,  $q_i = \varphi_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , то  $v_i = (\dot{q}_i - \dot{\varphi}_i(t)) + \lambda_i(q_i - \varphi_i(t))$ ,  $\lambda_i > 0$ , условие  $v \in V$  сводится к условиям устойчивости движения, а управления имеют вид

$$u_i = -h_i \operatorname{sign} \left[ \sum_{s=1}^n \left( \alpha_{si}^{-1}(\mathbf{q})(\dot{q}_s - \dot{\varphi}_s(t)) + \lambda_s(q_s - \varphi_s(t)) \right) \right] \quad (18)$$

при  $i = \overline{1, m}$  и нулевые при  $i = \overline{m+1, n}$  [12].

Поверхность переключения определяется функциями  $v_i$  в совокупности с коэффициентами  $\alpha_{si}^{-1}$  и может быть выбрана исходя из требований к качеству управляемого процесса (4).

При необходимости обеспечить условие минимума целевого функционала (4) для каждой степени свободы в режиме декомпозиции с использованием результатов [16] при  $\varphi_s(t) = 0$  и  $F(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n q_s^2$ , кривую переключения можно скорректировать. В результате она имеет структуру [17]

$$\Psi_s(q_s, \dot{q}_s) = \left[ \alpha_{1s} q_s + \alpha_{2s} \frac{|\dot{q}_s| \dot{q}_s}{|q_s| + \alpha_{3s}} \right], \quad s = \overline{1, n} \quad (19)$$

и реализует закон квазиоптимального управления,  $\alpha_{1s}, \alpha_{2s}, \alpha_{3s}$  — параметры закона управления для каждой степени свободы.

С учетом (18), (19) получим структуру управляемой по критерию (4) квазиоптимальной системы

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + u_i; \\ u_i = -h_i \operatorname{sign} \left[ \sum_{s=1}^n \alpha_{si}^{-1}(\mathbf{q}) \Psi_s(q_s, \dot{q}_s) \right], \quad i = \overline{1, m}, \\ u_i = 0, \quad i = \overline{m+1, n}. \end{aligned} \quad (20)$$

Зависимость управления в (20) от  $\alpha_{si}^{-1}(\mathbf{q})$  является существенной [13], поскольку в противном случае изменение знака  $\alpha_{si}^{-1}(\mathbf{q})$  во время движения может привести к дестабилизирующему действию управлений [12].

Таким образом, определена структура управления, выполнение условий (9) и (7) обеспечивает

управляемость системы (20), выбор параметров поверхности переключения  $\Psi_s(q_s, \dot{q}_s)$  обеспечивает квазиоптимальное управление системой Лагранжа по критерию (4).

Проведем анализ траекторий системы (20) из произвольного состояния в состояние покоя. Если для полученного квазиоптимального управления выбрать линию переключения таким образом, что знак  $\sum_{i=1}^n \alpha_{si}^{-1}(\mathbf{q})\Psi_i(q_i, \dot{q}_i)$ ,  $s = \overline{1, n}$  совпадает со знаком  $\dot{q}_s$ , то из теоремы механики о кинетической энергии с учетом превышения ресурсов управляющих сил над ресурсом внешних сил следует [12]

$$\dot{T} = \sum_{s=1}^n \dot{q}_s \left( Q_s - h_s \text{sign} \left[ \sum_{i=1}^n \alpha_{si}^{-1}(\mathbf{q})\Psi_i(q_i, \dot{q}_i) \right] \right) \leq \leq -2\delta\sqrt{T}, \delta > 0.$$

Это значит, что из любого положения система (20) за конечное время переходит в состояние покоя [11] при обеспечении минимума расширенного функционала, который построен на базе аддитивной свертки критерия (4) и интеграла действия.

Для анализа эффективности полученного решения задачи синтеза проведем численное моделирование для системы с дефицитом управляющих воздействий в неустойчивом положении.

### Анализ эффективности предложенного метода при управлении перевернутым маятником на основе численного моделирования

Для демонстрации эффективности предложенного метода управления используем модель перевернутого маятника, который является упрощенным вариантом моделей беспилотных летательных аппаратов, манипуляторов, антенных систем, опор и конструкций при анализе их устойчивости.

Рассмотрим нелинейную модель обратного маятника на тележке в обобщенных координатах  $\mathbf{q} = [s, \varphi]^T$ , где  $s$  — горизонтальное перемещение и  $\varphi$  — угол отклонения обратного маятника. Уравнения Лагранжа 2-го рода с учетом трения, предположения о малой массе маятника в сравнении с массой тележки  $m_p \ll M$  и пренебрежения горизонтальной силой реакции оси маятника имеют вид [22]

$$\begin{cases} \ddot{s} = \frac{\mu - k_s \dot{s}}{M}; \\ \ddot{\varphi} = \frac{g}{L'} \sin \varphi - \ddot{s} \frac{1}{L'} \cos \varphi, \end{cases} \quad (21)$$

где  $\mu$  — сила ограниченной интенсивности, воздействующая на тележку;  $k_s$  — коэффициент трения;  $g$  — гравитационное ускорение;

$$L' = \frac{I + m_p l^2}{m_p l}, \quad I - \text{момент инерции, } l - \text{расстояние}$$

яние между осью маятника и центром тяжести.

Ставится задача синтеза управления системой (21). В соответствии с целью управления необходимо обеспечить стабилизацию верхнего неустойчивого положения равновесия при минимуме критерия эффективности

$$J = \int_0^T F(\mathbf{q}) dt = \int_0^T \frac{1}{2} (s^2 + \varphi^2) dt \rightarrow \min. \quad (22)$$

Проведем преобразования, необходимые для процедуры синтеза управления в соответствии с разработанным методом.

Запишем систему (21) в виде

$$\begin{cases} \ddot{s} = u; \\ \ddot{\varphi} = \frac{g}{L'} \sin \varphi - \frac{1}{L'} \cos \varphi \cdot u, \end{cases} \quad (23)$$

где  $u = \frac{\mu - k_s \dot{s}}{M}$ , ограничение силы воздействия на тележку  $|u| \leq h$ .

Представим систему (23) с использованием фиктивных управлений  $u_s(s, \dot{s})$  и  $u_\varphi(\varphi, \dot{\varphi})$  в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{s} = b_s u_s; \\ \dot{\varphi} = Q_\varphi(\varphi) - b_\varphi u_\varphi, \end{cases} \quad (24)$$

где  $b_s = 1$ ;  $b_\varphi = \frac{1}{L'} \cos \varphi$ ;  $Q_\varphi(\varphi) = \frac{g}{L'} \sin \varphi$ .

Тогда структура системы управления в соответствии с предложенным методом имеет вид [16]

$$\begin{cases} \dot{s} = -h \text{sign}(b_s \Psi_s + b_\varphi \Psi_\varphi); \\ \dot{\varphi} = \frac{g}{L'} \sin \varphi + \frac{1}{L'} \cos \varphi \left[ h \text{sign}(b_s \Psi_s + b_\varphi \Psi_\varphi) \right], \end{cases} \quad (25)$$

где

$$\Psi_s(s, \dot{s}) = \left[ \alpha_{s1} s + \alpha_{s2} \frac{|\dot{s}| \dot{s}}{|\dot{s}| + \alpha_{s3}} \right];$$

$$\Psi_\varphi(\varphi, \dot{\varphi}) = \left[ \alpha_{\varphi1} \varphi + \alpha_{\varphi2} \frac{|\dot{\varphi}| \dot{\varphi}}{|\dot{\varphi}| + \alpha_{\varphi3}} \right],$$

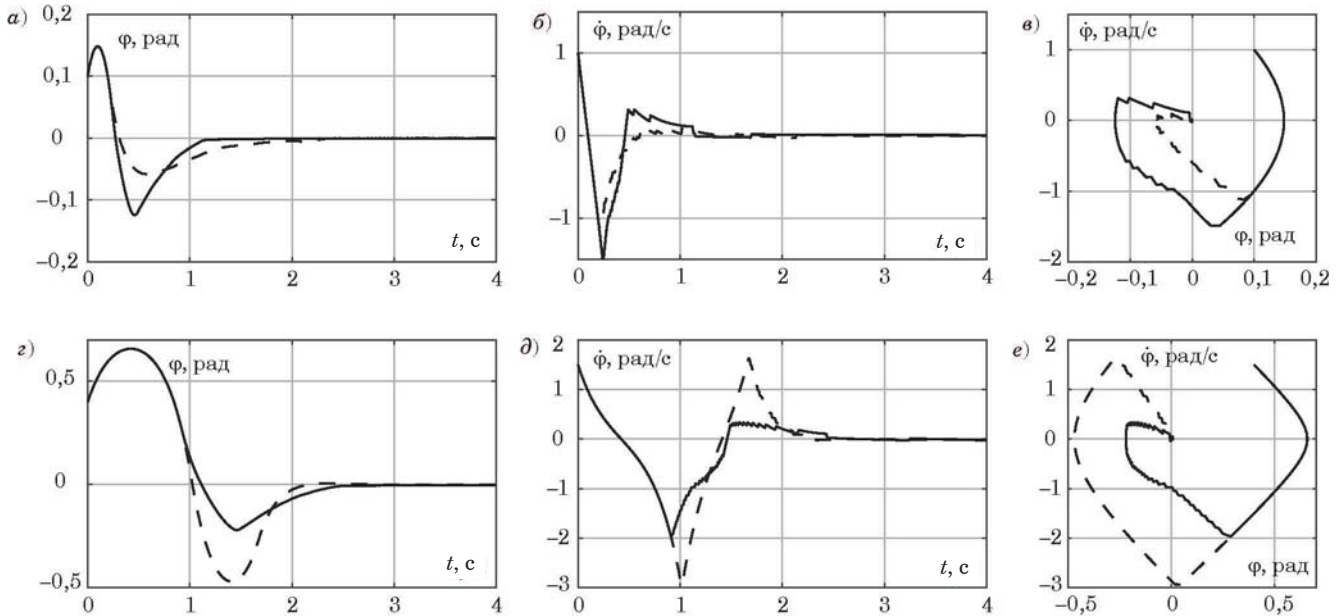
$\alpha_{s1}, \alpha_{s2}, \alpha_{s3}, \alpha_{\varphi1}, \alpha_{\varphi2}, \alpha_{\varphi3}$  — параметры управления.

Численное моделирование проведем с использованием параметров [23]  $h = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ,  $L' = 0,842 \text{ м}$ ,  $m_p = 0,1 \text{ кг}$ ,  $M = 1 \text{ кг}$ ,  $I = 0,013 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,

$k_s = 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Процесс стабилизации маятника будем считать завершенным при достижении области  $|\varphi| \leq 0,01 \text{ рад}$ ,  $|\dot{\varphi}| \leq 0,01 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ .

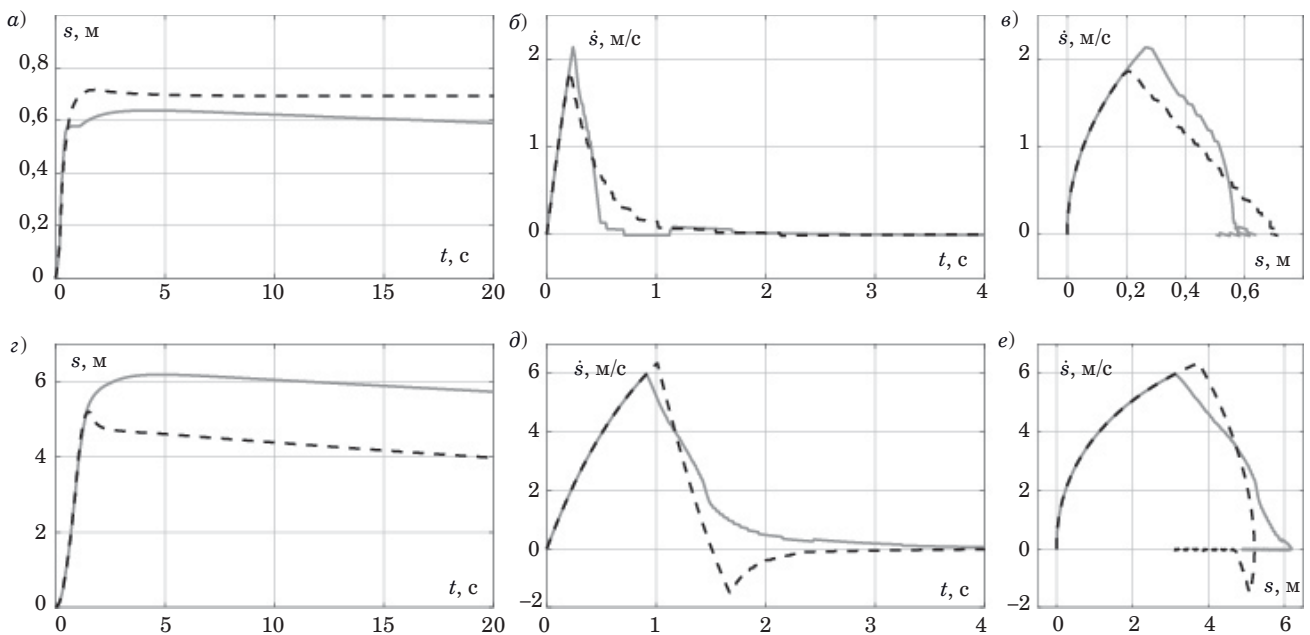
Проведено моделирование при начальных условиях  $s_0 = 0 \text{ м}$ ,  $\dot{s}_0 = 0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и различных ва-

риантах отклонения маятника: 1)  $\varphi_0 = 0,1 \text{ рад}$ ,  $\dot{\varphi}_0 = 1 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ; 2)  $\varphi_0 = 0,4 \text{ рад}$ ,  $\dot{\varphi}_0 = 1,5 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ; с параметрами управления (25)  $\alpha_{s1} = 0,09$ ,  $\alpha_{s2} = 46$ ,  $\alpha_{s3} = 0,2$ ,  $\alpha_{\varphi1} = 140,7$ ,  $\alpha_{\varphi2} = 92,7$ ,  $\alpha_{\varphi3} = 0,5$ . Для анализа эффективности разработанного нели-



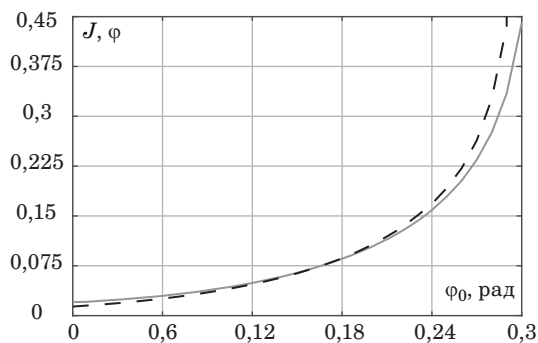
■ **Рис. 1.** Переходные процессы маятника: *a, б* – режим 1; *з, д* – режим 2 и фазовая траектория управляемой системы; *e* – режим 1; *e* – режим 2: сплошная линия – закон (25), пунктирная – закон (26)

■ **Fig. 1.** Transient processes of the pendulum: *a, б* – mode 1; *з, д* – mode 2 and the phase trajectory of the controlled system; *e* – mode 1; *e* – mode 2: solid line – law (25), dotted line – law (26)



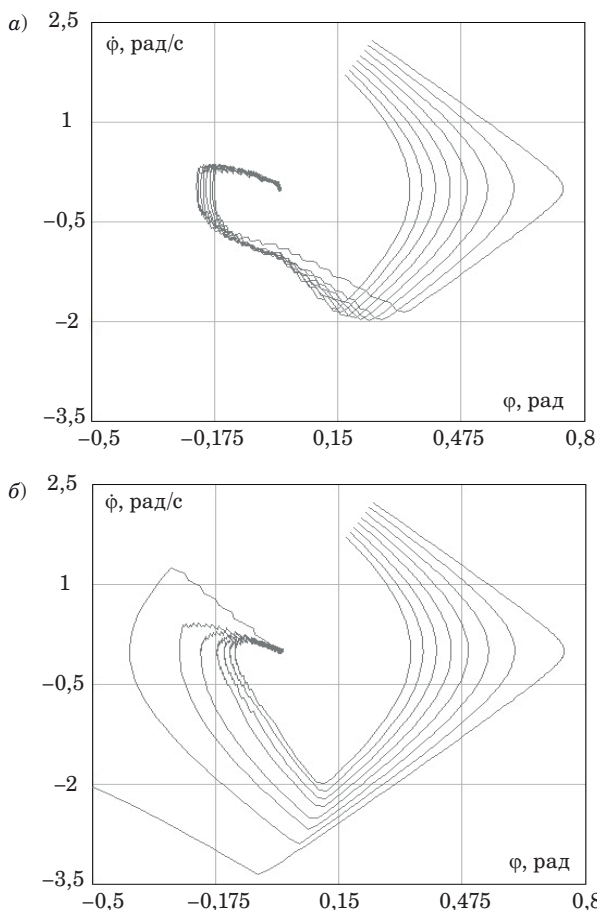
■ **Рис. 2.** Переходные процессы тележки: *a, б* – режим 1; *з, д* – режим 2 и фазовая траектория управляемой системы; *e* – режим 1; *e* – режим 2: сплошная линия – закон (25), пунктирная – закон (26)

■ **Fig. 2.** Transient processes of the trolley: *a, б* – mode 1; *з, д* – mode 2 and the phase trajectory of the controlled system; *e* – mode 1; *e* – mode 2: solid line – law (25), dotted line – law (26)



■ **Рис. 3.** Зависимость качества переходного процесса по квадратичному показателю от начального отклонения маятника при  $\dot{\varphi}_0 = 2$  рад/с: сплошная линия – закон (25), пунктирная – закон (26)

■ **Fig. 3.** Quality dependence of transient process by quadratic criterion on the initial deviation of the pendulum at  $\dot{\varphi}_0 = 2$  rad/s: solid line – law (25), dotted line – law (26)



■ **Рис. 4.** Фазовый портрет: а – закон (25); б – закон (26)

■ **Fig. 4.** Phase portrait: а – law (25); б – law (26)

нейного закона управления проведем сравнение результатов моделирования с управлением, полученным на основе принципа декомпозиции [12] в соответствии с (18):

$$u_{\text{pyat}} = -h \text{sign} \left( b_s [\lambda_{s1}s + \lambda_{s2}\dot{s}] + b_\varphi [\lambda_{\varphi1}\varphi + \lambda_{\varphi2}\dot{\varphi}] \right), \quad (26)$$

где  $\lambda_{s1} = 0,23$ ,  $\lambda_{s2} = 14$ ,  $\lambda_{\varphi1} = 100$ ,  $\lambda_{\varphi2} = 27$ .

Установлено, что в режиме 1) управление (26) обеспечивает лучшее качество переходного процесса в сравнении с (25) по квадратичному показателю (22). При увеличении начального отклонения угла маятника квадратичный показатель качества для управления (25) становится лучше, чем (26). В режиме 2) происходит потеря устойчивости системы под управлением (26), а разработанное управление (25) обеспечивает нормальное функционирование. Результаты численного моделирования представлены на рис. 1–3.

Проведено моделирование в диапазоне  $\varphi_0 = [0,17; 0,24]$  рад,  $\dot{\varphi}_0 = [1,7; 2,225]$  рад·с<sup>-1</sup> с интервалами  $\Delta\varphi_0 = 0,01$  рад,  $\Delta\dot{\varphi}_0 = 0,075$  рад·с<sup>-1</sup>. По результатам моделирования построены фазовые портреты (рис. 4).

Применение предлагаемого метода позволяет увеличить область устойчивости на 10 % и повысить качество функционирования нелинейной динамической системы с дефицитом управляющих воздействий по квадратичному критерию в режиме больших отклонений в среднем на 20–25 % в сравнении с законом, полученным на основе прямого применения принципа декомпозиции.

## Заключение

Разработанный метод синтеза квазиоптимальных систем с дефицитом управления на базе редукции задачи Лагранжа позволяет построить решение, обеспечивающее увеличение области устойчивости и качество переходного процесса по квадратичному показателю в сравнении с известными алгоритмами принципа декомпозиции для системы с дефицитом управляющих воздействий в неустойчивом состоянии.

## Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00812, <https://rscf.ru/project/23-29-00812/>.



## Литература

1. Семенов М. Е., Канищева О. И., Попов М. А. Стабилизация системы связанных обратных маятников вертикальным управлением. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, 2020, № 1, с. 51–63. doi:10.17308/sait.2020.1/2587
2. Trumić M., Santina C. D., Jovanović K., Fagiolini A. On the stability of the soft pendulum with affine curvature: open-loop, collocated closed-loop, and switching control. *IEEE Control Systems Letters*, 2023, vol. 7, pp. 385–390. doi:10.1109/LCSYS.2022.3187612
3. Zhu G., Lv L., Sun L., Zhang X. Distributed dynamic surface control for a class of quadrotor UAVs with input saturation and external disturbance. *Drones*, 2024, vol. 8, iss. 3, no. 77. doi:10.3390/drones8030077. <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/3/77> (дата обращения: 22.03.2024).
4. Chodnicki M., Stecz W., Giernacki W., Stępień S. Coupled PID-SDRE controller of a quadrotor: Positioning and stabilization of UAV Flight. *Proc. of the 19th Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics – ICINCO*, Lisbon, Portugal, 14–16 July 2022. SciTePress, 2022, pp. 524–530. doi:10.5220/0011335600003271
5. Иванов М. Е., Езерский В. В. Применение нечеткого регулятора для устранения флуктуаций переходного процесса возмущенной системы автоматического управления углом тангажа летательного аппарата. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 3, с. 51–58. doi:10.31799/1684-8853-2023-3-51-58, EDN: DACXFO
6. Матюхин В. И. Многорежимные законы управления движением твердого тела. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*, 2012, № 4, с. 21–31.
7. Aminurrashid N., Ariffanan B., Zaharuddin M., Izzuddin M. L. Adaptive PID controller using sliding mode control approaches for Quadrotor UAV attitude and position stabilization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, vol. 46, pp. 963–981. doi:10.1007/s13369-020-04742-w
8. Waszak M., Langowski R. An automatic self-tuning control system design for an inverted pendulum. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 26726–26738. doi:10.1109/ACCESS.2020.2971788
9. El-Sousy F. F. M., Alattas K. A., Mofid O., Mubayen S., Fekih A. Robust adaptive super-twisting sliding mode stability control of underactuated rotational inverted pendulum with experimental validation. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 100857–100866. doi:10.1109/ACCESS.2022.3208412
10. Le H. D., Nestorović T. A Novel hierarchical recursive nonsingular terminal sliding mode control for inverted pendulum. *Actuators*, 2023, vol. 12, pp. 462. doi:10.3390/act12120462
11. Waheed F., Yousufzai I. K., Valášek M. A TV-MPC methodology for uncertain under-actuated systems: A rotary inverted pendulum case study. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 103636–103649. doi:10.1109/ACCESS.2023.3318108
12. Пятницкий Е. С. Принцип декомпозиции в управлении механическими системами. *Доклады Академии наук СССР*, 1988, т. 300, № 2, с. 300–303.
13. Пятницкий Е. С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. I. *Автоматика и телемеханика*, 1989, т. 50, № 1, с. 87–99.
14. Пятницкий Е. С. Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями. *Автоматика и телемеханика*, 1996, т. 57, № 12, с. 29–37.
15. Костоглотов А. А. Объединенный принцип Понтрягина – Гамильтона – Остроградского. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*, 2007, № 6(142), с. 13–17.
16. Костоглотов А. А., Лазаренко С. В. Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*, 2021, т. 6, № 6, с. 3–12. doi:10.31857/S0002338821060111
17. Зехцер В. О., Костоглотов А. А. Синтез квазиоптимальных законов управления на основе принципа декомпозиции и редукции задачи Лагранжа к изопериметрической в условиях неопределенности. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*, 2023, № 3(219), с. 13–22. doi:10.18522/1026-2237-2023-3-13-22
18. Kostoglotov A. A., Lazarenko S. V., Pugachev I. V. Method of synthesis of multi-mode control under the expected uncertainty using the analysis of the phase-space decomposition on the basis of the generalized power maximum condition. *AIP Conf. Proc.: Proc. of XV Intern. Scientific-Technical Conf. "Dynamics of technical systems" (DTS-2019)*, Rostov-on-Don, 11–13 September 2019. Rostov-on-Don, AIP Publ., 2019, vol. 2188, pp. 030005. doi:10.1063/1.5138398
19. Черноусько Ф. Л., Ананьевский И. М., Решин С. А. *Методы управления нелинейными механическими системами*. М., Физматлит, 2006. 328 с.
20. Пятницкий Е. С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. II. *Автоматика и телемеханика*, 1989, т. 50, № 2, с. 57–71.
21. Антипов А. С., Краснова С. А. Блочный синтез системы слежения для двухроторной электромеханической системы при ограничениях на переменные состояния. *Прикладная математика и меха-*

ника, 2021, т. 85, № 1, с. 3–20. doi:10.31857/S0032823521010021, EDN: NPCELR

22. Колесников А. А. Метод синергетического синтеза системы управления колебаниями «переверну-

того маятника на подвижной тележке». *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2011, № 6(119), с. 110–117.

23. Kwakernaak H., Sivan R. *Linear Optimal Control Systems*. New York, Wiley Interscience, 1972. 575 p.

UDC 517.977.1, 62-50

doi:10.31799/1684-8853-2024-4-40-49

EDN: RJAFOE

### Synthesis method of quasi-optimal underactuated systems based on the reduction of Lagrange problem

A. A. Kostoglotov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-4006-2436, kostoglotov@me.com

V. O. Zekhtser<sup>a</sup>, Junior Researcher, orcid.org/0000-0001-7307-8325

<sup>a</sup>Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia Sq., 344079, Rostov-on-Don, Russian Federation

**Introduction:** The relevance of improving methods for synthesizing underactuated systems is justified by the fact that those are widely used in unmanned aerial vehicles, robotic manipulators and other devices that have operating modes, when the system becomes limited in controllability. It is known that linear control laws are not efficient enough in this case, which determines the need for a synthesis procedure in the original nonlinear formulation. **Purpose:** To develop a synthesis method that provides an increase in efficiency of control processes and expansion of stability range of nonlinear dynamic system in comparison with the traditional method of decomposition principle. **Methods:** The decomposition principle, combined with the reduction of Lagrange optimization problem to an isoperimetric one, makes it possible to carry out a synthesis procedure using fictitious controls and taking into account the correction of the switching surface. **Results:** We determine the structure of a quasi-optimal control system based on the decomposition principle and reduction of Lagrange problem. The choice of switching surface parameters makes it possible to achieve a minimum quadratic quality criterion. To analyze the effectiveness of proposed method, we carry out a control synthesis of a nonlinear underactuated system in unstable equilibrium position. Using numerical modeling we have found that the obtained solution makes it possible to increase the stability area by 10% and improve the quality of functioning according to the quadratic criterion in the mode of large deviations by an average of 20–25% in comparison with the law obtained on the basis of the direct application of the decomposition principle. **Practical relevance:** Due to the originality of the proposed synthesis procedure, the functioning efficiency of underactuated system has been increased, which is of practical interest for solving problems of designing controllers.

**Keywords** – quasi-optimal control law, underactuated dynamic system, multidimensional non-stationary nonlinear dynamic system, switching surface, inverted pendulum mounted on a trolley.

**For citation:** Kostoglotov A. A., Zekhtser V. O. Synthesis method of quasi-optimal underactuated systems based on the reduction of Lagrange problem. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 4, pp. 40–49 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-4-40-49, EDN: RJAFOE

#### Financial support

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00812, <https://rscf.ru/project/23-29-00812/>.

#### References

1. Semenov M. E., Kanishcheva O. I., Popov M. A. Stabilization of a coupled inverted pendulums system via vertical forces. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*, 2020, no. 1, pp. 51–63 (In Russian). doi:10.17308/sait.2020.1/2587
2. Trumić M., Santina C. D., Jovanović K., Fagiolini A. On the stability of the soft pendulum with affine curvature: open-loop, collocated closed-loop, and switching control. *IEEE Control Systems Letters*, 2023, vol. 7, pp. 385–390. doi:10.1109/LCSYS.2022.3187612
3. Zhu G., Lv L., Sun L., Zhang X. Distributed dynamic surface control for a class of quadrotor UAVs with input saturation and external disturbance. *Drones*, 2024, vol. 8, iss. 3, no. 77. doi:10.3390/drones8030077. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/3/77> (accessed 22 March 2024).
4. Chodnicki M., Stecz W., Giernacki W., Stępień S. Coupled PID-SDRE controller of a quadrotor: Positioning and stabilization of UAV Flight. *Proc. of the 19th Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics – ICINCO*, Lisbon, Portugal, 14–16 July 2022. SciTePress, 2022, pp. 524–530. doi:10.5220/0011335600003271
5. Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. The use of the intelligent fuzzy controller for the elimination of fluctuations in the transient process of the perturbed automatic pitch angle control system of an aircraft. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 3, pp. 51–58 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-3-51-58, EDN: DAXFO
6. Matyukhin V. I. Multimode laws of control of rigid body motions. *Mechanics of Solids*, 2012, vol. 47, no. 4, pp. 390–399. doi:10.3103/S0025654412040048
7. Aminurrashid N., Ariffanan B., Zaharuddin M., Izzuddin M. L. Adaptive PID controller using sliding mode control approaches for quadrotor UAV attitude and position stabilization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, vol. 46, pp. 963–981. doi:10.1007/s13369-020-04742-w
8. Waszak M., Langowski R. An automatic self-tuning control system design for an inverted pendulum. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 26726–26738. doi:10.1109/ACCESS.2020.2971788
9. El-Sousy F. F. M., Alattas K. A., Mofid O., Mobayen S., Fekih A. Robust adaptive super-twisting sliding mode stability control of underactuated rotational inverted pendulum with experimental validation. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 100857–100866. doi:10.1109/ACCESS.2022.3208412
10. Le H. D., Nestorović T. A Novel hierarchical recursive nonsingular terminal sliding mode control for inverted pendulum. *Actuators*, 2023, vol. 12, pp. 462. doi:10.3390/act12120462
11. Waheed F., Yousufzai I. K., Valášek M. A TV-MPC methodology for uncertain under-actuated systems: A rotary inverted pendulum case study. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 103636–103649. doi:10.1109/ACCESS.2023.3318108
12. Pyatnitskii E. S. Decomposition principle in mechanical control systems. *Soviet Mathematics. Doklady*, 1988, vol. 33, no. 5, pp. 345–346.

13. Pyatnitskii E. S. Synthesis of hierarchical control systems for mechanical and electromechanical objects based on the principle of decomposition. I. *Automation and Remote Control*, 1989, vol. 50, no. 1, pp. 64–73.
14. Pyatnitskii E. S. Controllability of classes of Lagrange systems with bounded controls. *Automation and Remote Control*, 1996, vol. 57, no. 12, pp. 1713–1719.
15. Kostoglotov A. A. The combined Pontryagin – Hamilton – Ostrogradsky principle. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences*, 2007, no. 6(142), pp. 13–17 (In Russian).
16. Kostoglotov A. A., Lazarenko S. V. Method of quasi-optimal synthesis of control laws based on the reduction of the Lagrange problem to the isoperimetric problem using asynchronous variation. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2021, vol. 60, no. 6, pp. 843–852. doi:10.1134/S1064230721060113
17. Zekhtser V. O., Kostoglotov A. A. Synthesis of quasi-optimal control laws based on the principle of decomposition and reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric one under uncertainty. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences*, 2023, no. 3(219), pp. 13–22 (In Russian). doi:10.18522/1026-2237-2023-3-13-22
18. Kostoglotov A. A., Lazarenko S. V., Pugachev I. V. Method of synthesis of multi-mode control under the expected uncertainty using the analysis of the phase-space decomposition on the basis of the generalized power maximum condition. *AIP Conf. Proc.: Proc. of XV Intern. Scientific-Technical Conference “Dynamics of technical systems” (DTS-2019)*. Rostov-on-Don, 2019, vol. 2188, pp. 030005. doi:10.1063/1.5138398
19. Chernousko F. L., Ananievski I. M., Reshmin S. A. *Metody upravleniya nelinejnymi mekhanicheskimi sistemami* [Methods of control of nonlinear mechanical systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 328 p. (In Russian).
20. Pyatnitskii E. S. Synthesis of hierarchical control systems for mechanical and electromechanical objects based on the principle of decomposition. II. *Automation and Remote Control*, 1989, vol. 50, no. 2, pp. 175–186.
21. Antipov A. S., Krasnova S. A. The block design of tracking system for twin-rotor electromechanical system with restrictions on state variables. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 2021, vol. 85, no. 1, pp. 3–20 (In Russian). doi:10.31857/S0032823521010021, EDN: NPCELR
22. Kolesnikov A. A. Method of synergetics synthesis of inverted pendulum on mobile cart oscillation control system. *Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*, 2011, no. 6(119), pp. 110–117 (In Russian).
23. Kwakernaak H., Sivan R. *Linear Optimal Control Systems*. New York, Wiley Interscience, 1972. 575 p.

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью – рецензию.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*

**АЛЕКСЕЕВ**  
**Ярослав**  
**Алексеевич**



Младший инженер компании «Коулмэн Тех», Москва. В 2019 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого по специальности «Управление в технических системах». Является автором одной научной публикации. Область научных интересов — статический и динамический анализ программ, верификация программ. Эл. адрес: alexeevy509@gmail.com

**БОЙКОВ**  
**Владимир**  
**Иванович**



Доцент кафедры управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1976 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики по специальности «Автоматика и телемеханика». В 1982 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 95 научных публикаций и 24 патентов на изобретения. Область научных интересов — теория систем управления, методы проектирования и реализации цифровых регуляторов, оптико-механические системы. Эл. адрес: viboikov@mail.ru

**БУШУЕВ**  
**Александр**  
**Борисович**



Доцент, старший преподаватель факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, Санкт-Петербург, патентный эксперт, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1974 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики по специальности «Автоматика и телемеханика». В 1980 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 193 научных публикаций и 39 патентов на изобретения. Область научных интересов — теория автоматического управления, проектирование систем, теория решения изобретательских задач, математический аппарат технического творчества. Эл. адрес: bushuev@inbox.ru

**БЫСТРОВ**  
**Сергей**  
**Владимирович**



Доцент факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, Санкт-Петербург. В 1980 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики по специальности «Инженер». В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 95 научных публикаций. Область научных интересов — элементы и устройства систем управления, прецизионные системы позиционирования. Эл. адрес: sbystrov@mail.ru

**ВЕЛИЧКО**  
**Алёна**  
**Николаевна**



Старший научный сотрудник лаборатории речевых и мультимедийных интерфейсов Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН. В 2018 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем». В 2023 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 16 научных публикаций и пяти свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Область научных интересов — компьютерная паралингвистика, анализ разговорной речи, анализ деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи, машинное обучение. Эл. адрес: velichko.a@iias.spb.su

**ЗЕХЦЕР**  
**Владимир**  
**Олегович**



Младший научный сотрудник НИЧ кафедры связи на железнодорожном транспорте Ростовского государственного университета путей сообщения. В 2020 году окончил магистратуру Донского государственного технического университета по специальности «Информатика и вычислительная техника». Является автором 27 научных публикаций и трех патентов на изобретения. Область научных интересов — теория оптимального управления, системный анализ, интеллектуальные транспортные системы, теория оценки и идентификации, искусственные нейронные сети, нечеткая логика. Эл. адрес: vova-zehcer@yandex.ru

**ИЦЫКСОН  
Владимир  
Михайлович**



Профессор института прикладных компьютерных наук Университета ИТМО, Санкт-Петербург.

В 1996 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Информатика и вычислительная техника».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов – верификация программного обеспечения, статический и динамический анализ программ, формальные методы.

Эл. адрес: itsykson@yandex.ru

**КАРПОВ  
Алексей  
Анатольевич**



Главный научный сотрудник, руководитель лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН.

В 2002 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 400 научных публикаций, включая четыре монографии и пять патентов. Область научных интересов – многомодальные интерфейсы и системы, речевые технологии, автоматическое распознавание и синтез речи, компьютерная паралингвистика.

Эл. адрес: karpov@iias.spb.ru

**КЕЧИН  
Валерий  
Владимирович**



Магистрант, научный сотрудник лаборатории верификации и анализа программного обеспечения Университета ИТМО, Санкт-Петербург.

В 2023 году окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого по направлению «Информатика и вычислительная техника».

Область научных интересов – статический и динамический анализ программ, верификация программного обеспечения.

Эл. адрес: v.kechin@yandex.ru

**ЛИТВИНОВ  
Юрий  
Володарович**



Доцент кафедры управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1976 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики по специальности «Инженер-электрик».

В 1985 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 60 научных публикаций и 16 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Область научных интересов – управление подвижными объектами.

Эл. адрес: yurl@13yandex.ru

**КОСТОГЛОТОВ  
Андрей  
Александрович**



Профессор, заведующий кафедрой связи на железнодорожном транспорте Ростовского государственного университета путей сообщения.

В 1988 году окончил Ростовский военный институт ракетных войск им. Главного маршала артиллерии М. И. Неделина по специальности «Радиотехнические средства».

В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 322 научных публикаций и 23 патентов на изобретения.

Область научных интересов – теория оптимального управления, системный анализ, интеллектуальные транспортные системы, теория оценки и идентификации.

Эл. адрес: kostoglov@me.com

**НУЙЯ  
Ольга  
Святославовна**



Доцент Института киберфизических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2003 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Инженер».

В 2006 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 22 научных публикаций.

Область научных интересов – дистанционное управление в канальной среде в технических системах.

Эл. адрес: olga.nuyya@gmail.com

**ОНИЩУК**  
**Михаил**  
**Петрович**



Аспирант Института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

В 2018 году окончил бакалавриат Старооскольского технологического института им. А. А. Угарова (филиал МИСИС) по специальности «Прикладная информатика», в 2020 году – магистратуру Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого по направлению «Информатика и вычислительная техника».

Является автором двух научных публикаций.

Область научных интересов – статический и динамический анализ программ, верификация программ.

Эл. адрес: onischuck.misha@yandex.ru

**РУДАКОВ**  
**Роман**  
**Вадимович**



Аспирант кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2021 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Мехатроника и робототехника».

Является автором пяти научных публикаций.

Область научных интересов – мехатроника, робототехника, управляемые адаптивные системы, адаптивность робототехнических систем.

Эл. адрес: rorud007@mail.ru

**СЕРЖАНТОВА**  
**Майя**  
**Вячеславовна**



Доцент Института киберфизических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2007 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Инженер».

В 2012 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Область научных интересов – адаптивное управление, роботы-манипуляторы, человек-оператор в технической системе.

Эл. адрес: хуз43210@mail.ru

## Уважаемые авторы!

**При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.**

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Текст рукописи должен быть оригинальным, а цитирование и самоцитирование корректно оформлено.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии – должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, ORCID и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисуночные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени.

Простые **формулы** набирайте в Word, сложные с помощью редактора Mathtype или Equation. Для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта в Mathtype никогда не пользуйтесь вкладкой Other, Smaller, Larger, используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; пробелы в формуле ставьте только после запятой при перечислении с помощью Ctrl+Shift+Space (пробел); не отделяйте пробелами знаки: + = - ×, а также пространство внутри скобок; для выделения греческих символов в Mathtype полужирным начертанием используйте Style → Other → bold.

Для набора формул в Word никогда не используйте вкладки: «Уравнение», «Конструктор», «Формула» (на верхней панели: «Вставка» – «Уравнение»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими – светлым прямым, векторы и матрицы – прямым полужирным шрифтом.

Подробнее см. <http://i-us.ru/index.php/ius/author-guide>

### **Иллюстрации:**

– рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio (\*.vsd, \*.vsdx); Adobe Illustrator (\*.ai); Coreldraw (\*.cdr, версия не выше 15); Excel (\*.xls); Word (\*.docx); AutoCad, Matlab (экспорт в PDF, EPS, SVG, WMF, EMF); Компас (экспорт в PDF); веб-портал DRAW.IO (экспорт в PDF); Inkscape (экспорт в PDF);

– фото и растровые – в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисуночных подписей и названий таблиц на русском и английском языках обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

### **В редакцию предоставляются:**

– сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png, \*.jpg с максимальным разрешением – не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

– экспертное заключение;

– экспортное заключение.

### **Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

– для книг и сборников – фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц, doi;

– для журнальных статей – фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц, doi;

– ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

– при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов» – <http://i-us.ru/index.php/ius/author-guide>.

### **Контакты**

Куда: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)