

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, НГТУ, г. Новосибирск

Заместитель главного редактора

В.И. Денисов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, НГТУ, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

А.А. Воевода, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Редакционная коллегия:

Ю.Е. Воскобойников, д-р физ.-мат. наук, проф., СибСТРИН, г. Новосибирск

Ю.Д. Григорьев, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ (ЛЭТИ), г. С.-Петербург

А.М. Малышенко, д-р техн. наук, проф., ТПУ, г. Томск

Ю.Ф. Мухомад, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, ИрГУПС, г. Иркутск

А.И. Рубан, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ,
СФУ, Ин-т косм. и информ. технологий, г. Красноярск

В.И. Хабаров, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Журнал зарегистрирован

**в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций в 2002 г.
(свидетельство ПИ № 77-11739 от 08 февраля 2002 г.)**

Адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: ucit@ucit.ru

Web site: <http://journals.nstu.ru/sbornik/>

Editorial adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

**СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ISSN 2307-6879

№ 3–4 (93)

2018

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Быков В.М. Разработка и анализ ШИМ-контроллера импульсного понижающего DC-DC преобразователя	7
Гринкевич В.А. Синтез регулятора тока для элемента Пельтье	16

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Левчук С.А., Якименко А.А. Исследование характеристик алгоритмов распознавания лиц	40
Лещенко А.В. Практическое применение алгоритмов нечеткого поиска ..	59
Макфузова А.И., Якименко А.А. Анализ метода сегментации изображения для картин волнового поля	70
Миков Е.П., Бондарь В.А., Алимов А.А. Алгоритм для сборки кубика Рубика 2×2 на C#	83
Миловская Ю.В. Обработка сканированного текста	91

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Воронов В.С. Помехоустойчивый вариант алгоритма гравитационного поиска глобального минимума	101
Филиппов Б.И., Щедрина А.С. Выбор ключей шифрования для гидроакустического канала связи	116

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Кузнецов В.А., Федоров А.А., Наберухин М.А., Бердинский А.С.,
Полтарак П.А., Федоров В.Е.** Халькогениды переходных метал-
лов в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров 136

СООБЩЕНИЯ

Кононов Ю.М. Совершенствование алгоритмов управления производ-
ственным процессом на основе подходов системного анализа 147

Правила для авторов 164

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *Л.Н. Кинит*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Лицензия № ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 10.04.2019
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 9,53
Печ. л. 10,25. Изд. № 57. Заказ № 722. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Editorial board

Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

Vostretsov A.G., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, RF

Deputy Chief Editor

Denisov V.I., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A.A., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Voskoboinikov Yu.E., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State University of Architecture
and Civil Engineering, Novosibirsk, RF

Grigor'ev Iu.D., D. Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Saint-Petersburg, RF

Malysenko A.M., D. Sc. (Eng.), National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, RF

Mukhopad Iu.F., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State University of Railway Engineering,
Irkutsk, RF

Ruban A.I., D. Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF

Khabarov V.I., D. Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF

*The journal is registered
in the RF Ministry for press, broadcasting
and masscommunications in 2002
(certificate PI № 77-11739 from February 08, 2002)*

Editorial adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation.

E-mail: ucit@ucit.ru

Web Site: <http://journals.nstu.ru/sbornik/>

© Authors, 2019

© Novosibirsk State

Technical University, 2019

CONTENTS

AUTOMATIC CONTROL AND IDENTIFICATION

Bykov V.M. Design and analysis of PWM-controller of pulse buck DC-DC converter.....	7
Grinkevich V.A. Current controller design for Peltier element.....	16

MODERN INFORMATIONAL TECHNOLOGIES

Levchuk S.A., Yakimenko A.A. Study of the characteristics of the algorithms for facial recognition	40
Leshchenko A.V. Overview and practical implementation of fuzzy search algorithms	59
Makfuzova A.I., Yakimenko A.A. Analysis of the image segmentation method for wave field patterns	70
Mikov E.P., Bondar V.A., Alimov A.A. Algorithm for building a Rubik's Cube 2×2 on C#.....	83
Milovskaya Y.V. Processing scanned text.....	91

INFORMATION PROCESSING

Voronov V.S. Noise resistant a gravity search algorithm	101
Filippov B.I., Shchedrina A.S. The selection of encryption keys for hydro-acoustic communication channel	116

MATERIAL SCIENCE

Kuznetsov V.A., Fedorov A.A., Naberukhin M.A., Berdinsky A.S., Poltarak P.A., Fedorov V.E. Transition metal chalcogenides as sensitive elements for gas sensors	136
--	-----

SHORT PAPERS

Kononov Y.M. Improvement of algorithms for production process management based on the approaches of system analysis.....	147
Rules for authors.....	164

Editor *L.N. Kinsht*
Publishing Editor *I.P. Brovanova*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

License № ID 04303 from 20.03.01. Signed in print 10.04.2019. Format 60 × 84/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 9,53. printed pages 10,25.
Publishing number 57. Order number 722.

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
630073, Novosibirsk, 20 K. Marx prospekt

*АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

УДК 621.3.049

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-7-15

**РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ШИМ-КОНТРОЛЛЕРА
ИМПУЛЬСНОГО ПониЖАЮЩЕГО
DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ***

В.М. БЫКОВ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: wlad000-wlad@yandex.ru

Разрабатываемый ШИМ-контроллер является частью интегральной схемы импульсного DC-DC преобразователя со встроенным силовым ключом. Для импульсных преобразователей напряжения характерны состояния, когда система выходит из импульсного режима работы. В эти моменты силовой ключ либо постоянно открыт, либо постоянно закрыт. Это может происходить при бросках тока нагрузки и в начальный момент времени при включении питания преобразователя. В этой ситуации силовой ключ пропускает постоянный ток, который может достигать критических значений и вывести встроенный силовой ключ из строя. А так как параметры встроенного силового ключа ограничены технологией производства других компонентов, то он будет более предрасположен к перегреву в режиме постоянного тока, чем дискретные приборы. Для решения данной проблемы был спроектирован цифровой блок для ШИМ-контроллера, который ограничивает максимальную длительность импульса, управляющего силовым ключом. С данным цифровым блоком преобразователь работает в импульсном режиме при включении питания преобразователя и бросках тока на нагрузке, также имеется возможность устанавливать максимально возможное напряжение на нагрузке, обеспечивая последней защиту от перенапряжения.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, преобразователь, моделирование, управление

ВВЕДЕНИЕ

Разработке и исследованию импульсного DC-DC преобразователя посвящены работы [1–3]. В данных работах не учтена ситуация, когда силовой ключ работает не в импульсном режиме, а постоянно открыт, т. е. ток, протекающий через ключ в начальный момент времени или в момент броска тока

* Статья получена 16 июля 2018 г.

нагрузки [5], может превышать допустимое значение для ключа. Это может приводить к перегреву ключа и выходу его из строя при работе на низкоомную нагрузку. В данной статье рассматривается ШИМ контроллер с блоком формирования импульсов управления силовым ключом. Данный блок устанавливает максимальную длительность управляющего импульса, что позволяет достичь импульсного режима работы силового ключа при включении преобразователя на нагрузку и при скачкообразном изменении тока нагрузки. Это позволяет избежать протекания больших постоянных токов через ключ, способных вывести его из строя, а также установить максимальное постоянное значение напряжения выхода преобразователя, что позволит предохранить нагрузку от перенапряжения.

1. СХЕМА ШИМ-КОНТРОЛЛЕРА

На рис. 1 приведена разработанная принципиальная электрическая схема ШИМ-контроллера. На рисунке не показаны источник опорного напряжения и драйвер.

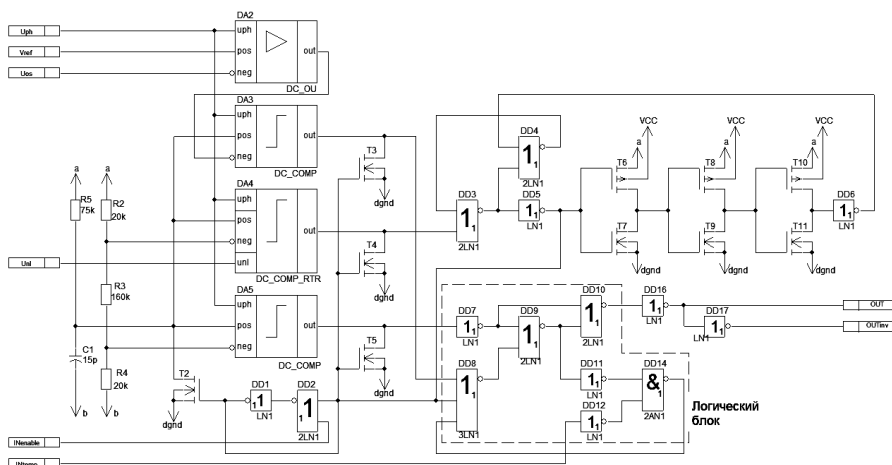


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема ШИМ-контроллера

Входы схемы V_{ref} и U_{os} – это входы опорного напряжения и напряжения сигнала ошибки. Сигнал ошибки получается делением выходного напряжения понижающего DC-DC преобразователя на определенный коэффициент. Данные сигналы поступают на вход операционного усилителя (ОУ) DA2, который включен в режиме дифференциального усилителя. Сигнал с выхода ОУ по-

ступает на один вход компаратора, а на другой поступает пилообразное напряжение. В результате сравнения получаются прямоугольные импульсы с управляемым коэффициентом заполнения и с частотой повторения, равной частоте генератора пилообразного напряжения.

Входы U_{ph} , Unl – это входы для подачи напряжения смещения, необходимого для корректной работы операционного усилителя и компараторов. Входы $INenable$ и $INtemp$ – это входы логических сигналов разрешения работы и аварийного запрещения работы в результате перегрева интегральной схемы соответственно. Сигналы со входов OUT и $OUTinv$ служат входными сигналами для драйвера вертикального МОП транзистора. Вывод «а» подключен к источнику напряжения 15 В, а VCC – к источнику напряжения 36 В, «b» и «dgnnd» – аналоговая и цифровая «земля» соответственно.

Схема генератора пилообразного напряжения построена на компараторе DA4 и RS-триггере с задержкой на элементах 2И-НЕ DD3 и DD4, задержка формируется цепочкой инверторов. Выбор такой схемы генератора обусловлен простотой конструкции и относительной независимостью режима генерации от характеристик компаратора. Также возможно изменить частоту генерации путем лазерной подстройки резистора R5 без вмешательства в слои контактных окон и металла интегральной микросхемы. Благодаря RS-триггеру с задержкой разряд емкости C1 синхронизирован со сбросом выходов компараторов и ОУ всей ИС.

Для обеспечения импульсного режима работы DC-DC преобразователя при бросках тока нагрузки и при включении питания преобразователя нужен логический блок. Он выполняет функцию контроллера максимальной длительности выходного импульса ШИМ, тем самым защищая встроенный силовой ключ от протекания больших постоянных токов, а также в качестве предохранителя нагрузки от перенапряжения.

2. ЛОГИЧЕСКИЙ БЛОК КОНТРОЛЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА

Логический блок показан на рис. 1 и состоит из трех инверторов: DD7, DD11 и DD12; двух элементов: 2ИЛИ-НЕ DD9 и DD10; одного 2И-НЕ DD14 и 3ИЛИ-НЕ DD8.

Элементы DD8 и DD9 составляют RS-триггер, а элементы DD11, DD12 и DD14 с помощью сигнала $INtemp$ позволяют аварийно блокировать работу триггера при превышении критической температуры кристалла. Ниже представлена таблица истинности, поясняющая работу RS-триггера на элементах ИЛИ-НЕ.

Таблица истинности RS-триггера

DD9_IN1	DD8_IN1	DD8_IN2	DD10_IN2	DD8_IN3
0	0	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	0	0
1	1	0	0	0
1	1	1	0	0

Компаратор DA5 и резистивный делитель R3-R4 формируют широкий импульс заданной длительности, которую можно контролировать лазерной подстройкой резистора R4.

В неимпульсном режиме работы преобразователя (например, когда к преобразователю подключается нагрузка) компаратор DA3 формирует постоянный сигнал, который может удерживать силовой ключ открытым, пока напряжение на нагрузке не достигло бы определенного значения, а при разорванной цепи обратной связи выходное напряжение может достигнуть значения напряжения питания. Но благодаря наличию логического блока на выходе формируются импульсы заданной длительности, что можно увидеть на рис. 2. Даже при условии разорванной цепи обратной связи напряжение на нагрузке не достигло бы напряжения питания, что важно для типов нагрузки, чувствительных к превышению питающих напряжений. Таким образом, логический блок контроля максимальной длительности импульса выступает в роли предохранителя нагрузки от перенапряжения и как защита ключевого транзистора от протекания постоянного тока.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ШИМ-КОНТРОЛЛЕРА

Логический блок предназначен для формирования импульсов максимальной длительности. Результаты моделирования работы DC-DC преобразователя показаны на рис. 2. Моделирование разработанной схемы проведено в САПР OrCAD Family Release 9.2.

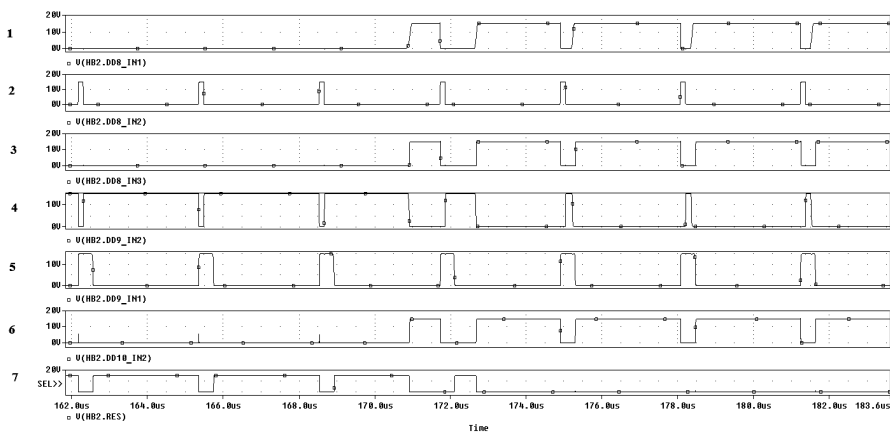


Рис. 2. Моделирование работы логического блока

Осциллограммы на рис. 2 показывают: 1 – сигнал с выхода компаратора DA3; 2 – синхронизирующий сигнал; 3 – сигнал с выхода элемента 2И-НЕ DD14; 4 – сигнал с выхода элемента 3ИЛИ-НЕ DD8; 5 – инвертированный выход компаратора DA5, формирующего широкие импульсы ограниченной длительности; 6 – выход RS-триггера логического блока; 7 – сигнал с выхода DC-DC преобразователя.

На рис. 2 показано, как на выходе преобразователя (осциллограмма 7) меняется длительность импульсов напряжения. Так, при включении питания преобразователя или подключении к его выходу нагрузки присутствуют импульсы максимальной на промежутке времени от 0 до 168 мкс. При этом на выходе ШИМ (осциллограмма 1) постоянный уровень напряжения. Когда же напряжение на нагрузке приближается к номинальному значению (промежуток времени от 168 до 174 мкс), появляются импульсы на выходе ШИМ с изменяемой скважностью и логический блок повторяет это изменение скважности. Таким образом, моделирование разработанной схемы подтвердило корректность работы логического блока, контролирующего максимальную длительность импульса. Было установлено, что в начальный момент времени включения напряжения питания преобразователя и в момент подключения нагрузки силовой ключ работает в импульсном режиме, а также подтвержден факт ограничения напряжения на нагрузке при разорванной ОС, когда вход U_{os} был закорочен на «землю». Напряжение на нагрузке ограничивается напряжением питания преобразователя, умноженным на коэффициент заполнения выхода преобразователя, где коэффициент заполнения определяется величиной резистора R4.

На рис. 3 показаны осциллограммы, полученные в ходе измерения характеристик ИС понижающего импульсного DC-DC преобразователя. Напряжение питания ИС было задано от источника напряжения Аггау 3645А. Ограничение по току один ампер и напряжение выхода источника 24 В. Измерения произведены с помощью осциллографа KEYSIGHT MSOX3104T.

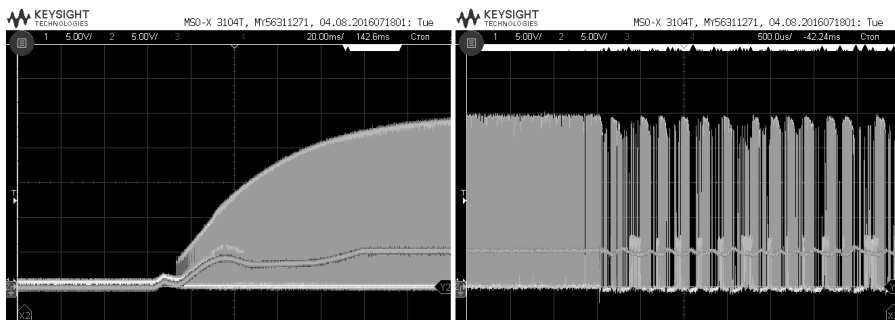


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы работы логического блока в составе ИС понижающего импульсного DC-DC преобразователя. Слева момент включения питания преобразователя, справа момент броска тока нагрузки

На рис. 3 шаг сетки по оси ординат 5 В, по оси абсцисс 20 мс. Первый канал (переменный сигнал) – напряжение выхода ИС, второй канал (постоянный сигнал) – напряжение на нагрузочном резисторе преобразователя.

Из рис. 3 видно, что и в момент включения питания преобразователя, и в момент броска тока нагрузки встроенный силовой ключ работает в импульсном режиме. Бросок тока нагрузки был осуществлен включением резистора номиналом 6 Ом параллельно основному резистору нагрузки номиналом 20 Ом.

Таким образом, с помощью математического моделирования экспериментально была доказана работоспособность логического блока, контролирующего максимальную длительность импульса. Встроенный силовой ключ работает в импульсном режиме при включении питания и при бросках тока нагрузки, а напряжение на нагрузочном резисторе ограничено максимальной шириной выходного импульса ИС преобразователя и может изменяться в широких пределах путём изменения резистора R4.

Для контроля максимальной длительности сигнала управления силовым ключом и, как следствие, контроля максимально возможного напряжения на нагрузке возможно изготовление ИС с выводом под внешний резистор R4. Тогда пользователь сам сможет устанавливать то значение максимальной длительности, которое сочтет необходимым.

Данное схемотехническое решение простое и функциональное. В интегральном исполнении схема логического блока занимает относительно малую площадь кристалла, но выполняет сразу несколько защитных и ограничительных функций, что позволяет увеличить срок службы всей интегральной схемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом данной работы является спроектированный ШИМ-контроллер с управляемой максимальной длительностью сигнала силового ключа с помощью резистора R4. Данная схема может быть применена в ИС DC-DC преобразователей со встроенными силовыми ключами. Внедрение такой схемы позволяет получать импульсный сигнал управления силового ключа вместо постоянного в момент запуска преобразователя и в моменты скачкообразного изменения тока нагрузки. Такая система предотвращает выход из строя встроенных силовых ключей, обусловленный протеканием постоянного тока, и позволяет увеличить срок службы устройства, а также предохранить от перенапряжения нагрузку преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vinodini D., Vasanprabhu V., Rajini V.* Design and analysis of digital PWM controller for DC-DC power converter // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 65, N 12. – P. 38–43.
2. *Abdessamad B., Salah-ddine K., Elidrissi C.M.* Designing a high efficiency pulse width modulation step-down DC/DC converter for mobile phone applications // IJCSI International Journal of Computer Science Issues. – 2012. – Vol. 9, iss. 5. – P. 70–76.
3. *Prodic A., Maksimovic D., Erickson R.W.* Design and implementation of a digital PWM controller for a high-frequency switching DC-DC power // IECON'01. The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2001. – Vol. 2. – P. 893–898.
4. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. – М.: Бином, 2014. – 704 с.
5. *Буйских А.* Распространенные причины возникновения неисправностей источников питания и методы их устранения // Компоненты и технологии. – 2013. – № 2. – С. 90–92.
6. *Уэйкерли Дж.* Проектирование цифровых устройств. Т. 1. – М.: Постмаркет, 2002. – 544 с.

Быков Владислав Михайлович, аспирант кафедры полупроводниковых приборов и микросистемной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – радиационно-стойкие цифро-аналоговые интегральные микросхемы. Имеет две публикации. E-mail: wlad000-wlad@yandex.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-7-15

Design and analysis of PWM-controller of pulse buck DC-DC converter^{*}

V.M. Bykov

Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, graduate student. E-mail: wlad000-wlad@yandex.ru

The developed PWM controller is part of an integrated circuit of a pulsed DC-DC converter with an integrated power switch. For pulsed voltage converters are characterized by the state when the system is out of the pulse mode. In these moments, the power key is either constantly open or permanently closed. This can occur when the load current sharply changing and at initial moment of the time when power turn on of the power converter. In this situation, the power switch conducted the direct current, which can reach critical values and can disable the power switch. And since the built-in power switch is limited by the production technology of other components, it will be more prone to overheating in DC mode than discrete devices. To solve this problem, a digital unit for the PWM controller was designed, which limits the maximum pulse duration that controls the power switch. With this digital unit, the converter operates in a pulsed mode when the load is connected and when current surges on the load, it is also possible to set the maximum possible the load voltage, providing the latter with overvoltage protection.

Keywords: pulse-width modulation, converter, simulation, control

REFERENCES

1. Vinodini D., Vasanprabhu V., Rajini V. Design and analysis of digital pwm controller for DC-DC power converter. *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 65, no. 12, pp. 38–43.
2. Abdessamad B., Salah-ddine K., Elidrissi C.M. Designing a high efficiency pulse width modulation step-down DC/DC converter for mobile phone applications. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 2012, vol. 9, iss. 5, pp. 70–76.

^{*} Received 16 July 2018.

3. Prodic A., Maksimovic D., Erickson R.W. Design and implementation of a digital PWM controller for a high-frequency switching DC-DC power converter. *IECON'01. The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2001, vol. 2, pp. 893–898.

4. Horowitz P., Hill W. *The art of electronics*. 2nd ed. New York, Cambridge university press, 1998 (Russ. ed.: Khorovits P., Khill U. *Iskusstvo skhemotekhniki*. Moscow, Binom Publ., 2014. 704 p.).

5. Buisikh A. Rasprostranennye prichiny vozniknoveniya neispravnostei istochnikov pitaniya i metody ikh ustraneniya [Common causes of power supply faults and methods for their elimination]. *Komponenty i tekhnologii – Components & Technologies*, 2013, no. 2, pp. 90–92.

6. Wakerly J. *Digital design: principles and practices*. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, 2000 (Russ. ed.: Ueikerli Dzh. *Proektirovanie tsifrovyykh ustroystv*. Moscow, Postmarket Publ., 2002. 544 p.).

Для цитирования:

Быков М.В. Разработка и анализ ШИМ-контроллера импульсного понижающего DC-DC преобразователя // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 7–15. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-7-15.

For citation:

Bykov V.M. Razrabotka i analiz ShIM-kontrollera impul'snogo ponizhayushchego DC-DC preobrazovatelya [Design and analysis of PWM-controller of pulse buck DC-DC converter] *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 7–15. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-7-15.

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ТОКА ДЛЯ ЭЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЕ*

В.А. ГРИНКЕВИЧ

630501, РФ, Новосибирская область, Новосибирский район, п. Краснообск, а/я 468, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, младший научный сотрудник. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

Управляемые термостаты применяются в различных приложениях: научные исследования, управление скоростью химических реакций, термостабилизация ПЗС-матриц, стабилизация температурного режима работы лазера. При этом используются термостаты разных конструкций, мощностей и размеров. В качестве исполнительного элемента может быть использован резистивный нагревательный элемент, элемент Пельтье, компрессорный холодильный контур. Элементы Пельтье обычно применяются при проектировании термостатов малой мощности и малых размеров, потому что элементы Пельтье имеют меньшие размеры и массу по сравнению с компрессорным холодильным контуром. Применение элемента Пельтье позволяет обеспечить температуру в термостате как выше, так и ниже температуры окружающей среды, в отличие от резистивных нагревательных элементов. Термоэлектрические термостаты применяются для термостатирования приборов с зарядовой связью (ПЗС-матриц) в цифровых фотоаппаратах, лазеров, электронных компонентов, биоматериалов, растений, лекарств. Такие термостаты могут применяться в научных исследованиях, медицине. Элементами Пельтье можно формировать температурные воздействия на семена растений для улучшения всхожести и энергии прорастания. Кроме того, элементы Пельтье можно применять для формирования температурных воздействий на растения при исследовании стрессоустойчивости от внешних факторов. Также элемент Пельтье применяется в автомобильных холодильниках. С целью поддержания стабильной температуры и обеспечения высокой точности требуется использовать регулятор температуры для элемента Пельтье. Управляющим воздействием для элемента Пельтье является ток, величина которого влияет на температуру внутри термостата. Поэтому в термостатах на основе элемента Пельтье возникает необходимость использования регулятора тока. В данной статье обсуждается методика синтеза регулятора тока с ШИМ в канале управления для элемента Пельтье. Используется схема с элементом Пельтье, который последовательно подключен через сглаживающий фильтр к мостовому усилителю. Расчет регулятора основан на применении метода разделения движений. Приведены результаты численного моделирования системы управления током. Предполагаемая система управления током для элемента Пельтье может быть использована в устройствах формирования температурных воздействий на биофизические объекты.

Ключевые слова: термостат, элемент Пельтье, регулятор тока, метод разделения движений, сглаживающий фильтр, математическая модель, численное моделирование

* Статья получена 27 августа 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Элементы Пельтье [1] применяют для конструирования термостатов малой мощности [2], устройств формирования температурных воздействий на растения [3], термостатирования лазеров, ПЗС-матриц и биоматериалов [4]. Также элементы Пельтье применяются в водяных кулерах и термоэлектрических холодильниках [5]. Управляющим фактором устройств формирования температурных воздействий является ток, протекаемый через элемент Пельтье. Соответственно в таких устройствах необходим регулятор тока. Изменяя направление тока, протекаемого через элемент Пельтье, можно осуществить нагревание или охлаждение объекта термостатирования.

Ток, протекаемый через элемент Пельтье, возможно менять путем последовательного включения транзистора в активном нормальном режиме [6] в цепь с элементом Пельтье. Но при использовании такого способа управления током имеют место большие тепловые потери на транзисторе, что снижает КПД устройства. С целью снижения тепловых потерь используется широтно-импульсный модулятор (ШИМ) [7] для управления транзисторами. В таком случае транзисторы работают в ключевом режиме, что ведет к уменьшению тепловых потерь и соответственно повышению КПД устройства. Для снижения пульсаций протекаемого через элемент Пельтье тока используются сглаживающие фильтры, которые состоят из дросселей и конденсаторов. При использовании ШИМ возникают пульсации тока. При большом уровне пульсаций тока происходит ухудшение свойств элемента Пельтье, поэтому важно обеспечить достаточно малый уровень пульсаций тока, протекаемого через элемент Пельтье. Существует несколько методов снижения пульсаций, например увеличение индуктивности дросселя и электроемкости конденсатора, но такой способ снижает быстродействие системы управления. Другой способ – увеличение частоты ШИМ, но драйверы и транзисторы имеют ограниченный рабочий диапазон частот. Третьим способом является увеличение порядка фильтра, но это усложняет расчет регуляторов. По этой причине рассматривается два варианта схем: схема с фильтром второго порядка и схема с фильтром третьего порядка. С целью обеспечения возможности изменения направления тока применяется мостовая схема включения транзисторов [8]. Для измерения тока в цепи с элементом Пельтье применяют датчики тока. С целью обеспечения требуемой точности и заданного качества переходных процессов необходимо выполнить синтез регулятора тока.

В данной статье обсуждается процедура расчета сглаживающего фильтра, методика синтеза регулятора тока с ШИМ в канале управления. Используется схема с элементом Пельтье, который последовательно подключен через сглаживающий фильтр [9] к мостовому усилителю [8]. Расчет регулятора тока

основан на применении метода разделения движений [10, 11]. Приведены результаты численного моделирования системы управления током. Предполагаемая система управления током для элемента Пельтье может быть использована в устройствах формирования температурных воздействий на биофизические объекты [12].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе в качестве объекта управления рассматривается два варианта электрической схемы с мостовым усилителем для управления протекаемым через элемент Пельтье током: схема со сглаживающим фильтром второго порядка (рис. 1), схема со сглаживающим фильтром третьего порядка (рис. 2). Для синтеза регулятора тока используется метод разделения движений. Также в данной статье рассматривается расчет параметров сглаживающего фильтра.

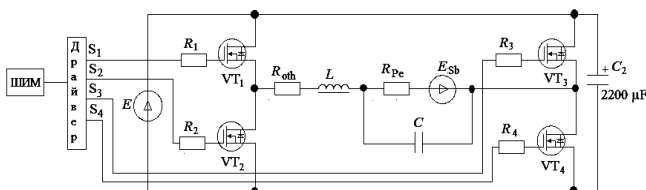


Рис. 1. Схема управления током, протекаемым через элемент Пельтье, со сглаживающим фильтром второго порядка

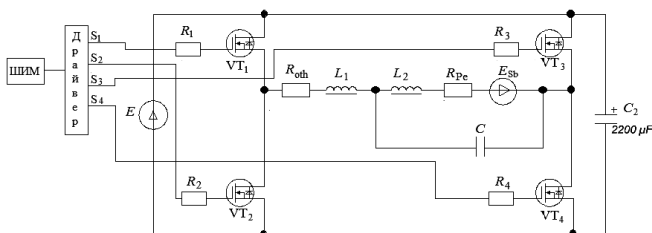


Рис. 2. Схема управления током, протекаемым через элемент Пельтье, со сглаживающим фильтром третьего порядка

Целью работы является расчет регулятора тока в цепи элемента Пельтье для рассматриваемых схем, обсуждение результатов и возможности практического применения. Общими требованиями для всех рассматриваемых систем

является обеспечение нулевого перерегулирования, нулевой статической ошибки и заданного времени переходного процесса.

В обсуждаемых электрических схемах элемент Пельтье рассматривается как последовательное соединение активного сопротивления R_{pe} и ЭДС Зеебека E_{Sb} [13], где ЭДС Зеебека вычисляется по формуле

$$E_{Sb} = \alpha(T_{out} - T_{in}),$$

где E_{Sb} – ЭДС Зеебека; α – коэффициент Зеебека; T_{out} – температура стороны элемента Пельтье, которая контактирует с радиатором; T_{in} – температура стороны элемента Пельтье, контактирующей с объектом термостатирования.

Например, для элемента Пельтье «ТЕТС1-26318» при разности температур его сторон, равной 74 °С, ЭДС Зеебека равна 8.3 В.

В данной системе управления ЭДС Зеебека является возмущающим фактором при расчете регулятора тока.

В качестве коммутационных элементов используются MOSFET-транзисторы [14], включенные по мостовой схеме. При расчете регулятора коммутационные элементы (КЭ) считались идеальными.

На функциональной схеме (рис. 3) используются обозначения: I_d – желаемый ток, протекаемый через элемент Пельтье; u – выходной сигнал регулятора (коэффициент заполнения импульса ШИМ); v – выходной сигнал ШИМ; $S_1 - S_4$ – управляющие коммутационными элементами сигналы; U – напряжение, подаваемое на сглаживающий фильтр; I – ток, протекаемый через элемент Пельтье.

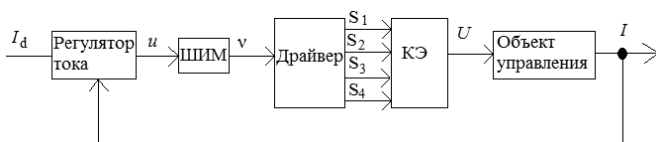


Рис. 3. Функциональная схема системы регулирования тока, протекаемого через элемент Пельтье

Для расчета параметров схемы с фильтром необходимо вывести ее математическую модель.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТОКОМ

2.1. Математическая модель для схемы управления током с фильтром второго порядка

Рассмотрим математическую модель для схемы со сглаживающим фильтром второго порядка на рис 1.

В соответствии со вторым правилом Кирхгофа

$$\left\{ \begin{array}{l} U = U_{\text{oth}} + U_L + U_{\text{Pe}} + E_{\text{Sb}}, \\ U_{\text{oth}} = R_{\text{oth}} I, \\ U_L = L \frac{dI}{dt}, \\ U_{\text{Pe}} = R_{\text{Pe}} I_{\text{Pe}}, \\ U = R_{\text{oth}} I + L \frac{dI}{dt} + R_{\text{Pe}} I_{\text{Pe}} + E_{\text{Sb}}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где U – напряжение на входе фильтра; U_{oth} – напряжение на активном сопротивлении источника, дросселя; U_L – напряжение на дросселе; U_{Pe} – напряжение на активном сопротивлении элемента Пельтье; E_{Sb} – ЭДС Зеебека; R_{oth} – активное сопротивление источника и дросселя; I – ток, протекаемый через дроссель; L – индуктивность дросселя; R_{Pe} – сопротивление элемента Пельтье; I_{Pe} – ток, протекаемый через элемент Пельтье.

Из первого правила Кирхгофа следует:

$$I = I_C + I_{\text{Pe}}, \quad (2)$$

где I_C – ток, протекаемый через конденсатор.

Поведение тока, протекаемого через конденсатор, описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_C = C \frac{dU_C}{dt}, \\ U_C = I_{\text{Pe}} R_{\text{Pe}} + E_{\text{Sb}}, \\ I_C = R_{\text{Pe}} C \frac{dI_{\text{Pe}}}{dt} + C \frac{dE_{\text{Sb}}}{dt}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где U_C – напряжение на конденсаторе.

Подставив (3) в (2), получим

$$I = R_{Pe}C \frac{dI_{Pe}}{dt} + C \frac{dE_{Sb}}{dt} + I_{Pe}. \quad (4)$$

После подстановки (4) в (1) получим

$$\begin{aligned} U = LCR_{Pe} \frac{d^2I_{Pe}}{dt^2} + (R_{oth}CR_{Pe} + L) \frac{dI_{Pe}}{dt} + (R_{oth} + R_{Pe}) I_{Pe} + \\ + LC \frac{d^2E_{Sb}}{dt^2} + R_{oth}C \frac{dE_{Sb}}{dt} + E_{Sb}. \end{aligned}$$

Напряжение U формируется мостовым усилителем и связано с выходным сигналом ШИМ v следующим соотношением: $U = Ev$, где v принимает значение -1 или 1 . В данной работе предполагается, что частота ШИМ достаточно велика, поэтому для анализа свойств системы управления заменим v на u , где u – входной сигнал ШИМ, который принимает значения от -1 до 1 .

В результате получаем уравнение для системы управления током I_{Pe} следующего вида:

$$\begin{aligned} Eu = LCR_{Pe} \frac{d^2I_{Pe}}{dt^2} + (R_{oth}CR_{Pe} + L) \frac{dI_{Pe}}{dt} + (R_{oth} + R_{Pe}) I_{Pe} + \\ + LC \frac{d^2E_{Sb}}{dt^2} + R_{oth}C \frac{dE_{Sb}}{dt} + E_{Sb}. \end{aligned}$$

Запишем последнее выражение в операторной форме:

$$\begin{aligned} Eu = LCR_{Pe} \cdot p^2 I_{Pe} + (R_{oth}CR_{Pe} + L) p I_{Pe} + (R_{oth} + R_{Pe}) I_{Pe} + \\ + LC \cdot p^2 E_{Sb} + R_{oth}C \cdot p E_{Sb} + E_{Sb}, \end{aligned}$$

из которого следует

$$I_{Pe} = W_1(p) \cdot u - W_2(p) \cdot E_{Sb},$$

где

$$W_1(p) = \frac{E}{LCR_{Pe}p^2 + (R_{oth}CR_{Pe} + L)p + (R_{oth} + R_{Pe})};$$

$$W_2(p) = \frac{L Cp^2 + R_{oth} Cp + 1}{LCR_{Pe}p^2 + (R_{oth}CR_{Pe} + L)p + (R_{oth} + R_{Pe})}.$$
(5)

Если корни характеристического уравнения передаточной функции (5) действительные, то такую передаточную функцию можно записать в виде

$$W_1(p) = \frac{E}{(R_{oth} + R_{Pe})} \frac{1}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1},$$
(6)

где T_1, T_2 – постоянные времени аperiodического переходного процесса.

В случае комплексно сопряженных корней передаточная функция (5) принимает вид

$$W_1(p) = \frac{E}{(R_{oth} + R_{Pe})} \frac{1}{T^2 p^2 + 2dT p + 1},$$

где T – постоянная времени колебательного переходного процесса, d – коэффициент демпфирования.

2.2. Математическая модель схемы управления током с фильтром третьего порядка

Рассмотрим математическую модель для схемы со сглаживающим фильтром второго порядка на рис. 2.

По второму правилу Кирхгофа

$$\begin{cases} U = U_{oth} + U_{L1} + U_C; \\ U = R_{oth} I + L_1 \frac{dI}{dt} + U_C, \end{cases}$$
(7)

где U_{L1} – напряжение на первом дросселе; I – протекаемый через первый дроссель ток; L_1 – индуктивность первого дросселя.

По закону параллельного соединения получим формулу расчета напряжения на конденсаторе

$$U_C = L_2 \frac{I_{Pe}}{dt} + I_{Pe} R_{Pe} + E_{Sb},$$

где L_2 – индуктивность второго дросселя.

По первому правилу Кирхгофа

$$I = I_{Pe} + I_C. \quad (8)$$

Ток, протекаемый через конденсатор, вычисляется по формулам:

$$I_C = C \frac{dU_C}{dt}, \quad (9)$$

$$I_C = CL_2 \frac{d^2 I_{Pe}}{dt^2} + CR_{Pe} \frac{dI_{Pe}}{dt} + C \frac{dE_{Sb}}{dt}.$$

Подставив (10) в (9), получим

$$I = CL_2 \frac{d^2 I_{Pe}}{dt^2} + CR_{Pe} \frac{dI_{Pe}}{dt} + C \frac{dE_{Sb}}{dt} + I_{Pe}. \quad (10)$$

После подстановки (10) в (7) получим

$$U = L_1 CL_2 \frac{d^3 I_{Pe}}{dt^3} + (L_1 CR_{Pe} + R_{oth} CL_2) \frac{d^2 I_{Pe}}{dt^2} + (CR_{Pe} R_{oth} + L_1 + L_2) \frac{dI_{Pe}}{dt} + (R_{oth} + R_{Pe}) I_{Pe} + L_1 C \frac{d^2 E_{Sb}}{dt^2} + R_{oth} C \frac{dE_{Sb}}{dt} + E_{Sb}.$$

Как и в предыдущем разделе, полагаем, что частота ШИМ достаточно велика. Тогда в соотношении $U = Ev$ выполним замену импульсного сигнала v на непрерывный входной сигнал ШИМ u . В результате получаем уравнение для тока I_{Pe} следующего вида:

$$Eu = L_1 CL_2 \frac{d^3 I_{Pe}}{dt^3} + (L_1 CR_{Pe} + R_{oth} CL_2) \frac{d^2 I_{Pe}}{dt^2} + (CR_{Pe} R_{oth} + L_1 + L_2) \frac{dI_{Pe}}{dt} +$$

$$+ (R_{\text{oth}} + R_{\text{Pe}}) I_{\text{Pe}} + L_1 C \frac{d^2 E_{\text{Sb}}}{dt^2} + R_{\text{oth}} C \frac{dE_{\text{Sb}}}{dt} + E_{\text{Sb}}.$$

Запишем предыдущее выражение в операторной форме:

$$Eu = L_1 CL_2 \cdot p^3 I_{\text{Pe}} + (L_1 CR_{\text{Pe}} + R_{\text{oth}} CL_2) p^2 I_{\text{Pe}} + (CR_{\text{Pe}} R_{\text{oth}} + L_1 + L_2) \times \\ \times p I_{\text{Pe}} + (R_{\text{oth}} + R_{\text{Pe}}) I_{\text{Pe}} + L_1 C \cdot p^2 E_{\text{Sb}} + R_{\text{oth}} C \cdot p E_{\text{Sb}} + E_{\text{Sb}}.$$

Преобразуем полученное выражение к виду

$$Eu = A(p) \cdot I_{\text{Pe}} + L_1 C \cdot p^2 E_{\text{Sb}} + R_{\text{oth}} C \cdot p E_{\text{Sb}} + E_{\text{Sb}}, \quad (11)$$

где $A(p)$ – характеристический полином

$$A(p) = L_1 CL_2 \cdot p^3 + (L_1 CR_{\text{Pe}} + R_{\text{oth}} CL_2) p^2 + \\ + (CR_{\text{Pe}} R_{\text{oth}} + L_1 + L_2) p + (R_{\text{oth}} + R_{\text{Pe}}). \quad (12)$$

Из уравнения (11) следует

$$I_{\text{Pe}} = W_1(p) \cdot u - W_2(p) \cdot E_{\text{Sb}},$$

$$W_1(p) = \frac{E}{A(p)}, \quad (13)$$

$$W_2(p) = \frac{L_1 Cp^2 + R_{\text{oth}} Cp + 1}{A(p)}.$$

Если все корни характеристического уравнения (12) действительные, то такую передаточную функцию (13) можно записать в виде

$$W_1(p) = \frac{E}{(R_{\text{oth}} + R_{\text{Pe}})} \times \\ \times \frac{1}{T_1 T_2 T_3 p^3 + (T_1 T_3 + T_2 T_3 + T_1 T_2) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3) p + 1}, \quad (14)$$

где T_1, T_2, T_3 – постоянные времени аperiodического переходного процесса.

В случае одного действительного и пары комплексно сопряженных корней характеристического уравнения (12) передаточная функция (13) принимает вид

$$W_1(p) = \frac{E}{(R_{\text{oth}} + R_{\text{Pe}})} \frac{1}{T_1 T_2^2 p^3 + (T_2^2 + 2dT_1 T_2) p^2 + (T_1 + 2dT_2) p + 1},$$

где T_1 – постоянная времени аperiodического переходного процесса; T_2 – постоянная времени колебательного переходного процесса; d – коэффициент демпфирования.

3. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ТОКА

При синтезе регулятора необходимо учитывать динамические свойства объекта управления, чтобы обеспечить требуемую точность и устойчивость системы управления. Существуют различные методы синтеза и настройки регуляторов: частотный метод, модальный метод, метод разделения движений, метод локализации, процедура Циглера–Никольса, метод численной оптимизации. Особенностью элемента Пельтье является нестационарность параметров и отсутствие полной информации. В данном случае необходимо задать требования к переходному процессу. При постоянной времени менее 0,01 с и высоких порядках схем метод численной оптимизации выполняется долго. Метод локализации требует вычисления производной такого порядка, как и порядок объекта. Поэтому наиболее подходящим является метод разделения движений.

Перед расчетом регулятора нужно рассчитать параметры схемы с фильтром. Схема с фильтром первого порядка имеет широкую переходную полосу [15], что требует большой разницы между периодом ШИМ и постоянной времени фильтра. В связи с этим рекомендуется использовать фильтр второго или третьего порядка.

Уровень пульсаций тока при использовании ШИМ рассчитывается по АЧХ. Из выражений (5) и (6) выведем формулы для расчета АЧХ схемы с фильтром второго порядка:

$$M(\omega) = \frac{E}{\sqrt{\left((R_{\text{oth}} + R_{\text{Pe}}) - LCR_{\text{Pe}}\omega^2\right)^2 + \left((R_{\text{oth}}CR_{\text{Pe}} + L)\omega\right)^2}}, \quad (15)$$

$$M(\omega) = \frac{E}{(R_{\text{oth}} + R_{\text{pe}})} \frac{1}{\sqrt{(1 - T_1 T_2 \omega^2)^2 + ((T_1 + T_2)\omega)^2}}, \quad (16)$$

где M – АЧХ, ω – циклическая частота.

Из выражений (12) и (13) выведем формулы для расчета АЧХ схемы с фильтром второго порядка:

$$M(\omega) = E / \text{sqrt} \left(\left((R_{\text{oth}} + R_{\text{pe}}) - (L_1 C R_{\text{pe}} + R_{\text{oth}} C L_2) \omega^2 \right)^2 + \left((C R_{\text{pe}} R_{\text{oth}} + L_1 + L_2) \omega - L_1 C L_2 \cdot \omega^3 \right)^2 \right), \quad (17)$$

где sqrt – квадратный корень;

$$M(\omega) = \frac{E}{(R_{\text{oth}} + R_{\text{pe}})} \times \frac{1}{\sqrt{(1 - (T_1 T_3 + T_2 T_3 + T_1 T_2) \omega^2)^2 + ((T_1 + T_2 + T_3) \omega - T_1 T_2 T_3 \omega^3)^2}}. \quad (18)$$

Циклическая частота вычисляется по формуле $\omega = 2\pi f$, где f – частота.

Исходными данными для расчета фильтра являются: сопротивление элемента Пельтье, предполагаемые сопротивления дросселя и источника, максимальный ток, протекаемый через элемент Пельтье, ЭДС источника. Большая часть элементов Пельтье имеет сопротивление менее 2,5 Ом, через некоторые из них может протекать ток более 15 А. Для элементов Пельтье с сопротивлением 2,5...7 Ом такие токи (более 15 А) не используются. Существуют элементы Пельтье с сопротивлением более 7 Ом. Через такие элементы, как правило, протекает ток не более 2,5 А.

3.1. Алгоритм расчета сглаживающего фильтра

1. Выбирается элемент Пельтье с определенным сопротивлением.
2. Выбираются требования к пульсациям тока исходя из технических свойств элемента Пельтье и требований в пульсациях по температуре.

3. Выбирается частота ШИМ исходя из возможности технической реализации (например, в диапазоне от 16 до 40 кГц). В данной работе выбрана частота ШИМ, равная 18 кГц.

4. Для упрощения структуры регулятора одну из постоянных времени нужно выбирать значительно больше других. Используя метод разделения движений [10], для фильтра второго порядка получим

$$T_1 = \eta T_2, \quad (19)$$

а для фильтра третьего порядка

$$T_1 = \eta T_2, \quad T_1 = \eta T_3, \quad (20)$$

где η – степень разделения движений, $\eta \geq 10$.

5. Подставив (19) в (16) или (20) в (18), рассчитаем постоянные времени.

6. Используя формулы (15) и (16) или (17) и (18), рассчитаем значения параметров фильтра.

7. Если значения индуктивности, емкости не соответствуют стандартным рядам, выбираются номиналы из ряда, наиболее близкие к рассчитанным. Если после замены номиналов уровень пульсаций стал не удовлетворять требованиям, то строится график зависимости АЧХ от изменяемых параметров: индуктивности, частоты ШИМ, емкости.

8. При практической реализации регулятора тока выбор фильтра осуществляется в соответствии с заданными требованиями на технико-экономические показатели прибора.

Примечания

1. Для фильтра второго порядка можно выбирать параметры, такие что фильтр представлял собой колебательное звено или апериодическое с отличиями параметров менее чем в 10 раз, и использовать ПИД-регулятор.

2. Для фильтра третьего порядка можно выбирать параметры, такие что наибольшие апериодические постоянные времени отличались менее чем в 10 раз, и использовать ПИД-регулятор.

3. Для фильтра третьего порядка допустимо, чтобы процесс с меньшей постоянной времени был колебательным.

4. Фильтр третьего порядка также можно рассчитывать: задать уровень пульсаций несколько выше требуемого и рассчитать фильтр второго порядка, два рассчитанных реактивных элемента применить для фильтра третьего порядка, после этого построить график зависимости АЧХ от характеристики нерассчитанного реактивного элемента фильтра третьего порядка и выбрать такой, для которого уровень пульсаций будет соответствовать требуемому.

3.2. Расчет фильтров второго и третьего порядка для элемента Пельтье с активным сопротивлением 1,5 Ом и максимально допустимым током 19 А

Расчет фильтра второго порядка

1. $R_{pe} = 1.5 \text{ Ом}$, $R_{oth} = 1.5 \text{ Ом}$, $E = 12 \text{ В}$.

2. Уровень пульсаций не должен превышать 0.01 А.

3. Выберем частоту ШИМ $f_{PWM} = 18 \text{ кГц}$.

4. Выберем степень разделения движений, равную $\eta = 30$.

5. Подставив (19) в (16) или (20) в (18), рассчитаем постоянные времени

$$T_1 = 1.21 \cdot 10^{-3} \text{ с}, T_2 = 40 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

6. Используя формулы (15) и (16), получим два варианта параметров: $L = 3.66 \text{ мГн}$, $C = 26 \text{ мкФ}$ и $L = 60 \text{ мкГн}$, $C = 1600 \text{ мкФ}$. Для расчета регуляторов выберем $L = 3.66 \text{ мГн}$, $C = 26 \text{ мкФ}$.

7. Из ряда номиналов выберем $L = 3.5 \text{ мГн}$, $C = 22 \text{ мкФ}$.

Таким образом были получены следующие значения параметров для схемы с фильтром второго порядка: $L = 3.5 \text{ мГн}$, $C = 22 \text{ мкФ}$, $R_{pe} = 1.5 \text{ Ом}$, $R_{oth} = 1.5 \text{ Ом}$, $E = 12 \text{ В}$.

Для фильтра третьего порядка емкость C и индуктивность L_1 возьмем такие же, как и для фильтра второго порядка. Построим график зависимости АЧХ фильтра третьего порядка (рис. 4) от индуктивности L_2 при частоте ШИМ, равной 18 кГц.

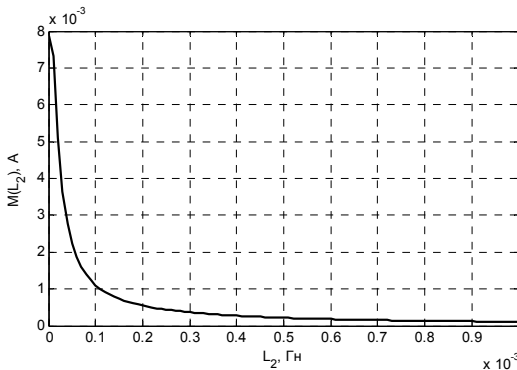


Рис. 4. АЧХ схемы с фильтром третьего порядка

Таким образом были получены следующие значения параметров для схемы с фильтром третьего порядка: $L_1 = 3.5$ мГн, $C = 22$ мкФ, $L_2 = 100$ мкГн, $R_{pe} = 1.5$ Ом, $R_{oth} = 1.5$ Ом, $E = 12$ В.

3.3. Синтез регулятора тока для схемы с фильтром второго порядка

В качестве примера рассмотрим схему на рис. 1 при рассчитанных параметрах. Вычисляем корни характеристического полинома передаточной функции (5) и постоянные времени:

$$T_1 = -p_1^{-1} = 0.0011 \text{ с}, \quad T_2 = -p_2^{-1} = 0.0000335 \text{ с}.$$

Как видно, оба корня действительные. Следовательно, передаточную функцию (5) можно представить в виде

$$W(p) = \frac{E}{LCR_{pe} p_1 p_2 (T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}.$$

Поскольку T_2 в 34 раза меньше T_1 , для расчета регулятора тока будем использовать упрощенную передаточную функцию следующего вида:

$$W(p) = \frac{E}{LCR_{pe} p_1 p_2 (T_1 p + 1)}. \quad (21)$$

В соответствии с методикой синтеза ПИ-регуляторов [10] для объекта первого порядка рассмотрим уравнение регулятора в следующем виде:

$$\mu \frac{du}{dt} = k_0 \left(\frac{I_d - I}{T_d} - \frac{dI}{dt} \right), \quad (22)$$

где μ – малый параметр; T_d – желаемая постоянная времени; I_d – желаемый ток; I – ток; k_0 – коэффициент, соответствующий характеристике объекта управления.

Преобразуем (22) в операторную форму:

$$\mu p u = k_0 \left(T_d^{-1} (I_d - I) - p I \right).$$

Выразим управляющий сигнал

$$u = \frac{k_0}{\mu T_d p} (I_d - I) - \frac{k_0}{\mu} I.$$

Получена структура ПИ-регулятора, где коэффициенты имеют вид

$$k_p = \frac{k_0}{\mu}, \quad k_I = \frac{k_0}{\mu T_d}. \quad (23)$$

Для системы, описываемой передаточной функцией (21), коэффициент k_0 вычисляется по формуле

$$k_0 = \frac{LCR_{pe} p_1 p_2 T_1}{E}. \quad (24)$$

Зададим желаемую постоянную времени T_d , равную $2 \cdot 10^{-3}$ с. Малый параметр μ вычисляется по формуле

$$\mu = \frac{\min(T_d, T_1)}{\eta}, \quad (25)$$

где η – степень разделения движений. Степень разделения движений η выберем равную 10, что приводит к формированию медленных процессов по току, быстрых – по выходному сигналу регулятора.

Используя формулы (23)–(25), рассчитаем коэффициенты регулятора: $k_p = 2.5$, $k_I = 1250$.

3.4. Синтез регулятора тока для схемы с фильтром третьего порядка

Характеристический полином (12) при заданных параметрах имеет один действительный и два комплексно-сопряженных корня. Соответственно характеристический полином (12) можно записать в виде

$$A(p) = L_1 C L_2 (-p_1) \cdot |p_2|^2 \cdot (T_1 p + 1) \cdot (T_2^2 p^2 + 2dT_2 p + 1),$$

где p_1 – действительный корень; $|p_2|$ – модуль комплексно-сопряженных корней; T_1 – постоянная времени, соответствующая действительному корню;

T_2 – постоянная времени, соответствующая комплексно-сопряженным корням; d – коэффициент демпфирования.

При заданных параметрах постоянные времени равны

$$T_1 = -\frac{1}{p_1} = 0.0012 \text{ с}, \quad T_2 = \sqrt{\frac{1}{|p_2|^2}} = 0.0000465 \text{ с}.$$

Как видно, T_2 в 26 раз меньше T_1 , для расчета регулятора тока будем использовать упрощенную передаточную функцию следующего вида:

$$W(p) = \frac{E}{L_1 C L_2 (-p_1) \cdot |p_2|^2 \cdot (T_1 p + 1)}. \quad (26)$$

Коэффициент k_0 для системы, описываемой передаточной функцией (26), рассчитывается по формуле

$$k_0 = \frac{L_1 C L_2 (-p_1) \cdot |p_2|^2 \cdot T_1}{E}. \quad (27)$$

Зададим желаемую постоянную времени T_d , равную $2 \cdot 10^{-3}$ с. Степень разделения движений η выберем равную 10. Используя формулы (22), (24) и (25), рассчитаем коэффициенты регулятора: $k_p = 2.5$, $k_I = 1250$.

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

4.1. Численное моделирование процессов по току для схемы с фильтром второго порядка

Показаны результаты численного моделирования. Переходные процессы по току удовлетворяют требованиям (рис. 5–7). При таком варианте имеются пульсации по току (рис. 6) и сигналу управления (рис. 7).

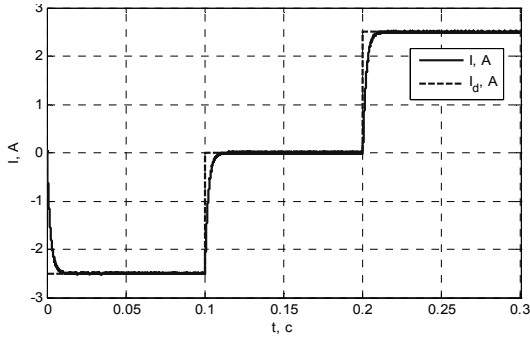


Рис. 5. Переходные процессы по току

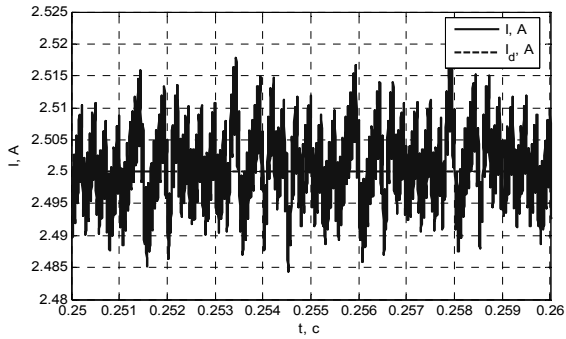


Рис. 6. Пульсации по току

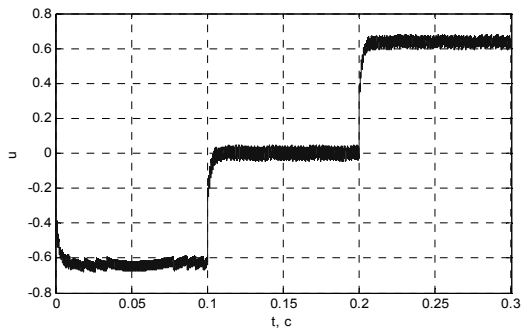


Рис. 7. Переходные процессы выходного сигнала регулятора

4.2. Численное моделирование процессов по току для схемы с фильтром третьего порядка

Показаны результаты численного моделирования. Переходные процессы по току удовлетворяют требованиям (рис. 8–10). Пульсации по току (рис. 9) меньше, чем с использованием схемы с фильтром второго порядка для первого варианта параметров. Сигнал управления также имеет меньшие пульсации (рис. 10).

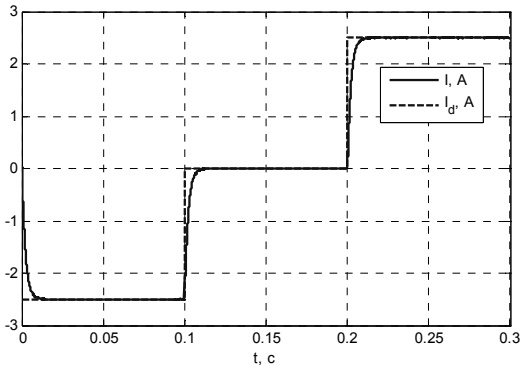


Рис. 8. Переходные процессы по току

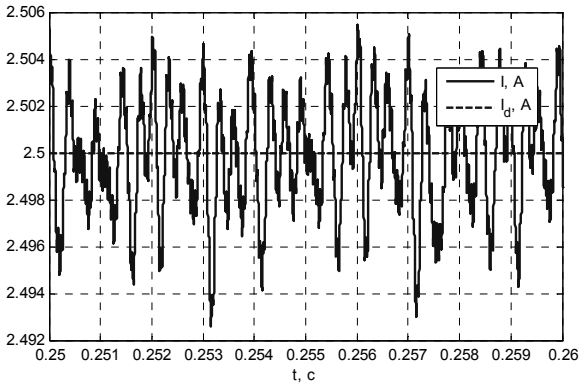


Рис. 9. Пульсации по току

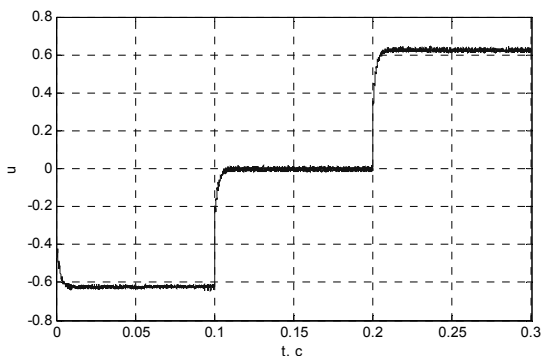


Рис. 10. Переходные процессы выходного сигнала регулятора

5. ВЫВОД ПО ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

По результатам численного моделирования видно, что метод разделения движений может быть использован для расчета регулятора тока в цепи с элементом Пельтье со сглаживающим фильтром второго порядка (рис. 5–7) и третьего порядка (рис. 8–10). Переходные процессы соответствуют заданным требованиям. Сглаживающий фильтр второго порядка требует большей индуктивности для уменьшения пульсаций тока до допустимого уровня, чем сглаживающий фильтр третьего порядка, это видно из рис. 6 и 9. Большинство дросселей с индуктивностью 3.5 мГн при токах более 10 А переходят в режим насыщения [16]. При параметрах, обеспечивающих одинаковую постоянную времени сглаживающих фильтров второго и третьего порядка, сглаживающий фильтр третьего порядка сильнее снижает уровень пульсаций, как видно из результатов численного моделирования на рис. 6 и 9. Для упрощения расчета сглаживающего фильтра третьего порядка можно сначала рассчитать фильтр второго порядка. Потом по зависимости АЧХ от характеристики нерассчитанного реактивного элемента выбрать этот элемент для фильтра третьего порядка, что видно из рис. 5 и 8.

Ток регулировался с использованием ШИМ. Были рассмотрены два варианта сглаживающего фильтра: второго и третьего порядка. Так же рассмотрена методика расчета значения индуктивности дросселя и электроемкости конденсатора для сглаживающих фильтров.

При использовании фильтров высокого порядка нужно подбирать индуктивности дросселя и электроемкости конденсатора так, чтобы одна постоянная

ная времени была как минимум в 10 раз больше остальных, чтобы при расчете регулятора можно было упростить систему до первого порядка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика расчета сглаживающего фильтра. Синтезирован стабилизирующий регулятор тока для элемента Пельтье методом разделения движений. Исследовано применение сглаживающего фильтра второго и третьего порядка. Проведено численное моделирование процессов в контуре тока. Фильтр третьего порядка позволяет обеспечить ниже уровень пульсаций с равной наибольшей постоянной времени, что следует из результатов численного моделирования. Предложенная методика расчета сглаживающего фильтра является подходящей для синтеза регулятора тока, протекаемого через элемент Пельтье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гринкевич В.А.* Исследование математической модели термостата на основе элемента Пельтье // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 3 (89). – С. 62–77. – doi: 10.717212/2307-6879-2017-62-77.
2. Полупроводниковый термостат для лабораторных исследований «ТС-20» / И.П. Егорова, Ю.И. Иванов, С.Н. Колесников, Г.И. Сидоров // Известия ТРТУ. – 2002 – № 6 (29). – С. 121–123.
3. *Сероклинов Г.В., Гунько А.В.* Информационные технологии при исследовании изменения биопотенциала растений от действия температуры // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014): труды XII международной конференции, 2–4 октября 2014 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 7. – С. 72–75.
4. *Магомедов Д.А., Хазамова Л.А., Миснахов И.Ш.* Малогабаритный термостат для перевозки биоматериалов // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. – СПб., 2015. – С. 458–460.
5. *Тарукин Е.М.* Авторефрижераторы // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 6 (13). – С. 68–82.
6. *Лачин В.И., Савёлов Н.С.* Электроника: учебное пособие. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Ростов н/Д.: Феникс, 2007. – 703 с.
7. *Юркевич В.Д.* Синтез нелинейных систем с ШИМ в канале управления на основе метода разделения движений // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1-1 (25). – С. 127–130.

8. *Охоткин Г.П., Романова Е.С.* Анализ законов коммутации ключей мостовой схемы импульсного преобразователя // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 3. – С. 142–149.
9. *Голубев В.В.* Расчет и оптимизация входного RLC-фильтра импульсного преобразователя переменного напряжения // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2012. – Вип. 33. – С. 92–99.
10. *Юркевич В.Д.* Многоканальные системы управления. Синтез линейных систем управления с разнотемповыми процессами: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 183 с.
11. *Yurkevich V.D.* PWM controller design based on singular perturbation technique: a case study of buck-boost DC-DC converter // Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, August 28 – September 2, 2011. – Milan, 2011. – P. 9739–9744.
12. *Сероклинов Г.В.* Задачи автоматизации экспериментальных исследований сложных биофизических объектов // Методы и технические средства исследований физических процессов в сельском хозяйстве: сборник научных трудов СибФТИ. – Новосибирск, 2001. – С. 46–53.
13. *Макфузова А.И., Травин Д.Д., Филимонова А.А.* Термозлементы как дополнительные источники энергии на орбитальной станции // Научные исследования: от теории к практике. – № 5 (6). – С. 262–263.
14. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники. Ч. 1: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
15. *Рогинская Л.Э., Белкин А.К., Шуляк А.А.* Влияние дросселей насыщения на электромагнитные процессы в высокочастотном инверторе // Вестник Уфимского авиационного технического университета. – 2009. – Т. 13, № 1. – С. 166–175.

Гринкевич Владимир Анатольевич, младший научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий Российской академии наук. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-16-39

Current controller design for Peltier element*

V.A. Grinkevich

Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies, PO Box 468, Krasnoobsk, Novosibirsk district, Novosibirsk region, 630501, Russian Federation. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

Controlled thermostats are applied in many applications: scientific researches, chemical reaction speed control, thermal stabilization of CCD-matrix, stabilization of the laser temperature operating mode. Different construction, power and size of thermostat is exists. Executive element may be resistive heater, Peltier element, compressor refrigerant circuit. Peltier elements usually is applied for design of small power thermostats, small size thermostats because Peltier elements have small size and weight in comparison with compressor refrigerant circuit. Peltier element is allow to get above ambient temperature and bellow ambient temperature unlike resistive heaters. Thermoelectric thermostats is applied for thermostating CCD-matrix in digital camera, lasers, electronic component, biological materials, plants, drugs. Besides these thermostats is applied in scientific researches, medicine. It is possible to form temperature affect on plant seed for improvement plant seed quality, germination and energy germination. Besides It is impossible to apply the Peltier elements for forming temperature affects on plants during research of stress resistance by different external factors. Besides Peltier elements is applied in car refrigerators. It is required temperature controller for thermal stabilization and high accuracy. Controlling affect for Peltier element is current. Current value is influence on inside thermostat temperature. Therefore it is necessary to use the current controller. Technique of current controller design with PWM in control channel is discussed in this article. Circuit with Peltier element where it serially connected to bridge amplifier over smoothing filter is used. Controller design based on time-scale separation method. Computer simulation results for current control system are showed. This current controller may be to use in device for forming of temperature affect on biophysical objects.

Keywords: Thermostat, Peltier element, current controller, time-scale separation method, smoothing filter, mathematical model, numeric simulation

REFERENCES

1. Grinkevich V.A. Issledovanie matematicheskoi modeli termostata na osnove elementa Pel'te [Research on mathematical model of thermostat based on Peltier element]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 3 (89), pp. 62–77. doi: 10.717212/2307-6879-2017-62-77.
2. Egorova I.P., Ivanov Yu.I., Kolesnikov S.N., Sidorov G.I. Poluprovodnikovyi termostat dlya laboratornykh issledovaniy "TC-20" [Semiconductor thermo-

* Received 27 August 2018.

stat for laboratory researches "TC-20"]. *Izvestiya TRTU – Izvestiya TSURE*, 2002, no. 6 (29), pp. 121–123.

3. Seroklinov G.V., Gun'ko A.V. [Information technology for research biological potential changing by temperature affect]. *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya (APEP-2014)* [12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE)-34006 proceedings], Novosibirsk, October 2–4, 2014, vol. 7, pp. 72–75. (In Russian).

4. Magomedov D.A., Khazamova L.A., Mispakhov I.Sh. Malogabaritnyi termostat dlya perevozki biomaterialov [Small-size thermostat for transportation of biological materials]. *Nizkotemperaturnye i pishchevye tekhnologii v XXI veke* [Low-temperature and food technologies in XXI century]. St. Petersburg, 2015, pp. 458–460.

5. Tarukin E.M. Avtorefrizheratory [Refrigerators for car]. *Vestnik NGIEI – Herald NGIEI*, 2012, no. 6 (13), pp. 68–82.

6. Lachin V.I., Savelov N.S. *Elektronika* [Electronics]. 6th ed., rev., suppl. Rostov-na-Donu, Fenix Publ., 2007. 703 p.

7. Yurkevich V.D. Sintez nelineinykh sistem s ShIM v kanale upravleniya na osnove metoda razdeleniya dvizhenii [Design of nonlinear control systems with pulse-width modulation via time-scale separation]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2012, no. 1-1 (25), pp. 127–130.

8. Okhotkin G.P., Romanova E.S. Analiz zakonov kommutatsii klyuchi mostovoi skhemy impul'snogo preobrazovatelya [Analysis of commutation laws switches of bridge circuit of pulse converter]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta – Bulletin of the Chuvash University*, 2012, no. 3, pp. 142–149.

9. Golubev V.V. Raschet i optimizatsiya vkhodnogo RLC-fil'tra impul'snogo preobrazovatelya peremennogo napryazheniya [Calculation and optimization of the entrance RLC-filter of the pulse converter of a AC voltage]. *Pratsi Institutu elektrodinamiki Natsional'noi akademii nauk Ukraini – Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2012, iss. 33, pp. 92–99.

10. Yurkevich V.D. *Mnogokanal'nye sistemy upravleniya. Sintez lineinykh sistem upravleniya s raznotempovymi protsessami* [Design of linear control systems with multi-time scale motions]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 183 p.

11. Yurkevich V.D. PWM controller design based on singular perturbation technique: a case study of buck-boost DC-DC converter. *Preprints of the 18th IFAC World Congress*, Milan, Italy, August 28 – September 2, 2011, pp. 9739–9744.

12. Seroklinov G.V. Zadachi avtomatizatsii eksperimental'nykh issledovaniy slozhnykh biofizicheskikh ob'ektov [Tasks of automation experimental researching of complex biophysical objects]. *Metody i tekhnicheskie sredstva issledovaniy fizi-*

cheskikh protsessov v sel'skom khozyaistve [Methods and technical facilities of researching of physical processes in agriculture]. Novosibirsk, 2001, pp. 46–53.

13. Makfuzova A.I., Travin D.D, Filimonova A.A. Termoelementy kak dopolnitel'nye istochniki energii na orbital'noi stantsii [Thermoelements as additional energy source in orbital station]. *Nauchnye issledovaniya: ot teorii k praktike – Scientific research: from theory to practice*, 2015, no. 5 (6), pp. 262–263.

14. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki*. Ch. 1 [Fundamentals of power electronics. Pt. 1]. Novosibirsk. NSTU Publ., 1999. 199 p.

15. Roginskaya L.E., Belkin A.K, Shulyak A.A. Vliyanie drosslei nasyshcheniya na elek-tromagnitnye protsessy v vysokochastotnom invertore [Influence of saturation chokes on electromagnetic processes in the high-frequency inverter]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik UGATU*, 2009, vol. 13, no. 1, pp. 166–175.

Для цитирования:

Гринкевич В.А. Синтез регулятора тока для элемента Пельтье // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 16–39. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-16-39.

For citation:

Grinkevich V.A. Sintez regul'yatora toka dlya elementa Pel't'e [Current controller design for Peltier element]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 16–39. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-16-39.

СОВРЕМЕННЫЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.932.2

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-40-58

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АЛГОРИТМОВ
РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ*

С.А. ЛЕВЧУК¹, А.А. ЯКИМЕНКО²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры вычислительной техники. E-mail: sonya.levchuk@gmail.com

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники. E-mail: yakimenko@corp.nstu.ru

Безопасность стала главной проблемой во всём мире, и чтобы управлять проблемами безопасности и свести риски, были созданы такие биометрические системы, как системы обнаружения и распознавания лиц. На текущий момент существует большое количество алгоритмов распознавания лиц. Все обладают своими достоинствами и недостатками. Каждый из них опирается на свои специфические требования входных данных. Например, качество изображения, количество точек на пикселях, освещенность, естественное освещение, неестественное освещение, наличие помех, шума. Основной трудностью распознавания лиц является зависимость качества результата идентификации человека по изображению лица от ракурса, положения, условий освещенности и т. д. Работа посвящена разработке обобщенной модели, позволяющей учитывать взаимосвязь входных характеристик, в привязке к алгоритму, которая на выходе будет выдавать ожидаемое качество результата алгоритма при заданных параметрах. В связи с этим в статье выявлены алгоритмы распознавания лиц, а также приведено краткое описание выбранных методов распознавания лица, которые будут использоваться в дальнейшем исследовании. Для анализа были взяты алгоритмы распознавания лиц: метод главных компонент, линейный дискриминантный анализ, метод гибкого сравнения на графах, алгоритм Виолы–Джонса, сверточные нейронные сети, метод опорных векторов. Определены свойства входных данных изображения: освещенность, ракурс, мимика, помехи, шум, качество изображения. Выявлены шкалы для характеристик изображения, в дальнейшем планируется разработать единую шкалу для оценки качества алгоритмов. Также в данной статье описаны критерии оценки качества распознавания лиц: F-мера, Precision, Recall, Accuracy, Confusion matrix, AUC-ROC; приведены полученные результаты.

Ключевые слова: алгоритмы распознавания лиц, метод главных компонент, линейный дискриминантный анализ, метод гибкого сравнения на графах, алгоритм Виолы–Джонса, метод опорных векторов, сверточные нейронные сети, шкалы характеристик, критерии оценки

* Статья получена 20 ноября 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

В задачу биометрических методов распознавания лиц входит автоматическое нахождение лица на изображении и, при необходимости, идентификация человека [1]. Интерес к сфере обнаружения распознавания лиц значителен благодаря разнообразию их практического применения в таких областях, как охранные системы, криминалистическая экспертиза, верификация, телеконференции, в фототехнике для автоматической фокусировки на лице человека и т. д [1].

Технология идентификации личности на основе изображения лица, в отличие от использования других биометрических методов, не требует физического контакта с устройством, а также с учетом стремительного развития цифровой техники является наиболее приемлемой для массового применения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках данной работы поставлена задача – разработать модель для оценивания качества работы алгоритмов распознавания лиц.

Для достижения поставленной задачи необходимо:

- выбрать алгоритмы распознавания лиц;
- определить характеристики входных данных изображений;
- выявить критерии оценки качества работы алгоритмов;
- определить шкалы для измерения характеристик.

2. ОБЗОР АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ

Метод главных компонент

Метод главных компонент (Principal Component Analysis, МГК) позволяет перейти от пространства признаков большой размерности к пространству признаков малой размерности так, чтобы признаки стали некоррелированными. Данный подход в задаче распознавания лиц был впервые использован в 1991 году М. Турком и А. Пентлендом и получил название «Собственные лица» (от англ. Eigenfaces) [2].

Основная задача метода заключается в представлении изображений лиц в виде набора (вектора) главных компонент изображений, называемых «собственные лица». Изображение, соответствующее каждому такому вектору, имеет лицеподобную форму [1].

Нахождение главных компонент сводится к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы, рассчитывающейся из изображения. Сумма главных компонент, умноженных на соответствующие собственные вектора, является реконструкцией изображения [1].

Для любого изображения лица вычисляются его главные компоненты. Обычно берется от 5 до 200 главных компонент. Процесс распознавания состоит из сравнения главных компонент неизвестного изображения с компонентами известных. При этом изображения лиц, соответствующие одному человеку, сгруппированы в кластеры в собственном пространстве. Из базы данных выбираются изображения-кандидаты, которые имеют наименьшее расстояние от входного изображения.

Достоинства рассмотренного метода [1]:

- в наборе изображений лиц при наличии вариаций, таких как раса, пол, эмоции, освещение, создаются компоненты, величина которых в целом определяется этими факторами. В связи с этим по значениям соответствующих главных компонент можно определить, например, расу или пол человека;
- хранение и поиск изображений в больших базах данных.

Недостаток метода главных компонент [1]:

- высокие требования к условиям съемки изображений. Они должны быть получены в близких условиях освещенности и одинаковом ракурсе, должна быть проведена качественная предварительная обработка, приводящая изображения к стандартным условиям.

При соблюдении идеализированных условий точность распознавания с использованием данного метода может достигать более 90 %.

Линейный дискриминантный анализ

Линейный дискриминантный анализ, дискриминант Фишера (Linear Discriminant Analysis, Fisherfaces, ЛДА), – метод статистики и машинного обучения, который применяется для нахождения линейных комбинаций признаков, наилучшим образом разделяющих два или более класса объектов или событий. Полученная комбинация используется в качестве линейного классификатора или для сокращения размерности пространства признаков перед последующей классификацией [3].

Суть метода – выбрать проекцию пространства изображений на пространство признаков таким образом, чтобы минимизировать внутриклассовое и максимизировать межклассовое расстояние в пространстве признаков. Проецирование на собственное пространство смешивает классы, что делает распознавание невозможным, а линейный дискриминант выбирает проекцию на пространство признаков таким образом, чтобы разделить разные классы [3].

Достоинства метода ЛДА [3]:

- высокая точность распознавания (около 94 %);
- не влияют на распознавание условия освещенности, различные выражения лица и наличие или отсутствие помех (очков, бород).

Недостатки данного метода [3]:

- не проводились эксперименты с изменением ракурса, поэтому работоспособность метода не известна.

Метод гибкого сравнения на графах

Метод гибкого сравнения на графах относится к методу перебора. Проводится сравнение с базой данных, где для каждого вида объектов представлены всевозможные модификации отображения [4].

Основная задача метода заключается в эластичном сопоставлении графов, которые описывают изображения лиц. Лица представлены в виде графов со взвешенными вершинами и ребрами. Во время распознавания один из графов – эталонный, т. е. остается неизменным, в то время как другой изменяется с целью наилучшей подгонки к первому.

В вершинах графа вычисляются значения признаков, чаще всего используют комплексные значения фильтров Габора или их упорядоченные наборы, вычисляющиеся в некоторой локальной области путем свертки значений яркости пикселей с фильтрами Габора [5]. Волны Габора дают значение для каждой волны во всех местах изображения. Таким образом, со стандартными параметрами дискретных изображений способ дает 80 (40 реальных и 40 воображаемых) значений в любой позиции пикселя. Ребра графа взвешиваются расстояниями между смежными вершинами. Различие (расстояние, дискриминационная характеристика) между двумя графами вычисляется при помощи ценовой функции деформации, учитывающей различие между значениями признаков, вычисленными в вершинах, и степень деформации ребер графа [4].

Деформация графа происходит путем смещения каждой из его вершин на некоторое расстояние в определенных направлениях относительно ее исходного местоположения и выбора такой ее позиции, при которой разница между значениями признаков в вершине деформируемого графа и соответствующей ей вершине эталонного графа будет минимальной. Данная операция выполняется поочередно для всех вершин графа до тех пор, пока не будет достигнуто наименьшее суммарное различие между признаками деформируемого и эталонного графов. Значение ценовой функции деформации при таком положении деформируемого графа и будет являться мерой различия между входным изображением лица и эталонным графом. Данная процедура деформации

должна выполняться для всех эталонных лиц, заложенных в базу данных системы. Результат распознавания системы – эталон с наилучшим значением ценовой функции [4]. На рис. 1 приведен пример деформации графа.

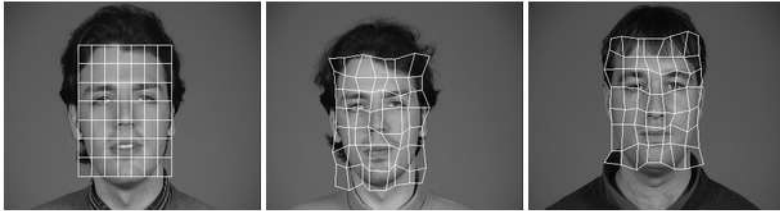


Рис. 1. Пример деформации графа в виде регулярной решетки

Эффективность распознавания при наличии различных эмоциональных выражений и изменении ракурса лица до 15 градусов составляет 90...95 %.

Достоинства метода гибкого сравнения на графах [4]:

- высокая точность распознавания;
- устойчивость к смене ракурса, мимике.

Недостатки [4]:

- высокая вычислительная сложность процедуры распознавания;
- низкая технологичность при запоминании новых эталонов;
- линейная зависимость времени работы от размера базы данных.

Алгоритм Виолы–Джонса

Алгоритм был разработан в 2001 г. П. Виолой и М. Джонсом. Данный метод используется для поиска объекта на изображении в реальном времени и при этом обладает очень низкой вероятностью ложного срабатывания [1].

Алгоритм Виолы–Джонса использует принципы:

- интегральное представление изображений;
- признаки Хаара;
- алгоритм усиления классификаторов;
- каскадная структура классификаторов.

Интегральное представление изображений

Интегральное представление позволяет быстро рассчитывать суммарную яркость произвольного прямоугольника на изображении, при этом время расчета не зависит от площади прямоугольника. Оно представляет собой матрицу, совпадающую по размерам с исходным изображением. В каждом ее элементе хранится сумма интенсивностей всех пикселей, находящихся левее и

выше данного элемента. Элементы матрицы рассчитываются по следующей формуле [12]:

$$I(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} i(x', y'),$$

где $I(x, y)$ – значение точки (x, y) интегрального изображения; $i(x, y)$ – значение интенсивности исходного изображения. На основе применения интегрального представления изображения вычисление признаков одинакового вида происходит за одинаковое время, но с разными геометрическими параметрами [6].

Каждый элемент матрицы $I(x, y)$ представляется в виде суммы пикселей в прямоугольнике от $i(0, 0)$ до $i(x, y)$, т. е. значение каждого элемента $I(x, y)$ равно сумме значений всех пикселей левее и выше данного пикселя $i(x, y)$. Расчет матрицы занимает линейное время, пропорциональное числу пикселей в изображении, и его можно выполнять по формуле [6]:

$$I(x, y) = i(x, y) - I(x-1, y-1) + I(x, y-1) + I(x-1, y).$$

Хаар-подобные характеристики

Хаар-подобные характеристики являются результатом сравнения яркостей в двух прямоугольных областях изображения.

В алгоритме Виолы и Джонса при обучении классификаторов для описания объектов используется семейство признаков Хаара (рис. 2), потому что они позволяют описать характерные особенности объектов, связанных с перепадами яркости [6]. Например, с помощью признаков Хаара легко отразить факт, что на изображении лица человека область глаз темнее области носа.

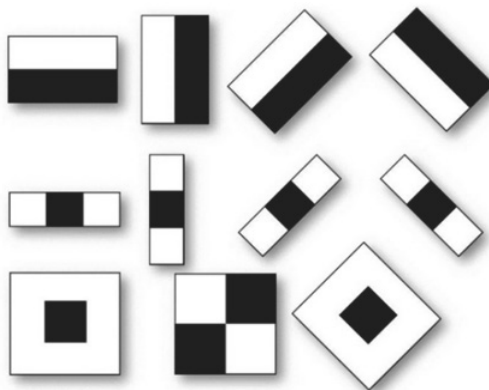


Рис. 2. Прimitives признаков Хаара

Значение признаков Хаара вычисляется как разность сумм пикселей областей изображения внутри черных и белых прямоугольников равного размера.

Обучение классификаторов с помощью AdaBoost

В методе Виолы и Джонса в качестве обучающего алгоритма используется алгоритм AdaBoost.

AdaBoost – алгоритм машинного обучения, предложенный Й. Фройндом и Р. Шапиром. В ходе выполнения алгоритма формируется сложный классификатор, который состоит из набора простых. AdaBoost является алгоритмом адаптивного бустинга. Каждый следующий классификатор строится по объектам, которые плохо классифицируются предыдущими классификаторами [6].

В результате работы алгоритма бустинга на каждой итерации формируется простой классификатор вида [6]:

$$h_j(z) = \begin{cases} 1, & \text{если } p_j f_j(z) < p_j \theta_j, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где p_i показывает направление знака неравенства; θ_j – значение порога; $f_j(z)$ – вычисленное значение признака; z – окно изображения размером 24×24 пикселей. Полученный классификатор имеет минимальную ошибку по отношению к текущим значениям весов, которые задействованы в процедуре обучения для определения ошибки.

Каскадная структура классификаторов

Каскадная структура (рис. 3) повышает скорость обнаружения, фокусируя свою работу на наиболее информативных областях изображения.

Каскад состоит из слоев, которые представляют собой классификаторы, обученные с помощью процедуры бустинга [6].

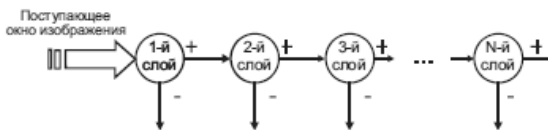


Рис. 3. Структура каскадного детектора

Достоинства алгоритма Виолы–Джонса [1]:

- высокая точность распознавания;
- низкий процент ложных срабатываний;
- низкое влияние мимики на распознавание лиц.

Недостатки данного метода [1]: при угле наклона больше 30° вероятность обнаружения лица резко падает.

В связи с выявленным недостатком данный метод не подходит под требования современных наблюдательных систем.

Метод опорных векторов

Метод опорных векторов, или SVM (от англ. support vector machines), – линейный алгоритм, который используется в задачах классификации и регрессии. Метод имеет широкое применение на практике и решает линейные и нелинейные задачи [8].

Суть алгоритма – найти линию или гиперплоскость, разделяющую данные на классы.

Метод опорных векторов применяется для снижения размерности пространства признаков, не приводя к существенной потере информативности тренировочного набора объектов [8].

Рассмотрим следующий пример. Имеется набор данных (рис. 4), которые необходимо классифицировать и отделить квадраты от кругов (например, положительное и отрицательное). Основная цель в поставленной задаче – найти «идеальную» линию, которая разделит эти два класса.



Рис. 4. Набор данных

Исходя из рисунка можно заметить, что нет одной уникальной линии, которая бы решала поставленную задачу: можно подобрать бесконечное множество таких линий, которые могут разделить эти два класса.

На рис. 5 приведены два варианта разделения на классы. Возникает вопрос: какая из двух линий (светлая или темная) лучше всего разделяет два класса и подходит под описание «идеальной»?

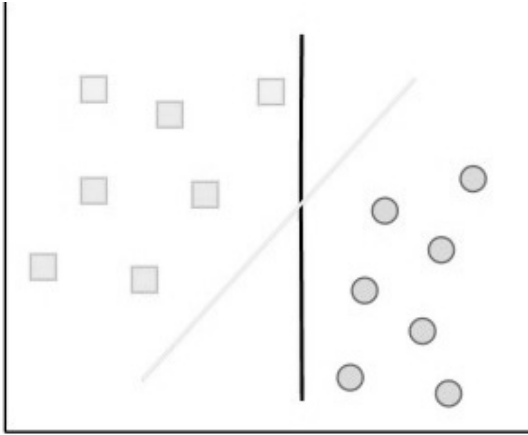


Рис. 5. Варианты разделения на классы

В данном примере светлая линия разделяет и классифицирует два класса лучше, чем темная. Темная линия расположена слишком близко к классу квадратов. Несмотря на то что она верно классифицировала все объекты текущего набора данных, она не будет генерализованной, не будет также хорошо разграничивать незнакомый набор данных. Задача нахождения генерализованной линии, разделяющей два класса, является одной из основных задач в машинном обучении.

Рассмотрим, как метод опорных векторов находит лучшую линию. Алгоритм устроен таким образом, что он ищет точки на графике, расположенные непосредственно к линии разделения ближе всего. Данные точки называются опорными векторами. Затем алгоритм рассчитывает расстояние между опорными векторами и разделяющей плоскостью. Это расстояние называется зазором. Главная цель алгоритма – максимизировать расстояние зазора. Лучшей гиперплоскостью считается такая гиперплоскость, для которой этот зазор является максимально большим [8].

Изначально SVM – это линейный классификатор, т. е. он может решать только линейно разделимые задачи. Однако если применить нелинейное ядро, то можно отобразить исходные данные в пространство большей размерности, где может существовать оптимальная разделяющая гиперплоскость.

Гиперплоскость – это $(n - 1)$ -мерная подплоскость в n -мерном евклидовом пространстве, которая разделяет пространство на две отдельные части.

Преимущества метода:

- наиболее быстрый метод нахождения решающих функций;
- метод сводится к решению задачи квадратичного программирования в выпуклой области, которая всегда имеет единственное решение;
- метод находит разделяющую полосу максимальной ширины, что позволяет в дальнейшем осуществлять более уверенную классификацию.

Недостатки рассмотренного метода:

- метод чувствителен к шумам и стандартизации данных;
- не существует общего подхода к автоматическому выбору ядра в случае линейной неразделимости классов.

Сверточная нейронная сеть

Сверточная нейронная сеть (от англ. convolutional neural network, CNN) – специальная архитектура искусственных нейронных сетей, которая предложена Яном Лекуном в 1988 году и нацелена на эффективное распознавание изображений, входит в состав технологий глубокого обучения.

Сверточная нейронная сеть использует некоторые особенности зрительной коры, в которой были открыты так называемые простые клетки, реагирующие на прямые линии под разными углами, и сложные клетки, реакция которых связана с активацией определенного набора простых клеток. Таким образом, идея сверточных нейронных сетей заключается в чередовании сверточных слоев и субдискретизирующих слоев [9].

Структура сети является однонаправленной (без обратных связей), многослойной. Для обучения используются стандартные методы, чаще всего метод обратного распространения ошибки. Функция активации нейронов (передаточная функция) – любая, по выбору исследователя [9].

Название архитектура сети получила из-за наличия операции свертки, по которой каждый фрагмент изображения умножается на матрицу (ядро) свертки поэлементно, а результат суммируется и записывается в аналогичную позицию выходного изображения [10].

Достоинства СНС:

- точность распознавания более 90 %;
- устойчивость к шумам входных данных.

Недостатки данного метода:

- трудная реализация;
- переобучение при добавлении эталонного лица в базу данных.

Таким образом, в результате анализа алгоритмов распознавания лиц для каждого из алгоритмов выявлены достоинства и недостатки, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Достоинства и недостатки алгоритмов распознавания лиц

Алгоритм	Достоинства	Недостатки
Метод главных компонент	Хранение и поиск изображений в больших БД	Высокие требования к условиям съемки
Линейный дискриминантный анализ	Точность распознавания более 94 %;	Не известно влияние ракурса
Метод гибкого сравнения на графах	Точность распознавания 90...95 %; устойчивость к смене ракурса, мимике	Вычислительная сложность; зависимость времени работы от размера базы данных
Алгоритм Виолы–Джонса	Точность распознавания более 90 %; низкий процент ложных срабатываний; низкое влияние мимики	При угле наклона более 30° вероятность обнаружения лица ухудшается
Метод опорных векторов	Нахождение решающих функций; классификация	Чувствителен к шумам и стандартизации данных
Сверточные нейронные сети	Точность распознавания более 90 %; устойчивость к шумам входных данных	Трудная реализация; переобучение при добавлении эталонного лица в базе данных

Таким образом, для дальнейшего исследования были взяты следующие алгоритмы: метод гибкого сравнения на графах, метод опорных векторов и сверточные нейронные сети.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим основные характеристики изображения, которые влияют на качество распознавания лиц.

Разрешение – величина, определяющая количество точек (элементов растрового изображения) на единицу площади (или единицу длины).

Шум – дефект изображения, вносимый фотосенсорами и электроникой устройств, которые их используют (цифровой фотоаппарат, теле-/видеокамеры и т. п.) вследствие несовершенства технологий, а также фотонной природы света.

Условия освещенности – использование естественного и/или искусственного освещения.

Ракурс – отклонение положения лица в градусах относительно положения анфас.

Мимика – наличие эмоций на лице.

Помехи – наличие бороды, усов, очков, шапок и т. п.

В результате анализа методов распознавания лиц и выявления характеристик входных данных определена зависимость характеристик от алгоритмов распознавания лиц. Данные показатели приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость алгоритмов распознавания лиц от ограничений характеристик

Методы	Освещенность	Ракурс	Мимика	Помехи	Шум	Качество изображения
Метод главных компонент	+	+	+	+	–	+
Линейный дискриминантный анализ	–	+	–	–	–	?
Метод гибкого сравнения на графах	?	–	–	?	?	?
Метод Виолы–Джонса	?	–	–	?	?	?
Сверточные нейронные сети	–	–	+	?	–	+
Метод опорных векторов	+	–	–	?	+	?
Метод главных компонент	+	+	+	+	–	+

Условные обозначения:

- «+» – есть зависимость;
- «–» – нет зависимости;
- «?» – зависимость не установлена.

4. ШКАЛЫ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для оценивания суммарных входных параметров необходимо определить единую шкалу для количественных характеристик алгоритмов распознавания лиц (будет сформирована позже). В рамках данной статьи определены шкалы для каждого характеристики (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Шкалы для характеристик изображений

Характеристика	Шкала
Освещенность	От нуля до 100 %
Ракурс	От -30° до 30°
Мимика	Сердитый, спокойный, грустный, испытывающий отвращение, напуганный, веселый, счастливый, удивленный
Помехи	Бороды, усы, очки, шапка
Шум	Незначительное зашумление, среднее зашумление, сильное зашумление
Качество изображения	От 300×300 до 4000×4000 пикселей

В дальнейшем будет разработана единая шкала для определения входных характеристик изображений.

5. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

Рассмотрим основные параметры, которые позволяют оценить точность метода.

F -мера – характеристика, которая позволяет дать оценку одновременно по точности и полноте [11]:

$$F_{measure} = \frac{1}{\alpha \frac{1}{Precision} + (1-\alpha) \frac{1}{Recall}}, \quad \alpha \in [0,1].$$

Коэффициент α задает соотношение весов точности и полноты. Когда $\alpha = 0.5$, F -мера придает одинаковый вес обеим характеристикам. Такая F -мера называется сбалансированной, или F_1 [11]:

$$F_1 = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall}.$$

Precision (точность) показывает, сколько из предсказанных позитивных объектов оказались действительно позитивными [11]:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}.$$

Recall (полнота) показывает, сколько от общего числа реальных позитивных объектов было предсказано как позитивный класс [11]:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}.$$

TP – истинно положительное решение; FP – ложноположительное решение; TN – истинно отрицательное решение; FN – ложноотрицательное решение [11].

Accuracy – доля правильных ответов алгоритма [11]:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}.$$

Confusion matrix (матрица неточностей, ошибок) – матрица размера N на N , где N – количество классов. Столбцы этой матрицы резервируются за экспертными решениями, а строки – за решениями классификатора [12].

Одним из способов оценки модели в целом, не привязываясь к конкретному параметру, является AUC-ROC (или ROC AUC) – площадь (Area Under Curve) под кривой ошибок (Receiver Operating Characteristic curve). Данная кривая представляет собой линию от (0,0) до (1,1) в координатах True Positive Rate (TPR) и False Positive Rate (FPR) [12]:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} ;$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + NN} .$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были изучены различные алгоритмы распознавания лиц, из них для дальнейшего исследования выбраны сверточные нейронные сети, метод гибкого сравнения на графах и метод опорных векторов.

Были определены характеристики изображения. Изучено их влияние на качество распознавания. Выявлены шкалы для каждой характеристики. В дальнейшем планируется разработать единую шкалу для оценки качества алгоритмов.

Также были изучены критерии оценки алгоритмов распознавания лиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мищенкова Е.С. Сравнительный анализ алгоритмов распознавания лиц // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 9, Исследования молодых ученых. – 2013. – № 11. – С. 74–76.

2. Гончаров А.В., Каркищенко А.Н. Влияние освещенности на качество распознавания фронтальных лиц // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 4 (81). – С. 88–92.

3. Фан Н.Х., Буй Т.Т.Ч., Спицын В.Г. Распознавание жестов на видеопоследовательности в режиме реального времени на основе применения метода Виолы–Джонса, алгоритма SAMShift, вейвлет-преобразования и метода главных компонент // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – Т. 23, № 2. – С. 102–111.

4. Арсентьев Д.А., Бирюкова Т.С. Метод гибкого сравнения на графах как алгоритм распознавания образов // Вестник МГУП имени Ивана Федорова. – 2015. – № 6. – С. 74–75.

5. Rogozin O.V., Kladov S.A. Сравнительный анализ алгоритмов распознавания лиц в задаче визуальной идентификации // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 6 (18). – DOI: 10.18698/2308-6033-2013-6-818.

6. Буй Т.Т.Ч., Фан Н.Х., Спицын В.Г. Распознавание лиц на основе применения метода Виолы–Джонса, вейвлет-преобразования и метода главных

компонент // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 5. – С. 54–59.

7. *Усилин С.А.* Алгоритмическое развитие виола–джонсовских детекторов для решения прикладных задач распознавания изображений: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2017. – 149 с.

8. *Самаль Д.И., Фролов И.И.* Алгоритм подготовки обучающей выборки с использованием 3D-моделирования лиц // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 4. – С. 17–23.

9. *Тропченко А.А., Тропченко А.Ю.* Нейросетевые методы идентификации человека по изображению лица // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 10. – С. 31–36.

10. *Скопченко А.А., Дорофеев В.А.* Анализ методов распознавания лиц // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 22–23 марта 2016 г. – Томск, 2016. – С. 176–178.

11. Оценка точности классификатора [Электронный ресурс]. – <http://www.michurin.net/computer-science/precision-and-recall.html> (дата обращения: 15.03.2019).

12. Оценка классификатора [Электронный ресурс]. – <http://bazhenov.me/blog/2012/07/21/classification-performance-evaluation.html> (дата обращения: 15.03.2019).

Левчук София Александровна, студент первого курса магистратуры факультета автоматки и вычислительной техники НГТУ. E-mail: sonya.levchuk@gmail.com

Якименко Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики НГТУ, научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Область научных интересов: информационные технологии, компьютерные системы, компьютерное моделирование, параллельные вычисления. Автор более 30 научных работ. E-mail: yakimenko@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-40-58

Study of the characteristics of the algorithms for facial recognition*

S.A. Levchuk¹, A.A. Yakimenko²

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the department of computer engineering. E-mail: sonya.levchuk@gmail.com

²Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, candidate of Technical Sciences, associate professor of the computer engineering department. E-mail: yakimenko@corp.nstu.ru

Security has become a major concern around the world, and biometric systems such as face detection and recognition systems have been developed to manage security issues and mitigate risks. Currently, there are a large number of facial recognition algorithms that all have their advantages and disadvantages. Each of them is based on its own specific input data requirements. For example, the image quality, the number of pixels, illumination, natural light, not natural light, the presence of noise, noise. The main difficulty of face recognition is the dependence of the quality of the result of human identification from the image of the face from the angle, position, lighting conditions, etc. In this paper it is proposed to develop a generalized model that takes into account the relationship of the input characteristics, in relation to the algorithm, which will output the expected quality of the result of the algorithm at specified parameters. In this regard, the algorithms of facial recognition are identified, as well as a brief description of the selected methods of facial recognition, which will be used in further research. Face recognition algorithms were used for the analysis: principal component Method; linear discriminant analysis; flexible comparison method on graphs; Viola-Jones Algorithm; Convolutional neural networks; support vector machine. The properties of the image input data are determined: illumination, angle, facial expressions, noise, image quality. The scales for image characteristics are revealed, in the future it is planned to develop a single scale for assessing the quality of algorithms. Also this article describes the criteria for assessing the quality of facial recognition: F-measure, Precision, Recall, Accuracy, Confusion matrix, AUC-ROC. At the end of the article the results are presented.

Keywords: Face recognition algorithms, Principal component analysis, Linear discriminant analysis, Flexible graph comparison method, Viola-Jones algorithm, Support vector machine, Convolutional neural networks, The scale of characteristics, and Evaluation criteria

REFERENCES

1. Mishchenkova E.S. Sravnitel'nyi analiz algoritmov raspoznavaniya lits [Comparative analysis of algorithms for faces recognition]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 9, Issledovaniya molodykh uchenykh – Science Journal of Volgograd State University. Young Scientists' Research*, 2013, no. 11, pp. 74–76.

* Received 20 November 2018.

2. Goncharov A.V., Karkishchenko A.N. Vliyanie osveshchennosti na kachestvo raspoznavaniya frontal'nykh lits [Influence of illumination on a quality of frontal face recognition]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2008, no. 4 (81), pp. 88–92.
3. Phan N.H., Bui T.T.T., Spitsyn V.G. Raspoznavanie zhestov na video-posledovatel'nosti v rezhime real'nogo vremeni na osnove primeneniya metoda Violy–Dzhonsa, algoritma CAMShift, veivlet-preobrazovaniya i metoda glavnykh component [Gesture recognition on video sequences in real time on the basis of the method of Viola-Jones, CAMShift algorithm, wavelet transform and the method of principal components]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta – Tomsk State University Journal*, 2013, vol. 23, no. 2, pp. 102–111.
4. Arsentev D.A., Biryukova T.S. Metod gibkogo sravneniya na grafakh kak algoritm raspoznavaniya obrazov [Method of flexible comparison in graphs as algorithm for pattern recognition]. *Vestnik MGUP imeni Ivana Fedorova – Vestnik MGUP by Ivan Fedorov*, 2015, no. 6, pp. 74–75.
5. Rogozin O.V., Kladvov S.A. Sravnitel'nyi analiz algoritmov raspoznavaniya lits v zadache vizual'noi identifikatsii [Comparative analysis of face recognition algorithms in problem of visual identification]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii – Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-6-818.
6. Bui T.T.T., Fan N.H., Spitsyn V.G. Raspoznavanie lits na osnove primeneniya metoda Violy–Dzhonsa, veivlet-preobrazovaniya i metoda glavnykh komponent [Face recognition based on the application of the method of Viola-Jones, the wavelet transform and principal component analysis]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 5, pp. 54–59.
7. Usilin S.A. *Algoritmicheskoe razvitie viola–dzhonsovskikh detektorov dlya resheniya prikladnykh zadach raspoznavaniya izobrazhenii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Enhanced algorithmic development Viola-Jones detectors for solving applied tasks of recognition of images. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2017. 149 p.
8. Samal D.I., Frolov I.I. Algoritm podgotovki obuchayushchei vyborki s ispol'zovaniem 3D-modelirovaniya lits [Algorithm of preparation of the training sample using 3d-face modeling]. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika – System analysis and applied information science*, 2016, no. 4, pp. 17–23.
9. Tropchenko A.A., Tropchenko A.Yu. Neurosetevye metody identifikatsii cheloveka po izobrazheniyu litsa [Neural network methods of person identification by face image]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*, 2012, vol. 55, no. 10, pp. 31–36.

10. Skopchenko A.A., Dorofeev V.A. [Analysis of methods of face recognition]. *Tekhnologii Microsoft v teorii i praktike programmirovaniya: sbornik trudov XIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [XIII All-Russian scientific-practical conference "Technologies Microsoft in the theory and practice of programming"], Tomsk, 22–23 March 2016, pp. 176–178. (In Russian).

11. *Otsenka tochnosti klassifikatora* [To evaluate the accuracy of the classifier]. Available at: <http://www.michurin.net/computer-science/precision-and-recall.html> (accessed 15.03.2019).

12. *Otsenka klassifikatora* [Assessment of the classifier]. Available at: <http://bazhenov.me/blog/2012/07/21/classification-performance-evaluation.html> (accessed 15.03.2019).

Для цитирования:

Левчук С.А., Якименко А.А. Исследование характеристик алгоритмов распознавания лиц // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 40–58. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-40-58.

For citation:

Levchuk S.A., Yakimenko A.A. Issledovanie kharakteristik algoritmov raspoznavaniya lits [Study of the characteristics of the algorithms for facial recognition]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 40–58. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-40-58.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОГО ПОИСКА*

А.В. ЛЕЩЕНКО

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент факультета автоматики и вычислительной техники. E-mail: siberianhunter@gmail.com

В статье обзревается некоторые популярные алгоритмы нечеткого поиска (approximate string matching, fuzzy search). Объясняются основные понятия, на которых основаны алгоритмы. С помощью псевдокода и схем отображается их формальная сторона. Рассматривается реализация одного из приведенных алгоритмов для объединенного решения агрегации digital-каналов, маршрутизации клиентов и геймификации рабочего пространства оператора сотовой связи. Программа, которая использует алгоритм нечеткого поиска и организует рабочее пространство оператора, была написана на хакатоне (соревнование по программированию), который состоялся на базе научной библиотеки НГТУ по заказу компании «Мегафон» 5–7 октября 2018 года командой Infinite Capacity. Программа создана на основе обширного стека технологий: вся серверная часть написана на JavaScript, алгоритм нечеткого поиска также представлен фреймворком elasticsearch для JavaScript(NoteJS), базы данных реализованы на PostgreSQL, сообщение с клиентами сотового оператора организовано с использованием ботов для социальных сетей(VK BOT api, TG BOT api). Ссылка на открытый код программы: <https://github.com/JackMog/HKTgit>. Программа с помощью объединения каналов связи из социальных сетей предоставляла информацию о клиентах оператору сотовой связи, и на основе имеющейся базы данных ответов для клиента алгоритм (fuzzy search) подбирал наиболее подходящие ответы, из которых оператор выбирал соответствующий его требованиям. Основное внимание статьи уделено алгоритму fuzzy search. Для лучшего понимания алгоритма предоставлены его формальная и схематическая схемы. Также в литературных источниках можно найти руководство к фреймворку elasticsearch, который основан на исходном алгоритме.

Ключевые слова: расстояние Левенштейна, редакционное расстояние, дистанция редактирования, алгоритм нечеткой логики, алгоритм нечеткого поиска, fuzzy search, алгоритм Нидлмана–Вунша, расстояние Дамерау–Левенштейна, approximate string matching

* Статья получена 24 октября 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим определение алгоритма нечеткого поиска. Нечеткий поиск – это поиск информации, при котором выполняется сопоставление информации заданному образцу поиска или близкому к этому образцу значению. Алгоритмы нечеткого поиска используются в большинстве современных поисковых систем (например, для проверки орфографии) [1].

Также не помешает дать формальное определение алгоритма. Пусть Σ – конечное множество (алфавит) размера $|\Sigma| = \sigma$.

Пусть $T \in \Sigma^*$ – текст длиной $n = |T|$.

Пусть $P \in \Sigma^*$ – образец длиной $m = |P|$.

Пусть $k \in \mathbb{R}$ – максимально разрешенное количество ошибок.

Пусть $d : \Sigma^* \times \Sigma^* \rightarrow \mathbb{R}$ – функция расстояния.

Тогда

Задача: даны T, P, k и $d(\cdot)$, которые возвращают множества всех позиций текста j таких, что существует i такое, что $d(P, T_{i..j}) \leq k$ [2].

A Guided Tour to Approximate String Matching

39

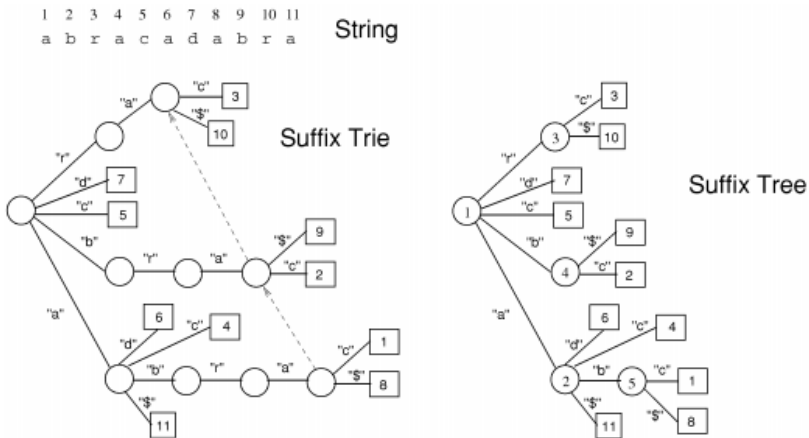


Рис. 1. Дерево окончаний для примера строки, \$ – специальный символ для обозначения конца текста. Внутренние узлы дерева окончаний показывают позицию символа для нахождения в строке [3]

В упрощенном виде задачу алгоритма можно описать так: по заданному слову найти в тексте с размером n все слова, совпадающие с этим словом (или начинающиеся с этого слова), учитывая k возможных различий (неточностей).

После рассмотрения определения алгоритма нечеткого поиска рассмотрим основные необходимые понятия и несколько видов алгоритма с их характеристиками, далее будут приведены примеры практической реализации алгоритма.

1. РАССТОЯНИЕ ЛЕВЕНШТЕЙНА (LEVENSHTEIN DISTANCE)

Расстояние Левенштейна (Levenshtein distance) между двумя строками в теории информации и компьютерной лингвистике – это минимальное количество операций вставки одного символа, удаления одного символа и замены одного символа на другой, необходимых для превращения одной строки в другую.

Рекуррентная формула, описывающая расстояние Левенштейна:

$$d(S_1, S_2) = D(M, N) \text{ , где}$$

$$D(i, j) = \begin{cases} 0 & ; i = 0, j = 0 \\ i & ; j = 0, i > 0 \\ j & ; i = 0, j > 0 \\ D(i - 1, j - 1) & ; S_1[i] = S_2[j] \\ \min (& \\ \quad D(i, j - 1) + insertCost & \\ \quad D(i - 1, j) + deleteCost & ; j > 0, i > 0, S_1[i] \neq S_2[j] \\ \quad D(i - 1, j - 1) + replaceCost & \\) & \end{cases}$$

$\min(a, b, c)$ возвращает наименьший из аргументов.

Рис. 2. Описание расстояния Левенштейна

Элементы строк нумеруются с первого, как принято в математике, а не нулевого; S1 и S2 – две строки (длиной M и N соответственно) в некотором алфавите, где редакционное расстояние $d(S1, S2)$.

Свойства расстояния Левенштейна:

- 1) $d(S1, S2) \geq ||S1| - |S2||$
- 2) $d(S1, S2) \leq \max(|S1|, |S2|)$
- 3) $d(S1, S2) = 0 \Leftrightarrow S1 = S2$,

где $d(S1, S2)$ – расстояние Левенштейна между строками S1 и S2, а $|S|$ – длина строки S.

Также расстояние Левенштейна является метрикой.

2. ПРИМЕР 1: Алгоритм Вагнера–Фишера

Для нахождения кратчайшего расстояния необходимо вычислить матрицу D , используя вышеприведенную формулу. Ее можно вычислять как по строкам, так и по столбцам. Псевдокод алгоритма написан при произвольных ценах замен, вставок и удалений (важно помнить, что элементы нумеруются с первого). Псевдокод ниже решает простой частный случай, когда вставка символа, удаление символа и замена одного символа на другой стоят одинаково для любых символов [4, 5].

```
int levensteinInstruction(String s1, String s2, int In-
sertCost, int DeleteCost, int ReplaceCost):
    D[0][0] = 0
    for j = 1 to N
        D[0][j] = D[0][j - 1] + InsertCost
    for i = 1 to M
        D[i][0] = D[i - 1][0] + DeleteCost
        for j = 1 to N
            if S1[i] != S2[j]
                D[i][j] = min(D[i - 1][j] + DeleteCost,
                    D[i][j - 1] + InsertCost,
                    D[i - 1][j - 1] + ReplaceCost)
            else
                D[i][j] = D[i - 1][j - 1]
    return D[M][N]
```

3. ПРИМЕР 2: Метод динамического программирования Вагнера и Фишера

В методе динамического программирования последовательно, по предыдущим значениям, вычисляются расстояния между более длинными префиксами двух строк до получения окончательного результата. Опишем этот процесс более подробно.

Пусть $d_{i,j}$ есть расстояние между префиксами строк x и y , длины которых равны соответственно i и j , то есть

$$d_{i,j} = d(x(1, i), y(1, j))$$

Цену преобразования символа a в символ b обозначим через $w(a,b)$. Таким образом, $w(a,b)$ – это цена замены одного символа на другой, когда $a \neq b$, $w(a,\varepsilon)$ – цена удаления a , $w(\varepsilon, b)$ – цена вставки b . Заметим, что в случае, когда выполнены нижеследующие условия, d является расстоянием Левенштейна:

$$w(a, \varepsilon) = 1$$

$$w(\varepsilon, b) = 1$$

$$w(a, b) = 1, \text{ если } a \neq b,$$

$$w(a, b) = 0, \text{ если } a = b$$

В процессе вычислений значения $d_{i,j}$ записываются в массив $(m+1) \times (n+1)$, а вычисляются они с помощью следующего рекуррентного соотношения:

$$d_{i,j} = \min \{d_{i-1,j} + w(x_i, \varepsilon), d_{i,j-1} + w(\varepsilon, y_j), d_{i-1,j-1} + w(x_i, y_j)\}$$

Оно выводится следующим образом. Если предположить, что известна цена преобразования $x(1, i-1)$ в $y(1, j)$, то цену преобразования $x(1, i)$ в $y(1, j)$ мы получим, добавив к ней цену удаления x_i . Аналогично цену преобразования $x(1, i)$ в $y(1, j)$ можно получить, прибавив цену вставки y_j к цене преобразования $x(1, i)$ в $y(1, j-1)$. Наконец, зная цену преобразования $x(1, i-1)$ в $y(1, j-1)$, цену преобразования $x(1, i)$ в $y(1, j)$ мы получим, прибавив к ней цену замены x_i на y_j . Вспомним, что расстояние $d_{i,j}$ является минимальной ценой преобразования $x(1, j)$ в $y(1, j)$, поэтому из трех указанных выше операций надо выбрать самую дешевую.

Перед тем как начать вычислять $d_{i,j}$, надо установить граничные значения массива. Что касается первого столбца массива, то значение $d_{i,0}$ равно сумме цен удаления первых i символов x . Аналогично значения $d_{0,j}$ первой строки задаются суммой цен вставки первых j символов y . Итак, имеем следующее:

$$d_{0,0} = 0$$

$$d_{i,0} = \sum_{k=1}^i w(x_i, \varepsilon) \text{ для } 1 < i < m$$

$$d_{0,j} = \sum_{k=1}^j w(\varepsilon, j_k) \text{ для } 1 < j < n$$

Рис. 3. Префиксное расстояние

Для расстояния Левенштейна $d_{i,0} = i$ и $d_{0,j} = j$. Ниже приведен массив, полученный при вычислении расстояния Левенштейна между строками *preterit* и *zeitgeist*. Из него видно, что расстояние между этими строками, т. е. $d_{8,9}$, равно 6 [6].

Расстояние Левенштейна между строками preterit и zeitgeist

	j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i			z	e	i	t	g	e	i	s	t
0		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	p	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	r	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9
3	e	3	3	2	3	4	5	5	6	7	8
4	t	4	4	3	3	3	4	5	6	7	7
5	e	5	5	4	4	4	4	4	5	6	7
6	r	6	6	5	5	5	5	5	5	6	7
7	i	7	7	6	5	6	6	6	5	6	7
8	t	8	8	7	6	5	6	7	6	6	6

X_z	X_y
X_v	$D_{i,j}$

$$D_{ij} = \min(X_v + 1, X_y + 1, X_z + C_{\text{замены}})$$

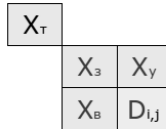
$$C_{\text{замены}} = \begin{cases} 1, & \text{если } S_1[i] \neq S_2[j] \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Рис. 4. Итоговый вывод формулы расчета расстояния Левенштейна

Конец примера.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА НЕЧЕТКОГО ПОИСКА В ELASTICSEARCH

Фреймворк, который был использован для создания программы, организующей рабочее пространство оператора сотовой связи – elasticsearch, основывается на такой метрике, как расстояние Дамерау–Левенштейна. Описание этой метрики представлено ниже.



$$D_{ij} = \min (X_e + 1, X_y + 1, X_z + C_{\text{замены}} \cdot X_m + C_{\text{транспозиции}})$$

$$C_{\text{замены}} = \begin{cases} 1, & \text{если } S_1[i] \neq S_2[j] \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$C_{\text{транспозиции}} = \begin{cases} 1, & \text{если } S_1[i] = S_2[j-1] \text{ и } S_1[i-1] = S_2[j] \\ \infty, & \text{иначе} \end{cases}$$

Рис. 5. Описание метрики Дамерау–Левенштейна

Чтобы вычислять такое расстояние, достаточно немного модифицировать алгоритм нахождения обычного расстояния Левенштейна следующим образом: хранить не две, а три последние строки матрицы, а также добавить соответствующее дополнительное условие: в случае обнаружения транспозиции при расчете расстояния также учитывать и ее стоимость.

Далее показана схема, представляющая работу алгоритма нечеткого поиска уже конкретно в elasticsearch [7, 10].

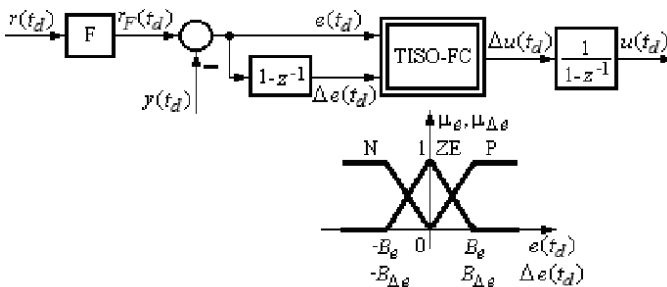


Рис. 6. Формальное схематическое отображение алгоритма нечеткого поиска

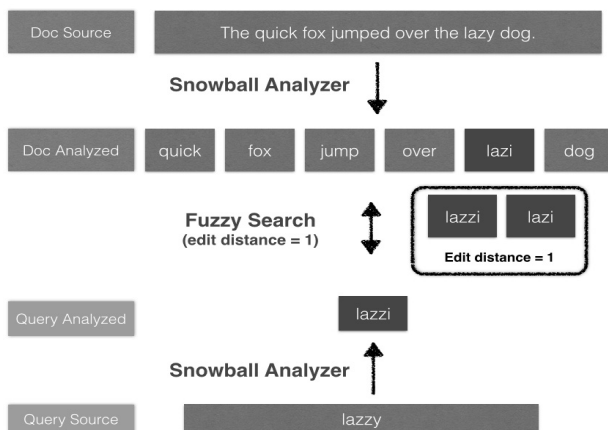


Рис. 7. Схематическое изображение алгоритма Fuzzy search

Из двух схем, указанных выше, можно сделать вывод о том, что эффективность алгоритмов нечеткого поиска напрямую зависит от редакционного расстояния (edit distance). Чем выше этот параметр, тем менее эффективен алгоритм [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритмы нечеткого поиска применяются в обширном спектре современных технологий. Практическое использование алгоритмов нечеткого поиска в реальных поисковых системах тесно связано с фонетическими алгоритмами, алгоритмами лексического стемминга – выделения базовой части у различных словоформ одного и того же слова (например, такую функциональность предоставляют Snowball и Яндекс mystem [8]), а также с ранжированием на основе статистической информации либо же с использованием сложных изощренных метрик.

Также существует множество неэффективных алгоритмов нечеткого поиска, которые лучше обходить стороной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мосалев П.М. Обзор методов нечеткого поиска текстовой информации // Вестник МГУП имени Ивана Федорова. – 2013. – № 2. – С. 87–91.

2. Indexing methods for approximate string matching / G. Navarro, R. Baeza-Yates, E. Sutinen, J. Tarhio // IEEE Data Engineering Bulletin. – 2001. – Vol. 24, N 4. – P. 19–27.
3. Navarro G. A guided tour to approximate string matching // ACM Computing Surveys. – 2001. – Vol. 33, N 1. – P. 31–88.
4. Задача о редакционном расстоянии, алгоритм Вагнера–Фишера [Электронный ресурс]. – URL: http://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Задача_о_редакционном_расстоянии,_алгоритм_Вагнера-Фишера (дата обращения: 13.03.2019).
5. Lowrance R., Wagner R.A. An extension of the string-to-string correction problem // Journal of the ACM. – 1975. – Vol. 22, N 2. – P. 177–183.
6. Метод динамического программирования Вагнера и Фишера [Электронный ресурс]. – URL: <http://algotlist.manual.ru/search/lcs/vagner.php> (дата обращения: 13.03.2019).
7. Cholakian A. How to use fuzzy searches in elasticsearch [Electronic resource]. – URL: www.elastic.co/blog/found-fuzzy-search (accessed: 13.03.2019).
8. Нечеткий поиск в тексте и словаре [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/post/114997/> (дата обращения: 13.03.2019).
9. Vernica R., Li C. Efficient top-k algorithms for fuzzy search in string collections // Proceedings of the First International Workshop on keyword search on structured data, 28 June 2009. – New York: ASM, 2009. – P. 9–14.
10. Cholakian A. A human-friendly tutorial for elasticsearch [Electronic resource]. – URL: <http://exploringelasticsearch.com> (accessed: 13.03.2019).

Лещенко Андрей Владимирович, студент факультета автоматике и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. E-mail: siberianhunger@gmail.com

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-59-69

Overview and practical implementation of fuzzy search algorithms*

A.V. Leshchenko

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.). E-mail: ucit@ucit.ru

Fuzzy search and approximate search algorithms were reviewed in this article. All the fundamental definitions, that helping to better understand the concept of fuzzy search are noted below. Also was shown how to practically implement them to set up a work flow for mobile network operator. Program that have been shown in the implementation, now available via github link <https://github.com/JackMor/HKTgit>. This program have been written by computer programmers team called “Infinite Capacity” on 2018 hackathon for Megafon, that have been placed in The library of Novosibirsk State Technical University . Wide spectrum of technology was used to create this program: JavaScript(NodeJS) for server and also fuzzy search was implemented with elasticsearch(JS framework), PostgreSQL for database management, VK BOT API and TG BOT API for the social media interaction. For better understanding of approximate search provided formal and schematic representations of the algorithm. Also you can find pseudocode explanation of Needleman–Wunsch algorithm below. Damerau–Levenshtein distance presented with the exact example of string approximate coparison. References are containing full guide to elasticsearch framework user, that might help to understand the conception of fuzzy search too. In the end of the article you can find a conclusion with the analysis of the future for approximate search algorithms.

Keywords: Approximate string matching, fuzzy search, Damerau–Levenshtein distance, Needleman–Wunsch algorithm, elasticsearch, Levenshtein distance, edit distance

REFERENCES

1. Mosalev P.M. Obzor metodov nechetkogo poiska tekstovoi informatsii [An overview of fuzzy text search methods]. *Vestnik MGUP imeni Ivana Fedorova – Vestnik MGUP by Ivan Fedorov*, 2013, no. 2, pp. 87–91.
2. Navarro G., Baeza-Yates R., Sutinen E., Tarhio J. Indexing methods for approximate string matching. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 2001, vol. 24, no. 4, pp. 19–27.
3. Navarro G. A guided tour to approximate string matching. *ACM Computing Surveys*, 2001, vol. 33, no. 1, pp. 31–88.
4. *Zadacha o redaktsionnom rasstoyanii, algoritm Vagnera-Fishera* [The editorial distance problem, Wagner-Fisher algorithm]. Available at: http://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Задача_о_редакционном_расстоянии,_алгоритм_Вагнера-Фишера (accessed 13.03.2019).

* Received 24 October 2018.

5. Lowrance R., Wagner R.A. An extension of the string-to-string correction problem. *Journal of the ACM*, 1975, vol. 22, no. 2, pp. 177–183.
6. *Metod dinamičeskogo programirovaniya Vagnera i Fishera* [Wagner and Fisher dynamic programming method]. Available at: <http://algotlist.manual.ru/search/lcs/vagner.php> (accessed 13.03.2019).
7. Cholakian A. *How to use fuzzy searches in elasticsearch*. Available at: www.elastic.co/blog/found-fuzzy-search (accessed 13.03.2019).
8. *Nechetkii poisk v tekste i slovare* [Fuzzy text and dictionary search]. Available at: <https://habr.com/post/114997/> (accessed 13.03.2019).
9. Vernica R., Li C. Efficient top-k algorithms for fuzzy search in string collections. *Proceedings of the First International Workshop on keyword search on structured data*, 28 June 2009. New York, ASM, 2009, pp. 9–14.
10. Cholakian A. *A human-friendly tutorial for elasticsearch*. Available at: <http://exploringelasticsearch.com> (accessed 13.03.2019).

Для цитирования:

Лещенко А.В. Обзор и практическое применение алгоритмов нечеткого поиска // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 59–69. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-59-69.

For citation:

Leshchenko A.V. *Obzor i praktičeskoe primenenie algoritmov nechetkogo poiska* [Overview and practical implementation of fuzzy search algorithms]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 59–69. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-59-69.

АНАЛИЗ МЕТОДА СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ КАРТИН ВОЛНОВОГО ПОЛЯ*

А.И. МАКФУЗОВА¹, А.А. ЯКИМЕНКО²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант. E-mail: anya-makfuzova@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доцент, кандидат технических наук. E-mail: yakimenko@corp.nstu.ru.

Статья написана в рамках исследования нейронной сети неоконгитрон для распознавания геолого-физических моделей сред (ГФМС). Задача распознавания предполагает интеллектуальную обработку полученной информации, что представляет определенные сложности: выделение признаков, ресурсоемкость, быстрота и качество. Процедура распознавания применяется к изображению и обеспечивает его преобразование. Последующая обработка такого описания позволяет отнести исходное изображение к одному из нескольких классов. Одним из важных этапов в системе распознавания изображений является его сегментация. Сегментация разделяет изображение на множество непересекающихся областей, которые визуальнo различаются, равномерны и значимы в отношении нескольких качеств или обработанных свойств. Это позволяет упростить последующий анализ однородных областей изображения, их яркостных и геометрических характеристик. Результатом является множество сегментов (областей), полностью покрывающих исходное изображение. В статье приводится анализ метода сегментации картины волнового поля, а именно обнаружение границ на перепаде яркости. Для поиска границ сегментов применяется аппарат дифференциальной геометрии: фильтры Робертса, Превитта, Собеля и алгоритм Канны. В данной работе производится сегментация изображения волнового поля при помощи каждого фильтра. На этапе исследований вышеописанных фильтров целесообразно использовать пакет прикладных программ MATLAB, который используется для решения различных технических задач, в том числе и для цифровой обработки изображения. С помощью функций пакета Image Processing Toolbox производится поиск и вычисление признаков объектов. В статье рассмотрены алгоритмы работы каждого фильтра, выявлены основные достоинства и недостатки.

Ключевые слова: распознавание изображения, сегментация изображения, обнаружение границ, неоконгитрон, фильтр Габора, фильтр Превитта, фильтр Собеля, алгоритм Канны

* Статья получена 26 сентября 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых и совершенствование существующих методов решения обратных задач и обработки геофизических данных является актуальной задачей в геофизике и экономике. Под обратной задачей понимается задача определения строения и параметров исследуемой среды по имеющейся картине распространения волнового поля [1].

Для решения задачи определения положения и геометрических свойств объектов предлагается использование нейронных сетей, зарекомендовавших себя в различных сферах – от распознавания изображений до обработки временных рядов. Использование правильно обученных нейросетевых структур позволит получить модели, требующие малых временных затрат на обработку и позволяющие довольно точно определить местоположение и форму искомого включения (далее рассматриваем на примере кавернозных сред) – каверны.

В настоящее время существует нейронная сеть LSTM для определения структуры исследуемой ГФМС, заданной в виде двумерного изображения [2]. На изображении представлена однородная среда с имеющейся в произвольной точке каверной – полостью круглой либо овальной формы с произвольными размерами [2]. Это и является основным недостатком нейронной сети.

В нашем исследовании предлагается распознавать не всю ГФМС, а только объекты геолого-физической модели среды. Для выполнения задачи распознавания объектов была применена искусственная нейронная сеть неоконгитрон, так как ее способность к распознаванию в идеальном случае не чувствительна к сдвигам, изменению размеров или другим искажениям. Задача распознавания образов заключается в разбиении многомерного пространства на области, соответствующие заданным категориям, или классам.

Одной из важных задач в системе распознавания объектов на изображении является задача сегментации изображения. Сегментация разделяет изображение на множество непересекающихся областей, которые визуальнo различаются, равномерны и значимы в отношении нескольких качеств или обработанных свойств [3]. Ошибочное распознавание сегментов на изображении отражается на его качестве.

Метод поиска границ на перепаде яркости – основное средство для качественной сегментации изображения [4]. Границы – это кривые на изображении, вдоль которых происходит резкое изменение яркости или ее производных по пространственным переменным. Модель ГФМС заранее неизвестной формы яркости и яркости фона, поэтому по различимому перепаду яркости можно судить о ее наличии на изображении. В данной работе для поиска границ сегментов применяются дифференциальные методы: фильтры Собеля, Превитта, Робертса и алгоритм Канны.

1. МЕТОДЫ ПОИСКА ГРАНИЦ НА ПЕРЕПАДЕ ЯРКОСТИ

Методы поиска границ хорошо разработаны для полутоновых изображений. Полутоновое изображение рассматривается как функция двух переменных (x и y), и предполагается, что границы регионов соответствуют максимумам градиента этой функции. Для их поиска применяются дифференциальные методы, позволяющие найти дискретное приближение двумерного градиента [5].

1.1. Фильтр Собеля

Фильтр Собеля вычисляет направление наибольшего увеличения яркости изображения в каждой точке [6]. Фильтр Собеля построен на вычислении сверток исходного изображения с ядрами G_X и G_Y , обеспечивающими вычисление первых производных по направлениям:

$$G_X = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times A, \quad G_Y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \times A,$$

где \times – двумерная операция свертки; A – исходное изображение.

Применение оператора G_X позволяет определить приближенное значение первой частной производной изменения интенсивности в горизонтальном направлении, G_Y – в вертикальном.

Двумерная операция свертки проводится по формуле

$$B(x, y) = \sum_i \sum_y F(i, j) \times A(x + i, y + j), \quad (1)$$

где $F(i, j)$ – ядро фильтра Собеля.

Величина градиента в каждом пикселе изображения определяется по формуле

$$G = \sqrt{G_X^2 + G_Y^2}. \quad (2)$$

Направление градиента вычисляется по следующей формуле:

$$\theta = \arctan \frac{G_Y}{G_X}. \quad (3)$$

Следовательно, фильтр Собеля – это дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближенное значение градиента яркости в каждой точке изображения [6].

1.2. Фильтр Превитта

Фильтр Превитта схож по принципу работы с фильтром Собеля. Он является подходящим способом для оценки величины и ориентации границы [6]. Фильтр Превитта дает направление прямо из ядра с максимальным результатом. Метод обнаружения сегментов с его помощью вдоль границы локализации объекта можно представить так:

$$G_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times A, \quad G_Y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times A.$$

Результат работы фильтра Превитта:

$$\max\{P, Q\}, \quad (4)$$

где P и Q – отклики ядер G_X и G_Y .

1.3. Фильтр Робертса

Фильтр Робертса – нелинейный метод контрастирования, использующий операции двумерного дискретного дифференцирования. Метод обнаружения сегментов с его помощью рассматривает два различных ядра свертки:

$$G_X = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times A, \quad G_Y = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \times A.$$

В фильтре Робертса используется суммарный вектор из двух диагональных векторов перепада, который показывает наибольшую величину перепада между четырьмя охваченными точками [7, 8].

Преобразование каждого пикселя перекрестным фильтром Робертса может показать производную изображения вдоль ненулевой диагонали, и комбинация этих преобразованных изображений может также рассматриваться как градиент от двух верхних пикселей к двум нижним. Отклик данного фильтра определяется по формуле

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5)$$

1.4. Алгоритм Канны

Алгоритм Канны состоит из пяти шагов [9, 10].

1. Сглаживание. Оно используется для подавления шумов с помощью размытия изображения фильтром Гаусса (6):

$$G(r) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}} e^{-r^2/(2\sigma^2)}, \quad (6)$$

где r – радиус размытия; N – количество измерений; σ – стандартное отклонение распределения Гаусса.

2. Поиск градиентов. На данном этапе используется фильтр Собеля, который описан в разделе 1.1.

3. Подавление немаксимумов: пикселями границ объявляются пиксели, в которых достигается локальный максимум градиента в направлении вектора градиента.

4. Двойная пороговая фильтрация. Если значение градиента в каком-то месте на просматриваемом фрагменте превысит верхний порог, то этот элемент остается также допустимой границей и в тех местах, где значение градиента рассматривает два различных ядра свертки.

5. Трассировка области неоднозначности. Итоговые границы определяют путем подавления всех краев, не связанных с сильными границами.

Выводы

Исходя из математического анализа фильтра Собеля видно, что при среднем уровне математического ожидания и дисперсии выделяется достаточно большое количество границ, а низкая избыточность говорит о выделении контурных линий.

Исходя из анализа фильтра Превитта видно, что результаты выделения будут схожи с фильтром Собеля, но фильтр Превитта не обладает низкой избыточностью, а следовательно, выделение контурных линий замечено не будет.

Исходя из математического анализа фильтра Робертса видно, что он имеет очень низкий уровень средней яркости и невысокую дисперсию. Таким образом, изображение будет затененным, практически черным, на котором видно небольшое количество границ, а наличие высокой избыточности говорит о низкой вероятности контуров.

Из теоретического анализа алгоритма Канни видно, что он является многоступенчатым. Он базируется на трех критериях: высокий уровень локализации, один отклик на одну границу и увеличение отношения сигнал/шум.

Таким образом, фильтр Собеля и алгоритм Канни должны выделять достаточное количество границ по сравнению с другими рассмотренными фильтрами. Проверим это при помощи экспериментов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОИСКА ГРАНИЦ НА ПЕРЕПАДЕ ЯРКОСТИ

Эксперименты проводились в приложении MATLAB с помощью пакета Image Processing Toolbox, который предоставляет широкий спектр средств для цифровой обработки и анализа изображений [11, 12].

В данной работе в качестве исходного изображения была выбрана картина волнового поля на рис. 1.

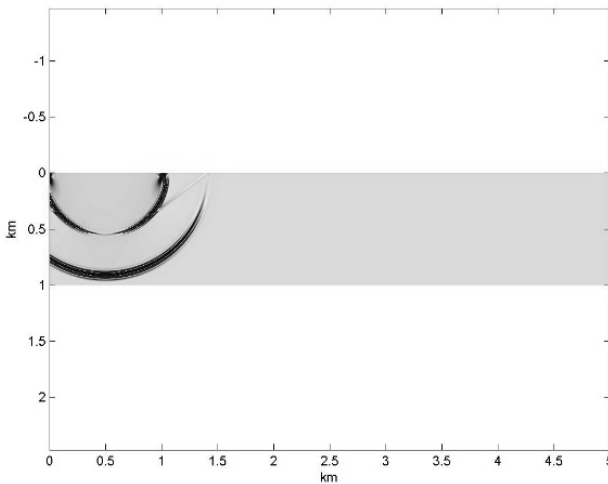


Рис. 1. Исходное изображение картины волнового поля

Затем, используя прикладной пакет MATLAB, была проведена сегментация рис.1 при помощи фильтра Собеля (рис. 2).

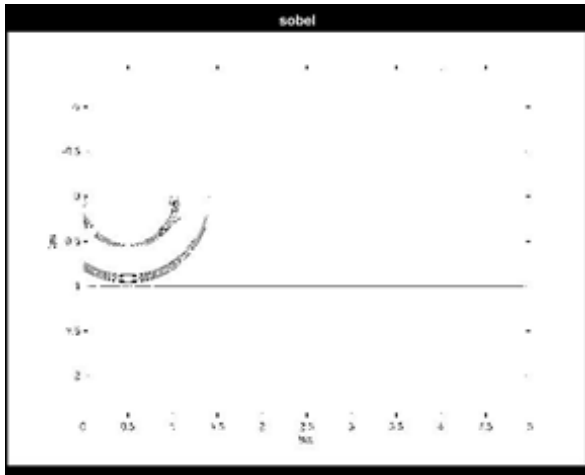


Рис. 2. Выделение границ с помощью фильтра Собеля

Используя изображения на рис. 1, провели выделение границ с помощью фильтра Превитта (рис. 3).

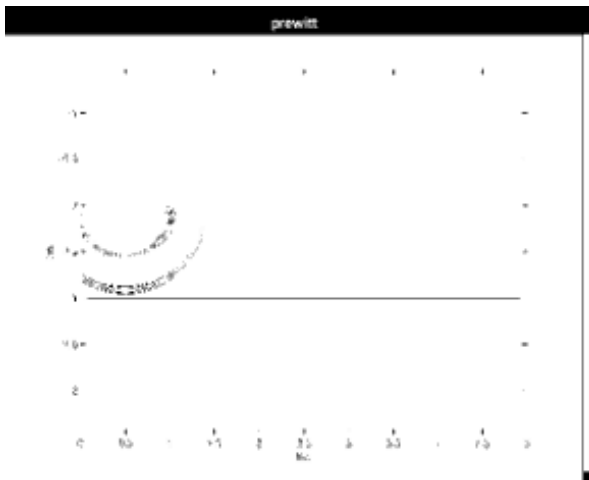


Рис. 3. Выделение границ с помощью фильтра Превитта

Затем провели сегментацию изображения картины волнового поля с помощью фильтра Робертса (рис. 4).

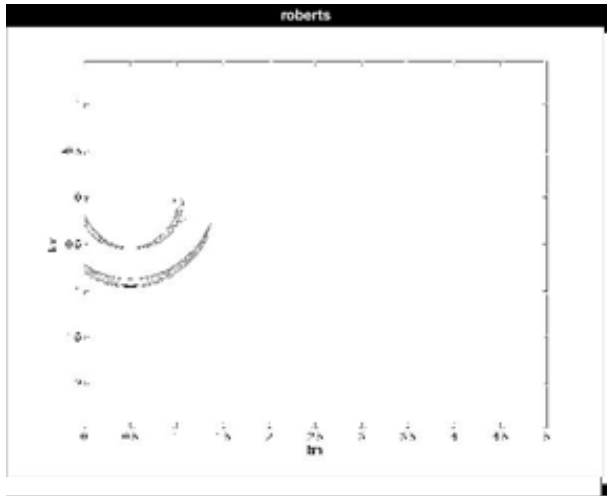


Рис. 4. Выделение границ с помощью фильтра Робертса

Выделение границ с помощью алгоритма Канны будет выглядеть следующим образом (рис. 5).

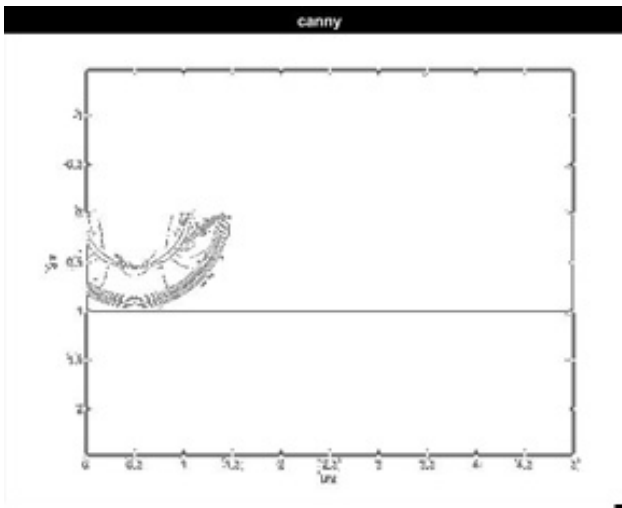


Рис. 5. Выделение границ с помощью алгоритма Канны

Выводы

Исходя из полученных изображений на рис. 2 и 3 следует вывод, что фильтры Превитта и Собеля визуально практически не отличаются, выделяют достаточное количество границ, прослеживается замкнутый контур. Стоит отметить, что у фильтра Собеля есть одна характерная черта: он выделяет не только контуры, но и полутона изображений, тени. Со стороны распознавания изображения это является дефектом сегментации.

Фильтр Робертса (рис. 3) выделяет небольшое количество границ по сравнению с фильтрами Собеля и Превитта. Это обуславливается отсутствием четко выраженного центрального элемента маски. Изображение, полученное при помощи обработки фильтром Робертса, кажется затененным, практически черным, на нем видно небольшое количество границ. С другой стороны, фильтр Робертса проще в реализации по сравнению с фильтрами Собеля и Превитта.

Исходя из полученного изображения на рис. 5 можно сделать вывод, что алгоритм Канни достаточно четко выделяет границы по сравнению с выше-рассмотренными фильтрами, это способствует лучше выявлять структуру ГФМС. Одним из главных достоинств данного алгоритма является слабая чувствительность к шумам и ориентации границ областей. Недостатком данного алгоритма является высокая сложность реализации и ресурсоемкость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный теоретический и экспериментальный анализ методов для поиска границ на перепаде яркости показал основные достоинства и недостатки каждого из фильтров, а также критерии, на которые следует обращать внимание при выборе каждого из фильтров для определенной задачи распознавания изображений.

Исходя из анализа было выявлено, что фильтр Собеля и алгоритм Канни достаточно хорошо выделяют края, однако на данный момент существует более совершенный механизм – фильтр Габора, который будет реализован в дальнейших исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тихоцкий С.А.* Разработка математических методов и алгоритмов решения обратных задач геофизики и обработки геофизических данных: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 25.00.10. – М., 2011. – 206 с.

2. *Morozov A.E., Yakimenko A.A., Karavaev D.A.* Features of the neural network for determining the position and geometric characteristics of cavernous inclusions // 14th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018) – 44894: Proceedings. – Novosibirsk, 2018. – Vol. 1, pt. 4. – P. 492–495.
3. Segmentation and object recognition using edge detection techniques / Y. Ramadevi, T. Sridevi, B. Poornima, B. Kalyani // International Journal of Computer Science & Information Technology. – 2010. – Vol. 2, N 6. – P. 153–161.
4. *Кугаевских А.В.* Агломеративный метод сегментации иероглифического текста // Графикон'2010: труды конференции. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 181–187.
5. *Кугаевских А.В.* Модели и методы распознавания иероглифических текстов на примере древнеегипетского языка: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2012. – 117 с.
6. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
7. *Дёмин А.Ю., Дорофеев В.А.* Распараллеливание алгоритма выделения границ объектов на основе структурно-графического представления // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 5: Управление, вычислительная техника и информатика. – С. 159–164.
8. *Местецкий Л.М.* Математические методы распознавания образов. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 144 с.
9. *Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю.* Компьютерная обработка и распознавание изображений. – СПб.: СПбГУИТМО, 2008. – 192 с.
10. *Sanny J.* A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – Vol. PAMI-8, N 6. – P. 679–698.
11. *Журавель И.М.* Краткий курс теории обработки изображений [Электронный ресурс]. – URL: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/15.php> (дата обращения: 14.03.2019).
12. *Штак М.* Обработка изображений в MATLAB – это просто [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/videos/image-processing-made-easy-96823.html> (дата обращения: 14.03.2019).

Макфузова Анна Игоревна, магистрант кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – нейронные сети в задачах распознавания. E-mail: anua-makfuzova@mail.ru.

Якименко Александр Александрович, доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой вычислительной техники Новосибирского госу-

дарственного технического университета. Основное направление научных исследований – компьютерное моделирование, параллельные вычисления. Имеет более 30 публикаций. E-mail: yakimenko@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-70-82

Analysis of the image segmentation method for wave field patterns*

A.I. Makfuzova¹, A.A. Yakimenko²

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, undergraduate student. E-mail: anya-makfuzova@mail.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, assistant professor, candidate of Technical Sciences. E-mail: yakimenko@corp.nstu.ru

The article was written as part of the neocognitron neural network research for recognizing geological and physical model of the medium (GPMM). The task of recognition involves the intellectual processing of the information received, which presents certain difficulties: feature extraction, resource intensity, speed and quality. The recognition procedure is applied to the image and ensures its conversion. The subsequent processing of such a description allows to refer the original image to one of several classes. One of the important stages in the image recognition system is its segmentation. Segmentation divides an image into multiple non-intersecting areas that are visually distinct, uniform and significant in relation to several qualities or processed properties. This allows you to simplify the subsequent analysis of homogeneous areas of the image, their brightness and geometric characteristics. The result is a multitude of segments (regions) completely covering the original image. The article provides an analysis of the method of segmentation of the wave field pattern, namely the detection of boundaries on the brightness difference. To search for the boundaries of the segments, the differential geometry apparatus is used: Roberts, Prewitt, Sobel filters and Canny algorithm. In this paper, a segmentation of the wave field image is performed using each filter. At the research stage of the above filters, it is advisable to use the MATLAB application package, which is used to solve various technical problems, including digital image processing. Using the functions of the Image Processing Toolbox, it searches for and calculates the features of objects. The article discusses the algorithms of each filter, identifies the main advantages and disadvantages.

Keywords: image recognition, image segmentation, border detection, neocognitron, Gabor filter, Prewitt filter, Sobel filter, Canny algorithm

* Received 26 September 2018.

REFERENCES

1. Tikhotskii S.A. *Razrabotka matematicheskikh metodov i algoritmov resheniya obratnykh zadach geofiziki i obrabotki geofizicheskikh dannykh*. Diss. dokt. phys. and math. sci. [Development of mathematical methods and algorithms for solving inverse problems of geophysics and processing of geophysical data. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2011. 206 p.
2. Morozov A.E., Yakimenko A.A., Karavaev D.A. Features of the neural network for determining the position and geometric characteristics of cavernous inclusions. *14th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018) – 44894: Proceedings*, Novosibirsk, 2018, vol. 1, pt. 4, pp. 492–495.
3. Ramadevi Y., Sridevi T., Poornima B., Kalyani B. Segmentation and object recognition using edge detection techniques. *International Journal of Computer Science & Information Technology*, 2010, vol. 2, no. 6, pp. 153–161.
4. Kugaevskikh A.V. [Agglomerative method of segmentation of a hieroglyphic text]. *Grafikon'2010: trudy konferentsii* [GraphiCon'2010. Conference Proceedings], St. Petersburg, 2010, pp. 181–187. (In Russian).
5. Kugaevskikh A.V. *Modeli i metody raspoznavaniya ieroglificheskikh tekstov na primere drevneegipetskogo yazyka*. Diss. kand. tekhn. nauk [Models and methods of recognition of hieroglyphic texts on the example of Ancient Egyptian language. PhD eng. sci. diss.], Tyumen, 2012. 117 p.
6. Gonzalez R., Woods R. *Digital image processing*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2002 (Russ. ed.: Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 1072 p).
7. Demin A.Yu., Dorofeev V.A. Rasparallelivanie algoritma vydeleniya granits ob"ektov na osnove strukturno-graficheskogo predstavleniya [Parallelization of algorithm for detecting borders on the basis of structural and graphic presentation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013, vol. 323, no. 5, pp. 159–164.
8. Mestetskii L.M. *Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov* [Mathematical methods of pattern recognition]. Moscow, MSU Publ., 2004. 144 p.
9. Fisenko V.T., Fisenko T.Yu. *Komp'yuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazhenii* [Computer processing and image recognition]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2008. 192 p.
10. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679–698.

11. Zhuravel' I.M. *Kratkii kurs teorii obrabotki izobrazhenii* [A short course of image processing theory]. Available at: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/15.php> (accessed 14.03.2019).

12. Shpak M. *Obrabotka izobrazhenii v MATLAB – eto prosto* [Image processing in MATLAB is simply]. Available at: <https://www.mathworks.com/videos/image-processing-made-easy-96823.html> (accessed 14.03.2019).

Для цитирования:

Макфузова А.И., Якименко А.А. Анализ метода сегментации изображения для картин волнового поля // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 70–82. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-70-82.

For citation:

Makfuzova A.I., Yakimenko A.A. Analiz metoda segmentatsii izobrazheniya dlya kartin volnovogo polya [Analysis of the image segmentation method for wave field patterns]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 70–82. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-70-82.

АЛГОРИТМ ДЛЯ СБОРКИ КУБИКА РУБИКА 2×2 НА C#*

Е.П. МИКОВ¹, В.А. БОНДАРЬ², А.А. АЛИМОВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматизи. Е-mail: bondar.vale@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматизи. Е-mail: mikov.e.p@gmail.com

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматизи. Е-mail: alimov_sanya@mail.ru

Известно, что существует целая совокупность математических методов для изучения свойств кубика Рубика с абстрактно-математической точки зрения, а дисциплина, изучающая эти закономерности, именуется как математика кубика Рубика. Эта математика изучает различные алгоритмы сборки кубика и оценивает их. В основу своего научного подхода она задеиствует теорию графов, теорию групп, а также теории вычислимости и комбинаторики. Начиная с середины XX века многие математики, программисты и любители стремились найти идеальный алгоритм, чтобы на практике за минимальное число ходов собирать кубик Рубика. Существует множество алгоритмов, предназначенных для перевода кубика Рубика из произвольной конфигурации в его конечную конфигурацию, однако следует упомянуть, что в 2010 году программистами из компании Google было выдвинуто строгое математическое обоснование того, что для перевода кубика Рубика из произвольной конфигурации в его собранный вид достаточно не более чем 20 поворотов граней. Для того чтобы выполнить необходимый объем вычислений, потребовалось 35 лет процессорного времени, а продолжительность вычислений составила несколько недель.

Справедливо утверждение, что наиболее приоритетной задачей при разработке алгоритма кубика Рубика является создание быстродействующего и оптимизированного метода сборки. Для решения этой задачи существует много алгоритмов, но программа, разработанная нами, является уникальным вариантом реализации метода сборки кубика Рубика 2×2 на языке программирования C#.

Ключевые слова: C#, программа, алгоритм Бога, кубик Рубика, 2×2 , алгоритмы, .NET, нейронная сеть

* Статья получена 30 августа 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе обсуждения возможных способов решения кубика Рубика возник интересный алгоритм реализации этой задачи, получивший название «алгоритм Бога». Под алгоритмом Бога головоломки подразумевается любой алгоритм, который позволяет получить решение головоломки, содержащее минимально возможное число ходов (оптимальное решение), начиная с любой заданной конфигурации, соответственно данный термин может также быть использован в отношении других перестановочных головоломок.

1. ЦЕЛЬ ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЫ И АЛГОРИТМ БОГА

Целью нашей совместной работы являлось создание алгоритма для нахождения минимально возможного числа ходов сборки кубика Рубика, начиная с любой случайно заданной конфигурации.

Своему появлению термин обязан Джону Конвею, он определил кратчайший путь из любого данного состояния назад к начальному состоянию как алгоритм Бога.

Алгоритм Бога может существовать для головоломок с конечным числом возможных конфигураций и с конечным набором «ходов», допустимых в каждой конфигурации и переводящих текущую конфигурацию в другую. Термин «решить головоломку» означает указать последовательность ходов, переводящих некоторую начальную конфигурацию в некоторую конечную конфигурацию. Оптимально решить головоломку – указать самую короткую последовательность ходов для решения головоломки. Оптимальных решений может быть несколько.

К известным головоломкам, попадающим под это определение, относится и кубик Рубика. Во многих подобных головоломках конечная конфигурация негласно предполагается, в случае кубика Рубика – это одноцветность граней. В этих случаях «собрать головоломку» означает, что требуется для произвольной начальной конфигурации указать последовательность ходов, приводящих к фиксированной конечной конфигурации.

Тогда алгоритм Бога (для данной головоломки) – это алгоритм, который решает головоломку и находит для конфигураций хотя бы одно оптимальное решение.

Некоторые авторы считают, что алгоритм Бога должен также быть практичным, то есть использовать разумный объем памяти и завершаться в разумное время.

Число Бога кубика 2Ч2Ч2 равно 11 ходам, если поворот грани на 180° считается за один ход, или 14 ходам, если поворот грани на 180° считается за два хода. Возможное количество конфигураций кубика 2Ч2Ч2 – **3 674 160**.

У кубика есть 6 сторон, однако очевидно, что, повернув одну сторону, мы сделаем движение, обратное возвратному повороту противоположной стороны, поэтому будем поворачивать только три стороны. Каждую сторону мы назовем буквой: фронтальная F, верхняя U и правая R (рис. 1).



Рис. 1. Кубик с назначенными сторонами

Каждую сторону мы можем поворачивать тремя способами: по часовой стрелке (F), против часовой стрелки (F') и двойной (F²) повороты. Итого мы получаем возможных 9 комбинаций:

$$F F' F^2 U U' U^2 R R' R^2$$

Разных наборов из этих комбинаций получается $9^{11} = 31\,381\,059\,609$. Это довольно большая цифра для жесткого алгоритма, на нахождение всех комбинаций уйдет очень много времени. Поэтому мы используем нейронную сеть – дерево.

Для алгоритма нужен какой-то показатель, по которому будет вычисляться текущее состояние кубика Рубика (коэффициент собранности, в дальнейшем K). За K мы взяли количество правильно повернутых частей (4 части × × 6 сторон = 24), полностью собран – 24, а полностью разобран – 3. Почему 3? Потому что один кубик никогда не меняет своей позиции и всегда находится в правильном положении (три цвета).

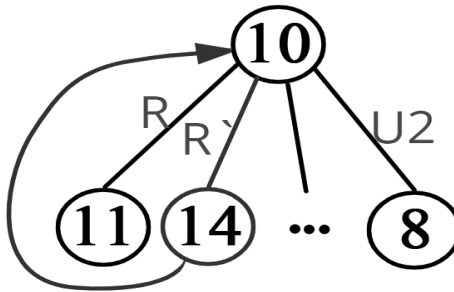


Рис. 2. Дерево

В ходе написания алгоритма мы столкнулись с несколькими проблемами. Во-первых, если мы повернули правую сторону, то в следующей итерации ее крутить нет смысла, так как $R^2 + R = R^{-1}$. Ее мы решили, запоминая предыдущие ходы и проверяя впоследствии при выборе пути. Во-вторых, попадание в ямы из восьми итераций. Решение было очевидным – ограничение глубины дерева до 11, именно за столько ходов можно собрать любой кубик Рубика. В-третьих, переполнение памяти из-за рекурсивного подхода. Очищая за собой из буфера всё лишнее, решили проблему переполнения.

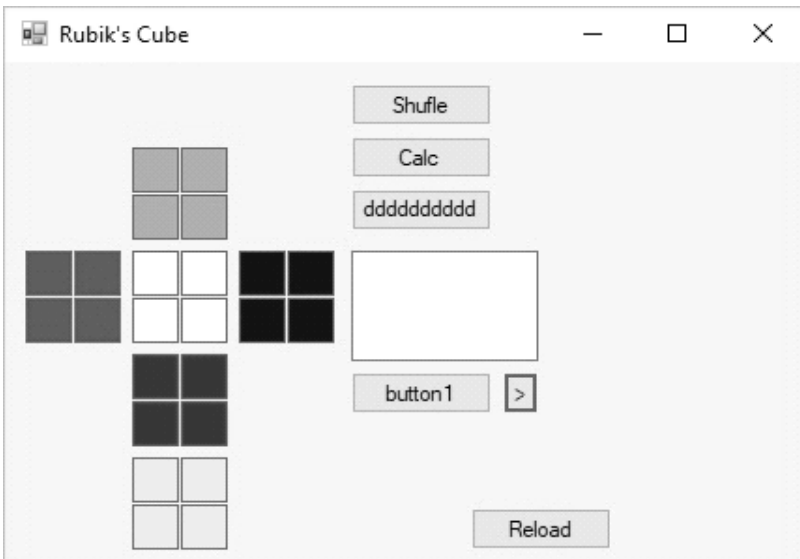


Рис. 3. Наша программа

2. АЛГОРИТМ

1. Получаем K для текущего состояния кубика Рубика.
2. Если $K == 24$, то кубик собран.
3. Если Глубина дерева $== 11$, то выходим на уровень выше и проверяем $K[+1]$.
4. Получаем K кубика после каждого действия и находим максимальный коэффициент собранности ($K[0]$).
5. Идем на шаг 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье мы постарались наглядно продемонстрировать возможность реализации алгоритма Бога для решения кубика Рубика со сторонами $2 \times 2 \times 2$. Программа, созданная нами в рамках расчетно-графической работы, позволяет найти минимально возможное число ходов, начиная с любой случайно заданной конфигурации. Дальнейшее усложнение этой программы позволит нам реализовать трехмерный интерфейс программы и найти кратчайший маршрут между ними, осуществить возможности работы с кубиками Рубиками со сторонами $3 \times 3 \times 3$ и с большей размерностью. В то же время доподлинно известно, что аналогичная задача для кубика 4Ч4Ч4 на данный момент остается практически неосуществимой. Содержание данной статьи вмещает в себе описание одного из наиболее популярных способов алгоритмизации поиска кратчайшего числа ходов на примере алгоритма Бога. Тема данной работы является актуальной в сфере решения головоломок с конечным числом возможных конфигураций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору кафедры автоматки А.А. Воеводе за помощь при написании работы, а также за полезное обсуждение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pages and scripts are written by JaapScherphuis, 1999–2015 [Electronic resource]. – URL: <http://www.jaapsch.net/puzzles/cube2.htm> (accessed: 15.03.2019).
2. Pages and scripts are written by JaapScherphuis, 1999–2015 [Electronic resource]. – URL: <http://www.jaapsch.net/puzzles/pyraminx.htm> (accessed: 15.03.2019).

3. Klein E. Résoudre un Rubik's pocket cube avec Neo4j [Electronic resource] // JeffProd. Coding for fun: website. – URL: <https://fr.jeffprod.com/blog/2017/resoudre-un-rubik-pocket-cube-avec-neo4j/> (accessed: 15.03.2019).
4. Алгоритм Бога [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Бога (дата обращения: 15.03.2019).
5. Мильников М. Всем кубикам кубик // Юный техник. – 1982. – № 7. – С. 64.
6. Константинов И. Векторное сложение кубика // Наука и жизнь. – 1999. – № 5. – С. 74.
7. Карасев А. Как научиться собирать кубик Рубика в объеме // Наука и жизнь. – 1999. – № 5. – С. 75.
8. Залгаллер В., Залгаллер С. Венгерский шарнирный кубик // Квант. – 1980. – № 12. – С. 17–21.
9. Дубровский В. Алгоритм волшебного кубика // Квант. – 1982. – № 7. – С. 22–25.
10. Рубик и его кубик: раскрутка, сказочное везение, возвращение [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.membrana.ru/> (дата обращения: 15.03.2019).
11. Константинов И. Составляем каталог вращений кубика // Наука и жизнь. – 1985. – № 3–11. – URL: http://www.seoded.ru/downloads/cube/NKJ_1985-03.pdf (дата обращения: 15.03.2019).
12. Кубик Рубика и проблема Хигмана / 20-я летняя конференция международного математического турнира городов. – URL: <http://olympiads.mscme.ru/lktg/2008/2/2-1ru.pdf> (дата обращения: 15.03.2019).

Миков Егор Петрович, студент факультета автоматки и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. E-mail: mikov.e.p@gmail.com

Бондарь Валерий Александрович, студент факультета автоматки и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. E-mail: bondar.vale@mail.ru

Алимов Александр Александрович, студент факультета автоматки и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. E-mail: alimov_sanya@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-83-90

Algorithm for building a Rubik's Cube 2 × 2 on C#*

E.P. Mikov¹, V.A. Bondar², A.A. Alimov³

¹ 630073, Russian Federation, Novosibirsk, Karl Max Avenue, 20, Novosibirsk State University, student of the department of automation. E-mail: bondar.vale@mail.ru

² 630073, Russian Federation, Novosibirsk, Karl Max Avenue, 20, Novosibirsk State University, student of the department of automation. E-mail: mikov.ep@gmail.com

³ 630073, Russian Federation, Novosibirsk, Karl Max Avenue, 20, Novosibirsk State University, student of the department of automation. E-mail: alimov_sanya@mail.ru

It is known that there is a whole set of mathematical methods for studying the properties of the Rubik's cube from an abstract-mathematical point of view, and the discipline studying these laws is referred to as the Rubik-cube mathematics. This math studies different cube assembly algorithms and evaluates them. At the heart of her scientific approach, she uses graph theory, group theory, and the theory of computability and combinatorics.

Since the middle of the 20th century, many mathematicians, programmers and amateurs have sought to find the perfect algorithm in order to practice a Rubik's cube in the minimum number of moves. There are many algorithms designed to translate Rubik's cube from an arbitrary configuration to its final configuration, however, it should be mentioned that in 2010, programmers from Google put forward a rigorous mathematical rationale that to translate a Rubik's cube from an arbitrary configuration into its assembled form no more than 20 facet turns. In order to perform the required amount of calculations, it took 35 years of CPU time, and the duration of the calculations was several weeks.

It is true that the highest priority in the development of the Rubik's Cube algorithm is to create a fast and optimized assembly method. There are many algorithms for solving this problem, but the program developed by us is a unique variant of the implementation of the 2x2 Rubik Cube assembly method in the C# programming language.

Keywords: C#, program, Algorithm of God, Rubik's Cube, 2x2, algorithms, .NET, neural network

REFERENCES

1. *Pages and scripts are written by JaapScherphuis, 1999–2015.* Available at: <http://www.jaapsch.net/puzzles/cube2.htm> (accessed 15.03.2019).
2. *Pages and scripts are written by JaapScherphuis, 1999–2015.* Available at: <http://www.jaapsch.net/puzzles/pyraminx.htm> (accessed 15.03.2019).
3. Klein E. Résoudre un Rubik's pocket cube avec Neo4j. *JeffProd. Coding for fun:* website. Available at: <https://fr.jeffprod.com/blog/2017/resoudre-un-rubik-pocket-cube-avec-neo4j/> (accessed 15.03.2019).

* Received 30 August 2018.

4. Algoritm Boga [God's algorithm]. *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Бога (accessed 15.03.2019).
5. Myl'nikov M. Vsem kubikam kubik [All cubes cube]. *Yunyi tekhnika*, 1982, no. 7, p. 64. (In Russian).
6. Konstantinov I. Vektornoe slozhenie kubika [Vector addition of a cube]. *Nauka i zhizn' – Science and Life*, 1999, no. 5, p. 74. (In Russian).
7. Karasev A. Kak nauchit'sya sobirat' kubik Rubika v ob'eme [How to learn to collect the Rubik's cube in volume]. *Nauka i zhizn' – Science and Life*, 1999, no. 5, p. 75. (In Russian).
8. Zalgaller V., Zalgaller S. Vengerskii sharnirnyi kubik [Hungarian articulated cube]. *Kvant*, 1980, no. 12, pp. 17–21. (In Russian).
9. Dubrovskii V. Algoritm volshebного kubika [The magic cube algorithm]. *Kvant*, 1982, no. 7, pp. 22–25. (In Russian).
10. *Rubik i ego kubik: raskrutka, skazochnoe vezenie, vozvrashchenie* [Rubik and his cube: promotion, fabulous luck, return]. Available at: <http://www.membrana.ru/> (accessed 15.03.2019).
11. Konstantinov I. Sostavlyаем katalog vrashchenii kubika [A catalog of the rotation of the cube]. *Nauka i zhizn' – Science and Life*, 1985, no. 3–11. (In Russian). Available at: http://www.seoded.ru/downloads/cube/NKJ_1985-03.pdf (accessed 15.03.2019).
12. *Kubik Rubika i problema Khigmana* [Rubik's cube and Higman problem]. 20th summer conference International mathematical Tournament of towns, 2008. Available at: <http://olympiads.mccme.ru/lktg/2008/2/2-1ru.pdf> (accessed 15.03.2019).

Для цитирования:

Миков Е.П., Бондарь В.А., Алимов А.А. Алгоритм для сборки кубика Рубика 2×2 на C# // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С 83–90. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-83-90.

For citation:

Mikov E.P., Bondar V.A., Alimov A.A. Algoritm dlya sborki kubika Rubika 2×2 na C# [Algorithm for building a Rubik's cube 2×2 on C#]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 83–90. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-83-90.

ОБРАБОТКА СКАНИРОВАННОГО ТЕКСТА *

Ю.В. МИЛОВСКАЯ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студентка факультета автоматки и вычислительной техники. E-mail: milovskaya.1999@yandex.ru

В статье дается обзор методов и алгоритмов обработки сканированного текста на примере одной из самых популярных программ оптического распознавания символов АBBYY FineReader. Распознавание – процедура получения текста с картинки, которая после сканирования появляется в одном из форматов: BMP, JPG, PNG, GIF (могут быть и другие). Другими словами, это процесс перевода графического изображения символов (букв) в компьютерные текстовые символы. Сделать это можно, имея качественную цифровую копию оригинального текста и набор современных компьютерных программ для распознавания текста. Для корректного распознавания в первую очередь проводится анализ текста (сверху вниз, снизу вверх, алгоритм MDA, сочетающий в себе первые два метода). Фрагмент изображения, согласно принципу целостности, будет интерпретирован как некий объект (символ), только если на нем присутствуют все структурные элементы с соответствующими взаимосвязями. При этом система выдвигает ряд гипотез относительно того, на что похож обнаруженный объект с помощью специальных механизмов распознавания, которые называются классификаторами. После обнаружения всех фрагментов и выдвижения гипотез объекты целенаправленно проверяются с использованием принципа адаптивности, подразумевающего наличие накопленных ранее сведений о возможных начертаниях символа в распознаваемом документе. Сложность возникает с документами, содержащими в себе рисунки, таблицы, колоннитулы. Упростить работу с данными структурами позволяет бинаризация. В качестве примера приведен алгоритм Брэдли и его реализация.

Ключевые слова: сканирование, распознавание, анализ изображения, алгоритм Брэдли, бинаризация, классификаторы, гипотезы, цифровое изображение, целостность, целенаправленность, адаптивность, фоновые текстуры

* Статья получена 18 ноября 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Наверное, каждый из нас сталкивался с задачей, когда нужно перевести бумажный документ в электронный вид. Особенно часто это нужно делать тем, кто учится, работает с документацией, переводит тексты при помощи электронных словарей и т. д.

Вообще сканирование и распознавание текста – довольно трудоемкий процесс, так как большинство операций приходится делать вручную. Мы попытаемся разобраться по шагам, что, как и почему.

Поможет нам разобраться в процессах сканирования и последующей обработке текста программа ABBYY FineReader.

С помощью всем известного сканера создается цифровое изображение, фрагмент которого будет интерпретирован системой как некий объект (символ).

1. БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ

Оптическое распознавание символов (OCR) относится к области ИИ (искусственный интеллект), поэтому разработчики стремятся имитировать деятельность человеческого мозга. Подобно нашей зрительной системе, программы следуют базовым принципам, таким как целостность, целенаправленность и адаптивность. Объект рассматривается как совокупность своих частей, любая его интерпретация преследует определенную цель, поэтому и выдвигаются гипотезы о целенаправленности проверки, что позволяет экономить мощность и реже ошибаться.

Чаще всего применяются два типа анализа: сверху вниз или снизу вверх, но ABBYY разработали специальный алгоритм MDA (многоуровневый анализ документа), который сочетает в себе два вышеуказанных.

2. БИНАРИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ: АЛГОРИТМ БРЭДЛИ

На этапе предварительной обработки и анализа графических данных перед любой OCR-системой стоят две основные задачи: выявление логической структуры документа и подготовка изображения к процедурам распознавания.

Подлежащий распознаванию документ часто выглядит заметно сложнее, чем белая страница с черным текстом. Таблицы, иллюстрации, фоновые изображения, колонтитулы, всё чаще применяемые для оформления, усложняют структуру страницы. Основная задача состоит в том, чтобы отделить текст от текстур и иллюстраций.

Здесь уместно будет сказать о практикуемых методах подготовки. Все современные системы распознавания начинают процесс с создания черно-белого изображения документа. При этом подлежащее анализу изображение чаще всего цветное или полутоновое (то есть состоящее из разных оттенков серого цвета).

Упростить работу с изображением позволяет бинаризация – перевод цветного (или в градациях серого) изображения в двухцветное черно-белое. Один из основных методов ее реализации – алгоритм Брэдли.

```
voidBradley_threshold(unsignedchar* src, unsignedchar* res, intwidth,
intheight) {
    constint S = width / 8;
    int s2 = S / 2;
    constfloat t = 0.15;
    unsignedlong* integral_image = 0;
    long sum = 0;
    int count = 0;
    int index;
    int x1, y1, x2, y2;

    //рассчитываем интегральное изображение
    integral_image = newunsignedlong[width*height *
sizeof(unsignedlong*)];

    for (inti = 0; i<width; i++) {
        sum = 0;
        for (int j = 0; j <height; j++) {
            index = j * width + i;
            sum += src[index];
            if (i == 0)
                integral_image[index] = sum;
            else
                integral_image[index] = integ-
ral_image[index - 1] + sum;
        }
    }

    //находим границы для локальные областей
    for (inti = 0; i<width; i++) {
        for (int j = 0; j <height; j++) {
            index = j * width + i;
            x1 = i - s2;
            x2 = i + s2;
            y1 = j - s2;
            y2 = j + s2;
```

```

        if (x1 < 0)
            x1 = 0;
        if (x2 >= width)
            x2 = width - 1;
        if (y1 < 0)
            y1 = 0;
        if (y2 >= height)
            y2 = height - 1;
        count = (x2 - x1)*(y2 - y1);
        sum = integral_image[y2*width + x2] - inte-
gral_image[y1*width + x2] -
            integral_image[y2*width + x1] + inte-
gral_image[y1*width + x1];
        if ((long)(src[index] * count) < (long)(sum*(1.0 - t)))
            res[index] = 0;
        else
            res[index] = 255;
    }
    delete[]integral_image;
}
}

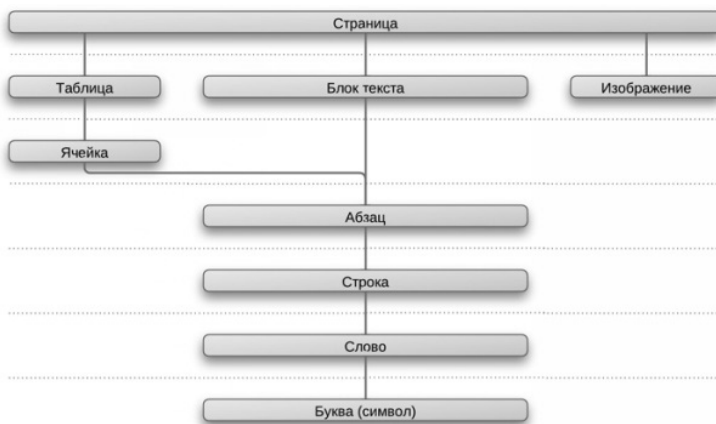
```

ABBYY FineReader построена на других принципах и не пытается решать задачу бинаризации напрямую. Принцип целенаправленности устанавливает другой подход к обнаружению строк в тексте или слов в строке: они должны быть в документе, надо только суметь их распознать. FineReader использует процедуры интеллектуальной фильтрации фоновых текстур и адаптивной бинаризации для повышения качества поиска. Первая позволяет уверенно отделять строки текста от фона любой сложности, вторая – гибко выбирать оптимальные для данного участка параметры бинаризации. Конечно же, к этим процедурам система прибегает лишь в тех случаях, когда предварительный анализ указывает на подобную необходимость. В каждом конкретном случае ABBYY FineReader выбирает подходящий «инструмент», опираясь на информацию, которая накопилась в процессе анализа документа.

Для того чтобы корректно воспроизводить в электронном виде такие документы, все современные OCR-программы начинают распознавание именно с анализа структуры.

3. МНОГОУРОВНЕВЫЙ АНАЛИЗ

Любой высокоуровневый объект может быть представлен как набор объектов более низкого уровня: буквы образуют слово, слова – строки, строки – абзац и т. д. Поэтому анализ всегда начинается в направлении сверху вниз. Программа делит страницу на объекты, их, в свою очередь, на объекты низших уровней, и так далее, вплоть до символов. Когда символы выделены и распознаны, начинается обратный процесс – объединение объектов высших уровней, который завершается формированием целой страницы.



Многоуровневый анализ

На всех этапах многоуровневого анализа (см. рисунок) добавлена возможность обратной связи. То есть результаты анализа на одном из нижних уровней всегда могут повлиять на действия с объектами более высоких уровней. Наличие обратной связи в процедуре MDA дает возможность резко понизить вероятность грубых ошибок, связанных с неверным распознаванием объектов более высоких уровней.

4. РАСПОЗНАВАНИЕ СИМВОЛОВ. КЛАССИФИКАТОРЫ

Как следует из общих принципов работы ABBYY FineReader, на каждом логическом уровне документа выдвигается ряд гипотез. На следующем уровне каждая из них порождает еще несколько предположений. Поэтому при распознавании букв FineReader оперирует огромным количеством гипотез, учитывающих все возможные варианты деления строки на слова, слова на

буквы и т. д. Для быстрого и точного принятия решений система объединяет гипотезы в многоуровневые структуры – модели.

В результате структурирования количество подлежащих проверке гипотез сильно сокращается, так что последующая проверка происходит максимально быстро и эффективно.

Для распознавания символов в программе FineReader используются специальные механизмы, которые называются классификаторами, порождающими список гипотез, которые затем проверяются. Входными данными для классификаторов может служить не только графическая информация, но и сформированный в ходе распознавания список гипотез. В последнем случае классификатор не выдвигает новых гипотез, а лишь изменяет веса уже имеющихся, подтверждая или опровергая их. Такой подход, в котором также четко прослеживаются принципы IPA (интеллектуальные алгоритмы обработки), обеспечивает более интеллектуальный анализ изображения и наиболее точное распознавание документа.

Для обеспечения надежной работы механизма словарной проверки лингвистами из компании ABBYY SoftwareHouse были созданы полноценные словари, позволяющие системе FineReader распознавать тексты на многих языках. Специалисты ABBYY SoftwareHouse наделили словари уникальными свойствами, тем самым сделав их морфологически структурированными. Получился гибкий и мощный инструмент, позволяющий ABBYY FineReader моделировать словоформы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, предварительная обработка завершена, проведен анализ, гипотезы выдвинуты, а все слова текстового блока распознаны. Формирование документа завершено. Теперь программа обращается к самому пользователю за подтверждением, всё ли корректно распознано. Чтобы вероятность ошибки сводилась к минимуму, ABBYY FineReader предпочитает работать с цветными или полутоновыми изображениями, самостоятельно преобразуя их в черно-белые, и не пытается решить задачу бинаризации напрямую. Для повышения качества поиска использует процедуры интеллектуальной фильтрации фоновых текстур и адаптивной бинаризации.

Естественно, к этим процедурам система прибегает не всегда, а лишь в тех случаях, когда предварительный анализ указывает на подобную необходимость. В каждом конкретном случае ABBYY FineReader выбирает подходящий «инструмент», опираясь на информацию, накопленную в процессе анализа документа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bradley D., Roth G.* Adaptive thresholding using the integral image [Electronic resource] // Journal of Graphics Tools. – 2007. – Vol. 12 (2). – P. 13–21. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.420.7883> (accessed: 15.03.2019).
2. *Llammt A.* Бинаризация изображений: алгоритм Брэдли [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/post/278435/> (дата обращения: 15.03.2019).
3. *Мозговой А.А.* Проблемы извлечения рукописных слов из сканированного изображения [Электронный ресурс] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2013. – № 1. – URL: http://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2013/04/mozgovoy_1_13_1.pdf (дата обращения: 15.03.2019).
4. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техно-сфера, 2005. – 1072 с.
5. Программное обеспечение системы технического зрения. Бинаризация полутоновых изображений / Д.Е. Охочимский, И.М. Бродская, С.С. Камынин, Е.И. Кугушев. – М.: ИПМ, 1987. – 25 с.
6. *Штарьков Ю.М.* Универсальное кодирование. Теория и алгоритмы. – Москва: Физматлит, 2013. – 279 с. – ISBN 978-5-9221-1517-9.
7. *Недбайлов А.А.* Сканирование и распознавание текста: учебное пособие для студентов вузов региона. – Владивосток: Дальневост. гос. техн. ун-т, 2001. – 61 с. – ISBN 5-88871-181-0.
8. *Жадаев А.Г.* Сканирование и распознавание текстов: самоучитель по работе с ABBYY® FineReader 10. – М.: ДМК, 2010. – 247 с. – ISBN 978-5-94074-595-2.
9. *Полилова Т.А.* Технологии сканирования изображений: учебно-методическое пособие / Московский ин-т открытого образования. – М.: МИОО, 2004. – 32 с. – ISBN 5-94898-030-8.
10. *Трушин Н.Г.* Исследование передачи изображений при сканировании и получении копий фотоснимков: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.04. – Кемерово, 2006. – 95 с.
11. *Горский Н.Д., Анисимов В., Горская Л.* Распознавание рукописного текста: от теории к практике. – СПб.: Политехника, 1997. – 126 с. ISBN 5-7325-0450-8.
12. *Литвинюк С.Б.* Разработка и исследование методов повышения достоверности информации в системах, использующих технологию оптического распознавания символов: дис. ... канд. техн. наук: 05.25.05. – М., 1999. – 161 с.

Миловская Юлия Владимировна, студентка факультета автоматике и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. E-mail: milovskaya.1999@yandex.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-91-100

Processing scanned text*

Y.V. Milovskaya

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the faculty of automation and computer engineering. E-mail: milovskaya.1999@yandex.ru

The article provides an overview of the methods and algorithms for processing scanned text on the example of one of the most popular optical character recognition programs – ABBYY FineReader. Recognition is the procedure for obtaining text from the image, which after scanning appears in one of the formats: BMP, JPG, PNG, GIF (there may be others). In other words, it is the process of translating graphic images of characters (letters) into computer text characters. This can be done with a high-quality digital copy of the original text and a set of modern computer programs for text recognition. For correct recognition, first of all, the text is analyzed (top-down, bottom-up, MDA algorithm, combining the first two). A fragment of an image, according to the principle of integrity, will be interpreted as a certain object (symbol) only if it contains all structural elements with corresponding interrelations. In this case, the system puts forward a number of hypotheses regarding what the detected object looks like with the help of special recognition mechanisms, which are called classifiers. After all fragments are discovered and hypotheses are put forward, objects are checked purposefully using the principle of adaptability, which implies the presence of previously accumulated information about the possible character traits in a recognizable document. The difficulty arises with documents containing drawings, tables, footers. Binarization allows to simplify work with these structures. Bradley's algorithm and his implementation is given as an example.

Keywords: scanning, recognition, analysis of the image, Bradley's algorithm, binarization, qualifiers, hypotheses, digital image, integrity, focus, adaptivity, background textures

REFERENCES

1. Bradley D., Roth G. Adaptive thresholding using the integral image. *Journal of Graphics Tools*, 2007, vol. 12 (2), pp. 13–21. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.420.7883> (accessed 15.03.2019).

* Received 18 November 2018.

2. Llammt A. *Binarizatsiya izobrazhenii: algoritm Bredli* [Image binarization: the Bradley algorithm]. Available at: <https://habr.com/post/278435/> (accessed 15.03.2019).

3. Mozgovoy A.A. Problemy izvlecheniya rukopisnykh slov iz skanirovannogo izobrazheniya [The problem of extracting handwritten words from the scanned image]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii – Modeling, Optimization and Information Technology*, 2013, no. 1. Available at: http://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2013/04/mozgovoy_1_13_1.pdf (accessed 15.03.2019).

4. Gonzalez R., Woods R. *Digital image processing*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2002 (Russ. ed.: Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 1072 p).

5. Okhotsimskii D.E., Brodskaya I.M., Kamynin S.S., Kugushev E.I. *Programnoe obespechenie sistemy tekhnicheskogo zreniya. Binarizatsiya polutono-vykh izobrazhenii* [Software of the vision system. Binarization of gray scale images]. Moscow, IPM Publ., 1987. 25 p.

6. Shtar'kov Yu.M. *Universal'noe kodirovanie. Teoriya i algoritmy* [Universal coding. Theory and algorithms]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 279 p. ISBN 978-5-9221-1517-9.

7. Nedbailov A.A. *Skanirovanie i raspoznavanie teksta* [Scanning and text recognition]. Vladivostok, Far Eastern State Technical University Publ., 2001. 61 p. ISBN 5-88871-181-0.

8. Zhadaev A.G. *Skanirovanie i raspoznavanie tekstov* [Scanning and recognition of texts]. Moscow, DMK Publ., 2010. 247 p. ISBN 978-5-94074-595-2.

9. Polilova T.A. *Tekhnologii skanirovaniya izobrazhenii* [Image scanning technologies]. Moscow, Moscow institute of open education Publ., 2004. 32 p. ISBN 5-94898-030-8.

10. Trushin N.G. *Issledovanie peredachi izobrazhenii pri skanirovanii i poluchenii kopii fotosnimkov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Investigation of the transmission of images with scanning and obtaining copies of photos. PhD eng. sci. diss.]. Kemerovo, 2006. 95 p.

11. Gorskii N.D., Anisimov V., Gorskaya L. *Raspoznavanie rukopisnogo teksta: ot teorii k praktike* [Handwriting recognition: from theory to practice]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 1997. 126 p. ISBN 5-7325-0450-8.

12. Litvinyuk S.B. *Razrabotka i issledovanie metodov povysheniya dostovernosti informatsii v sistemakh, ispol'zuyushchikh tekhnologiyu opticheskogo raspoznavaniya simvolov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of methods to improve the reliability of information in systems using optical character recognition technology. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 1999. 161 p.

Для цитирования:

Миловская Ю.В. Обработка сканированного текста // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 91–100. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-91-100.

For citation:

Milovskaya Yu.V. Obrabotka skanirovannogo teksta [Processing scanned text]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 91–100. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-91-100.

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.27(7)

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-101-115

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ ВАРИАНТ АЛГОРИТМА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОИСКА ГЛОБАЛЬНОГО МИНИМУМА*

В.С. ВОРОНОВ

630074, РФ, г. Красноярск, ул. академика Киренского, 26, Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, магистрант кафедры информатики. E-mail: voronov.volodya2013@yandex.ru

В работе рассматривается задача глобальной оптимизации многоэкстремальных функций с помощью алгоритма гравитационного поиска. Классический алгоритм является стохастическим и основан на гравитационном взаимодействии совокупностей масс (зондов) и законах движения. На основе сил определяются векторы скорости и ускорения каждого зонда для дальнейшего его перемещения. Данный алгоритм схож с методом роя частиц, так как базируется на развитии многоагентной системы. В ходе исследования классического алгоритма был выявлен недостаток, связанный с сильным снижением оценки вероятности попадания в глобальный экстремум при наличии аддитивной равномерно распределенной помехе. В связи с этим предложен модифицированный алгоритм. Улучшение основано на внедрении ядерной функции, что позволяет лучше выделять истинный экстремум при воздействии помехи, а также увеличить точность решения при ее отсутствии. Также предлагается использовать динамический закон изменения количества зондов, что повлечет сокращение количества измерений целевой функции по сравнению со статическим количеством точек. Для демонстрации улучшения качества поиска модифицированным алгоритмом в работе приведен пример тестовой функции, сконструированной по методу Бочарова–Фельдбаума и имеющей 10 экстремумов, один из которых является глобальным. Сравнительное исследование двух алгоритмов проводится в одинаковых условиях как без помехи, так и с постоянно нарастающей амплитудой, вплоть до 10-кратного превышения уровня шума над полезным сигналом. Описанные модификации также хорошо подходят для широкого круга алгоритмов как роевого интеллекта, так и других.

Ключевые слова: глобальная оптимизация, метод оптимизации, алгоритм, гравитационный поиск, аддитивная помеха, закон гравитации, ядерная функция, метод Бочарова–Фельдбаума, роевой интеллект, многоэкстремальная функция

* Статья получена 12 сентября 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Задача поиска глобального экстремума целевой функции многих переменных [1] относится к классу сложных. Специфика глобальной оптимизации обусловлена решением практических задач: проектирование конструкций, протекание процессов, выбор оптимальных условий, режимов и параметров функционирования машин и механизмов [2]. Для данной проблемы характерны наличие большого количества переменных непрерывного, дискретного и смешенного типов, многоэкстремальный вид целевой функции, ее разрывный характер, ограниченность множества возможных значений искомым переменных. В реальных условиях воздействие помех при измерении целевой функции встречается повсеместно, будь то погрешность измерительного прибора или воздействие внешних условий. Это в совокупности с незначительной достоверной априорной информацией об объекте влечет за собой существенное ухудшение не только точности решения, но и вероятности нахождения глобального экстремума.

Однако большинство методов и алгоритмов глобальной оптимизации не имеет механизмов, позволяющих нивелировать воздействие помехи, что не позволяет использовать их в задачах, подразумевающих воздействие шума. В связи с этим борьба с помехами и разработка помехоустойчивых алгоритмов являются актуальными направлениями исследований.

Алгоритмы роевого интеллекта [3–5] являются одним из самых распространенных классов алгоритмов. Из данного класса был выбран алгоритм гравитационного поиска как перспективный вариант развития и широко применяемый инструмент в практических задачах (машинное обучение, выбор оптимальных конструкций и др.) [6, 7]. Он показывает лучшие оценку вероятности попадания в глобальный экстремум и скорость сходимости, чем алгоритм роя частиц или генетический алгоритм с вещественным кодированием [8], а также обладает простой структурой.

Алгоритм гравитационного поиска основан на законе гравитационного взаимодействия и законах движения. Он использует теорию ньютоновской физики, где агентами выступают совокупности масс. При этом каждый агент, находясь в изолированной системе, может обмениваться информацией с другими агентами путем силы притяжения, зависящей от массы (основана на значении целевой функции) и расстояния между ними.

В статье представлены следующие разделы. В разделе 1 приведен перечень некоторых обозначений, которые используются в статье. Раздел 2 посвящен краткому описанию стандартного алгоритма гравитационного поиска. В разделе 3 описывается модификация алгоритма глобальной оптимизации

для работы в условиях воздействия помех. В разделе 4 приведен аналитический вид и графическое представление тестовой функции. Заключительный раздел включает результаты тестирования.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть дана целевая функция $f(x)$ и некая область X , где находится единственный глобальный минимум, тогда задачу оптимизации можно записать следующим образом:

$$f(x) = \min_{x \in X} .$$

Здесь $f(x)$ – целевая функция, X – прямоугольная область поиска глобального экстремума, $x = (x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(d)}, \dots, x^{(n)})$ – точка, расположенная в области поиска X (n – размерность задачи оптимизации, т. е. количество переменных).

2. КЛАССИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОИСКА

Оригинальный алгоритм представляет собой последовательность шагов [8]:

1) инициализация системы зондов случайным образом в области поиска:

$$x_{i,0}^{(d)} = u_i^{(d)} (h^{(d)} - l^{(d)}) + l^{(d)}, \quad d = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, N}, \quad u_i^{(d)} \in [0, 1],$$

здесь d – номер параметра; $h^{(d)}$ – ограничение сверху; $l^{(d)}$ – ограничение снизу; u_i – значение случайной величины, имеющей равномерный закон распределения; N – количество точек;

2) расчет значений целевой функции (функции качества) для каждой точки $f_i = f(x_{i,t})$;

3) расчет значения гравитационной постоянной:

$$G_t = G_0 \exp\left(-\alpha \frac{t}{T}\right), \quad \alpha > 0, \quad (1)$$

где α – свободный параметр алгоритма; t – номер текущей итерации; T – общее число итераций; G_0 – начальное значение гравитационной постоянной, настраиваемый параметр алгоритма;

4) нахождение масс (весов) зондов осуществляется по следующей формуле:

$$m_{i,t} = \frac{\mu_{i,t}}{\sum_{i=1}^N \mu_{i,t}}, \quad \mu_{i,t} = \frac{f(x_{i,t}) - \hat{f}_{\max,t}}{\hat{f}_{\min,t} - \hat{f}_{\max,t}}, \quad i = \overline{1, N}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (2)$$

здесь $\hat{f}_{\max,t}$ – максимальное значение оптимизируемой функции на текущей итерации; $\hat{f}_{\min,t}$ – минимальное значение оптимизируемой функции на текущей итерации;

5) вычисление сил гравитационного взаимодействия между зондами и нахождение результирующей силы для каждого зонда:

$$F_{i,j,t}^{(d)} = G_t \frac{m_{i,t} m_{j,t}}{r_{i,j,t} + \varepsilon} (x_{j,t}^{(d)} - x_{i,t}^{(d)}), \quad r_{i,j,t} = \sqrt{\sum_{d=1}^n (x_{j,t}^{(d)} - x_{i,t}^{(d)})^2},$$

$$F_{i,t}^{(d)} = \sum_{i=1, i \neq j}^N u_i^{(d)} F_{i,j,t}^{(d)}, \quad i, j = \overline{1, N}, i \neq j, \quad t = \overline{1, T},$$

здесь ε – малая константа или машинный ноль, т. е. минимальное числовое значение, для которого выполняется условие $1 + \varepsilon > 1$, например, для языка программирования Python 3.6 для чисел типа float $\varepsilon \approx 2,2 \cdot 10^{-16}$;

б) вычисление ускорения (3) и скорости (4) для каждого зонда:

$$a_{i,t}^{(d)} = \frac{F_{i,t}^{(d)}}{m_i}, \quad (3)$$

$$v_{i,t+1}^{(d)} = u_i v_{i,t}^{(d)} + a_{i,t}^{(d)}, \quad v_{i,0}^{(d)} = 0, \quad d = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, N}; \quad (4)$$

7) расчет новых координат зондов производится по следующей формуле:

$$x_{i,t+1}^{(d)} = x_{i,t}^{(d)} + v_{i,t+1}^{(d)};$$

8) если новое положение точки x_i оказывается вне области X , то вернуть точку можно одним из двух вариантов: либо заново случайно расположить в области X , либо расположить на границе:

$$x_{i,t+1}^{(d)} = \begin{cases} l^{(d)}, & x_{i,t+1}^{(d)} \leq l^{(d)}, \\ h^{(d)}, & x_{i,t+1}^{(d)} \geq h^{(d)}; \end{cases}$$

9) повторение шагов 2–8 до выполнения условия останова.

3. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ

Для борьбы с аддитивной помехой, имеющей равномерное распределение и присутствующей в измерениях целевой функции, были протестированы следующие модификации:

а) добавление буфера для измерений различной длины и использование в качестве значения целевой функции среднего значения по буферу;

б) добавление буфера и использование медианы;

в) добавление ядерной функции [9] и использование в качестве аргумента усредненного значения функции;

г) различные сочетания данных способов.

Практика показывает, что лучшим способом для борьбы с помехой является ядерная функция. Несмотря на то что добавление буфера увеличивает количество измерений, данный подход дает результат гораздо хуже, нежели введение ядерной функции. Кроме этого, подходы (а) и (б) ухудшают результаты при использовании в любом сочетании вместе с ядерной функцией, в связи с чем далее будет описан метод интеграции ядерной функции.

Примерами ядерных функций являются:

а) линейные, параболические, кубические и им подобные функции:

$$p_s(g) = (1 - g^r)^s, \quad r = 1, 2, 3, \dots, \quad s > 0; \quad (5)$$

б) экспоненциальные:

$$p_s(g) = \exp(-sg), \quad s > 0; \quad (6)$$

в) гиперболические:

$$p_s(g) = g^{-s}, \quad s > 0; \quad (7)$$

г) степенные:

$$p_s(g) = s^{-g}, \quad s > 0.$$

Графическое представление ядер приведено на рис. 1.

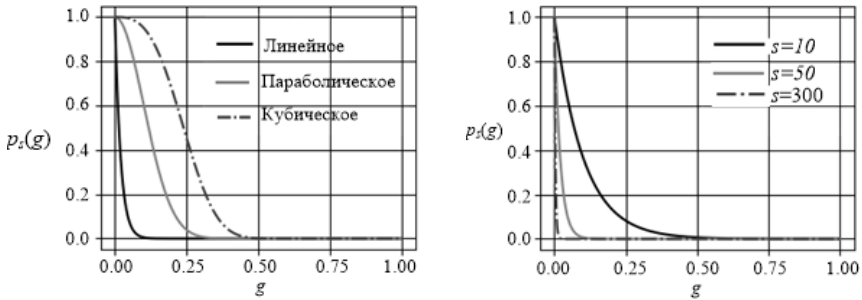


Рис. 1. Ядерные функции (5) при $s = 50$ и экспоненциальная ядерная функция (6) соответственно

Для тестирования модифицированного алгоритма использовались ядра (5), (6) и (7).

Ядра внедрялись в алгоритм на этапе нахождения масс (весов) зондов. Таким образом, выражение (2) можно записать так:

$$m_{i,t} = \frac{p_s(\mu_{i,t})}{\sum_{i=1}^N p_s(\mu_{i,t})}, \quad \mu_{i,t} = \frac{f(x_i) - \hat{f}_{\min,t}}{\hat{f}_{\max,t} - \hat{f}_{\min,t}}, \quad i = \overline{1, N},$$

где $p_s(\mu_{i,t})$ – значение ядерной функции для i -й точки.

Если параметр μ_i оставить, как в формуле (2), то необходимо брать возрастающие ядерные функции.

Кроме внедрения ядерной функции очевидно, что на начальных этапах работы алгоритму требуется больше информации об исследуемом объекте. По мере того как точки будут стягиваться к экстремуму, информации будет требоваться всё меньше. Исходя из этого можно предложить изменять количество точек динамически по мере работы алгоритма. Примером функции,

описывающей изменение количества точек, может служить следующая невозрастающая кусочно-заданная функция:

$$N_t = \begin{cases} 500, & 0 \leq t \leq 30, \\ N_{t-1} - 2, & 30 < t \leq 230, \\ 100, & 230 < t \leq 400, \\ N_{t-1} - 1, & 400 < t \leq 450, \\ 50, & t > 450, \end{cases} \quad (8)$$

где N_t – количество точек на итерации t .

Для более легкого и короткого задания закона изменения точек можно взять невозрастающую на отрезке $[0, 1]$ функцию, например, одно из ядер (5), (6) или (7). Тогда функцию можно представить в следующем виде:

$$\hat{N}_t = p_k \left(\frac{t}{T} \right) (N_0 - N_T) + N_T, \quad N_t = \lfloor \hat{N}_t \rfloor, \quad N_0 > N_T. \quad (9)$$

Здесь N_0 – количество точек на 0-й итерации, а N_T – количество точек на итерации с номером T (конечной), $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округления вниз до ближайшего целого. Вместо коэффициента s в ядерной функции теперь используется параметр k , который определяет, как быстро будет убывать количество точек.

Законы изменения количества точек (8) и (9) позволяют получать большее количество информации об объекте на первых итерациях и уменьшать количество точек при уменьшении области поиска в ходе работы алгоритма. При этом отбрасываются зонды, имеющие худший вес. Это позволяет улучшить результаты в среднем на 5...10 %, а также сократить объем вычислений по сравнению с алгоритмом, использующим постоянное количество точек.

Целочисленную функцию, определенную на отрезке $[0, T]$, а также границы, которые в выражении (8) определены номером итерации алгоритма, можно подбирать экспериментальным путем.

4. ТЕСТОВЫЙ ПРИМЕР

Для тестирования алгоритмов были сконструирована функция по методу Бочарова–Фельдбаума [10]:

$$f(x_1, x_2) = \min \{ \varphi_k(x_1, x_2), k = \overline{1, 10} \}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 6|x_1 + 2|^{0.6} + 6|x_2 - 4|^{1.6}, & \varphi_6 &= 5|x_1|^{1.3} + 5|x_2 + 2|^{1.3} + 8, \\ \varphi_2 &= 6|x_1|^{1.6} + 7|x_2|^2 + 3, & \varphi_7 &= 4|x_1 + 4|^{0.8} + 3|x_2 - 2|^{1.2} + 9, \\ \varphi_3 &= 6|x_1 - 4|^{1.1} + 7|x_2 - 4|^{0.6} + 5, & \varphi_8 &= 2|x_1 - 2|^{0.9} + 4|x_2 + 4|^{0.3} + 10, \\ \varphi_4 &= 5|x_1 - 4|^{1.1} + 5|x_2|^{1.8} + 6, & \varphi_9 &= 6|x_1 - 2|^{1.1} + 4|x_2 - 2|^{1.7} + 11, \\ \varphi_5 &= 5|x_1 + 2|^{0.5} + 5|x_2|^{0.5} + 7, & \varphi_{10} &= 3|x_1 + 4|^{1.2} + 3|x_2 + 2|^{0.5} + 12. \end{aligned}$$

Функция (10) имеет десять несимметрично расположенных минимумов. Глобальный экстремум находится в точке $(-2; 4)$ со значением 0. Остальные девять локальных экстремумов расположены (в порядке возрастания значения функции) в точках: $(0; 0)$, $(4; 4)$, $(4; 0)$, $(-2; 0)$, $(0; -2)$, $(-4; 2)$, $(2; -4)$, $(2; 2)$, $(4; 2)$. С ними можно ознакомиться на графике линий равных уровней (рис. 2 и 3). Также ограничим область поиска экстремумов областью с размером $[-6, 6]^2$.

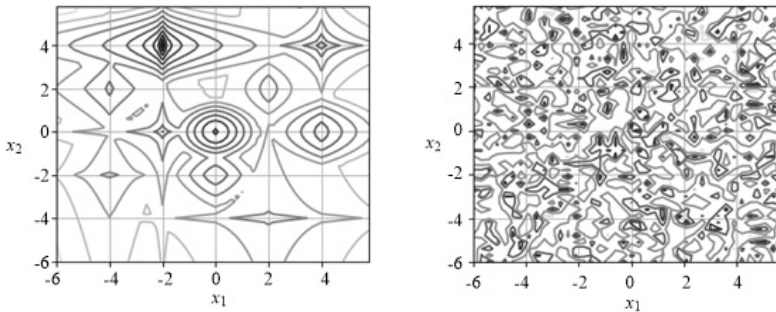


Рис. 2. Линии равных уровней функции (10) без помех и при 1000 % помехе соответственно

Минимальное значение функции в области поиска равно $f(-2, 4) = 0$, а максимальное — 27. Следовательно, амплитуда сигнала будет равна $A_s = (0 + 27) / 2 = 13.5$. Отношение шум/сигнал будет определяться как $k_{SN} = A_n / A_s$, где A_n — амплитуда шума. Тогда аддитивная помеха будет действовать на функцию следующим образом:

$$f_n(x_1, x_2) = f(x_1, x_2) + uA_n, \quad u = U(-1, 1),$$

где $f_n(x_1, x_2)$ – значение функции, подвергшееся воздействию шума; u – случайная величина, имеющая равномерный закон распределения.

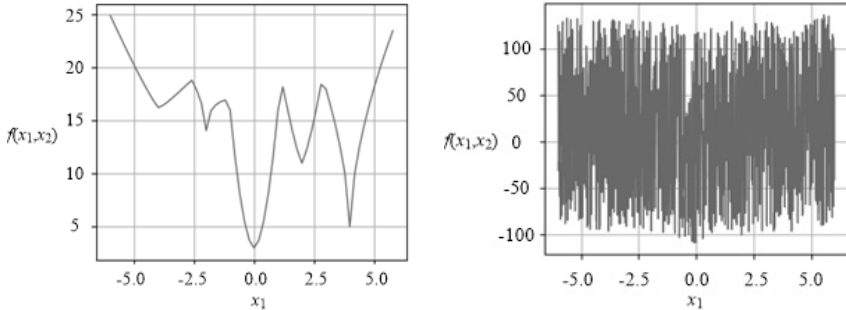


Рис. 3. Срезы функции (10) без помехи и с 1000 % помехой при $x_2 = x_1$ соответственно

Если $A_n = A_s$, то помеха будет 100 %, а если $A_n = 10A_s$, то 1000 %.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Тестирование алгоритмов проводилось при следующих настройках:

- а) количество итераций – 500;
- б) количество точек для стандартного GSA – 200;
- в) закон изменения количества точек для модифицированного GSA (NR-GSA) – (8);
- г) закон изменения гравитационной постоянной – (1);
- д) $G_0 = 100$;
- е) $\alpha = 20$;
- ж) степень влияния расстояния на силу притяжения равна единице;
- з) ядерная функция для NR-GSA – (6);
- и) коэффициент ядра $s = 500$;
- к) при выходе зонда за допустимую область поиска он заново располагается в ее пределах случайным образом;
- л) помеха является аддитивной, подчиняющейся равномерному закону распределения величиной;
- м) критерием останова выступает достижение максимального количества итераций (T).

Качество работы алгоритмов будем оценивать с помощью оценки вероятности попадания в глобальный минимум (\hat{P}_δ). Данная величина рассчитывается по результатам 100 экспериментов как отношение удачных (результат работы алгоритма отличается от истинного не более чем на заданную константу δ) к общему числу экспериментов.

Зададим размер δ -окрестности как относительную величину. Если размер δ -окрестности в размерности задачи будет равен 0.50, тогда размер δ -окрестности в относительных единицах будет равен отношению заданного размера (0.50) и общего размера области поиска для конкретной переменной, которую можно определить по наложенным на нее ограничениям ($-6 \leq x_1, x_2 \leq 6$). Рассчитаем размер δ -окрестности для x_1 и x_2 при желаемой погрешности 0.50, он будет равен 0.50/12 или 0.042. По аналогии размеры определены для величин 0.25 и 0.10.

Ниже приведены результаты тестов двух алгоритмов при различной точности и без влияния помех.

Т а б л и ц а 1

Результаты тестирования без помехи при разной точности

Алгоритм	δ	\hat{P}_δ	Минимальное значение	Координата
Standard GSA	0.042	1.00	0.0598	[-1.9777; 4.0292]
	0.021	0.98		
	0.008	0.64		
NR-GSA	0.042	1.00	0.0485	[-2.0001; 4.0266]
	0.021	1.00		
	0.008	0.80		

Стоит учесть, что если объект не подвержен помехам, не стоит использовать большое количество точек. Оценка вероятности для алгоритма гравитационного поиска слабо зависит от этого параметра. Оценка вероятности ведет себя стабильно при $N \geq 30$, показывая результат в 0.95–1.00. Для достижения приемлемого результата (оценка вероятности равна 0.95–1.00) для большинства задач достаточно использовать 50 точек при 500 итерациях, дальнейшее увеличение количества зондов нецелесообразно.

В табл. 2 приведены результаты тестирования модифицированного алгоритма (NR-GSA) с различными ядрами и при разном уровне помех.

Таблица 2

Результаты тестирования NR-GSA с различными ядрами при помехах

Ядро \ Уровень помех	\hat{P}_8						
	100 %	200 %	300 %	400 %	500 %	600 %	700 %
Линейное	1.00	0.98	0.96	0.87	0.81	0.81	0.81
Параболическое	0.99	0.94	0.91	0.89	0.84	0.83	0.76
Кубическое	1.00	0.92	0.89	0.86	0.83	0.77	0.73
Экспоненциальное	1.00	0.97	0.93	0.94	0.88	0.87	0.83
Степенное	0.97	0.93	0.87	0.85	0.75	0.71	0.67
Гиперболическое	0.38	0.27	0.22	0.16	0.17	0.13	0.07

Результаты, приведенные в табл. 2, показывают, что для данной тестовой задачи, а также для похожих задач наиболее подходящими являются линейное и экспоненциальное ядра. Данные ядра обладают наиболее медленной скоростью ухудшения результата. Самые худшие показатели оценки вероятности принадлежат гиперболическому ядру. Это может объясняться тем, что скорость его убывания по отношению к остальным является самой медленной.

Кроме этого, стоит отметить, что линейное и экспоненциальное ядра слабо подвержены варьированию коэффициента s . Многочисленные тесты показывают, что вышеупомянутые ядерные функции дают стабильный результат при $s \geq 40$. Все остальные ядра сильно чувствительны к значению параметра s . При их использовании приемлемого результата можно добиться при $s \geq 300$.

Ниже приведено сравнение алгоритмов GSA и NR-GSA (с использованием экспоненциального ядра).

Из рис. 4 видно, что модифицированный алгоритм позволяет улучшить оценку вероятности попадания в глобальный минимум более чем в два раза (при десятикратной помехе) по сравнению с базовым алгоритмом.

Для наглядного представления влияния коэффициента s и уровня помехи на оценку вероятности при использовании экспоненциального ядра построена тепловая карта (рис. 5).

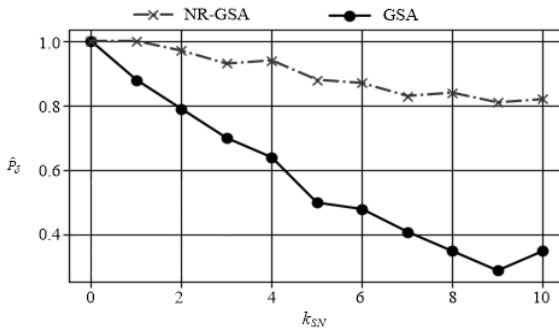


Рис. 4. Зависимость оценки вероятности попадания в окрестность глобального минимума от уровня помех для стандартного алгоритма гравитационного поиска (GSA) и его модификации (NR-GSA)

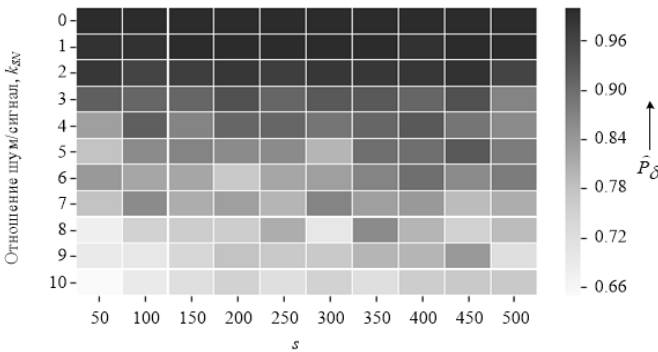


Рис. 5. Зависимость оценки вероятности попадания в окрестность глобального минимума от уровня помех и степени ядра s

Из рис. 5 видно, что для хорошей работы экспоненциальное ядро слабо реагирует на изменение коэффициента s , однако при $s < 300$ оценка вероятности немного ниже, чем при $s \geq 300$.

Общая динамика показывает, что при небольших уровнях помех ($0 \leq k_{SN} \leq 2$) оценка вероятности близка к единице, но при увеличении интенсивности шума \hat{P}_δ начинает снижаться. Также видно, как высокий коэффициент $s \geq 350$ замедляет снижение \hat{P}_δ в диапазоне $3 \leq k_{SN} \leq 7$.

Если сравнить рис. 4 и столбец тепловой карты рис. 5 при $s = 500$, можно увидеть, что они идентичны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы появляется всё больше алгоритмов глобальной оптимизации, однако проблеме оптимизации в условиях воздействия помех уделяется мало внимания. В данной статье предлагается модификация одного популярного алгоритма глобальной оптимизации. Модификация заключается во введении ядерной функции в алгоритм, что позволяет улучшить его устойчивость к аддитивной, равномерно распределенной помехе и добиться приемлемого результата даже в условиях сильной зашумленности основного сигнала. Для оценки модифицированного алгоритма она была протестирована со стандартным алгоритмом в идентичных условиях на многоэкстремальной тестовой функции. Предложенная в статье модификация подходит для широкого круга алгоритмов класса роевого интеллекта, и не только.

В данном направлении и дальше необходимо совершенствовать алгоритмы, например, придать стабильности при высоких уровнях помех, а также сокращать количество измерений целевой функции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Horst R., Tuy H.* Global optimization: deterministic approaches. – 3rd ed. – Berlin: Springer, 1996. – 729 p.
2. *Растригин Л.А.* Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
3. *Kennedy J., Eberhart R.C.* Particle swarm optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948.
4. *Karaboga D.* An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: technical report TR-06 / Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. – Kayseri, Türkiye, 2005.
5. *Castro L.N. de, Timmis J.* Artificial immune systems: a new computational intelligence approach. – London: Springer, 2003. – 364 p.
6. *Shams M., Rashedi E., Hakimi A.* Clustered-gravitational search algorithm and its application in parameter optimization of a low noise amplifier // Applied Mathematics and Computation. – 2015. – Vol. 258. – P. 436–453.
7. *Yildiz B.S., Lekesiz H., Yildiz A.R.* Structural design of vehicle components using gravitational search and charged system search algorithms // Component Design. – 2016. – Vol. 1. – P. 79–81.
8. *Rashedi E., Nezamabadi-pour H., Saryazdi S.* GSA: a gravitational search algorithm // Information Sciences. – 2009. – Vol. 179. – P. 2232–2248.

9. Рубан А.И. Глобальная оптимизация методом усреднения координат: монография. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – 303 с.

10. Бочаров И.Н., Фельдбаум А.А. Автоматический оптимизатор для поиска минимального из нескольких минимумов (глобальный оптимизатор) // Автоматика и телемеханика. – 1962. – № 3. – С. 289–301.

Воронов Владимир Сергеевич, магистрант кафедры информатики Сибирского федерального университета, Институт космических и информационных технологий. E-mail: voronov.volodya2013@yandex.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-101-115

Noise resistant a gravity search algorithm *

V.S. Voronov

Siberian Federal University, 26 Academician Kirensky street, Krasnoyarsk, 630074, Russian Federation, undergraduate student, e-mail: voronov.volodya2013@yandex.ru

The paper considers the problem of global optimization of multi-extremal functions using the gravitational search algorithm. The classical algorithm is stochastic and is based on the gravitational interaction of masses and the laws of motion. In the course of the study of the classical algorithm, a shortcoming was revealed. It is associated with a strong decrease in the probability of falling into the global extremum in the presence of additive noise. In connection with which a modified algorithm is proposed. The improvement is based on the introduction of nuclear function. This makes it possible to better determine the global extremum under the influence of noise. It is also proposed to use the dynamic law of changing the number of probes. This will reduce the number of measurements of the objective function. An example of a test function is given for testing algorithms. It has 10 extremes, one of which is global. A comparative study of the two algorithms is conducted under the same conditions.

Keywords: global optimization, optimization method, algorithm, Gravitational Search Algorithm, additive interference, law of gravity, nuclear function, swarm intelligence, multiextremal function

REFERENCES

1. Horst R., Tuy H. *Global optimization: deterministic approaches*. 3rd ed. Berlin, Springer, 1996. 729 p.
2. Rastrigin L.A. *Adaptatsiya slozhnykh sistem* [Adaptation of complex systems]. Riga, Zinatne Publ., 1981. 375 p. (In Russian).

* Received 12 September 2018.

3. Kennedy J., Eberhart R.C. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948.
4. Karaboga D. *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*. Technical Report TR-06. Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. Kayseri, Türkiye, 2005.
5. Castro L.N. de, Timmis J. *Artificial immune systems: a new computational intelligence approach*. London, Springer, 2003. 364 p.
6. Shams M., Rashedi E., Hakimi A. Clustered-gravitational search algorithm and its application in parameter optimization of a low noise amplifier. *Applied Mathematics and Computation*, 2015, vol. 258, pp. 436–453.
7. Yildiz B.S., Lekesiz H., Yildiz A.R. Structural design of vehicle components using gravitational search and charged system search algorithms. *Component Design*, 2016, vol. 1, pp. 79–81.
8. Rashedi E., Nezamabadi-pour H., Saryzadi S. GSA: a gravitational search algorithm. *Information Sciences*, 2009, vol. 179, pp. 2232–2248.
9. Ruban A.I. *Global'naya optimizatsiya metodom usredneniya koordinat* [Global optimization by a method of averaging of coordinates]. Krasnoyarsk, KSTU Publ., 2004. 303 p.
10. Bocharov I.N., Fel'dbaum A.A. Avtomaticheskii optimizator dlya poiska minimal'nogo iz neskol'kikh minimumov (global'nyi optimizator) [Automatic optimizer for search minimum from several minima (global optimizer)]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 1962, no. 3, pp. 289–301. (In Russian).

Для цитирования:

Воронов В.С. Помехоустойчивый вариант алгоритма гравитационного поиска глобального минимума // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3 (93). – С. 101–115. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-101-115.

For citation:

Voronov V.S. Pomekhoustoichiviy variant algoritma gravitatsionnogo poiska global'nogo minimuma [Noise resistant a gravity search algorithm]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (93), pp. 101–115. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-101-115.

ВЫБОР КЛЮЧЕЙ ШИФРОВАНИЯ ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ*

Б.И. ФИЛИПPOB¹, А.С. ШЕДРИНА²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доцент, кандидат технических наук. E-mail: filippovboris@rambler.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры защиты информации. E-mail: miss.shedrina@mail.ru

Наиболее подходящим алгоритмом для шифрования в гидроакустическом канале связи является шифр RC4. Он позволяет достаточно быстро шифровать и дешифровать информацию и применять ключи с переменной длиной. Но даже этот алгоритм нуждается в доработках. Главная проблема – генерирование эффективных ключей. Они обычно формируются генераторами псевдослучайных последовательностей (ПСП), и важно, чтобы эти генераторы генерировали «чисто» случайные последовательности для наибольшей стойкости шифра. Кроме того, нужно учитывать, что может возникнуть потребность менять размеры ключей в диапазоне от 5 до 64 байт в зависимости от расстояния между объектами и скорости их движения, что позволит выбирать ключ либо большей, либо меньшей длины. Второе – это необходимость синхронизации при передаче и приеме сообщений, поэтому обязательна жесткая система синхронизации. Для получения наилучшей шифрограммы и, соответственно, обеспечивающей наивысший уровень защиты передаваемой информации был проведен сравнительный анализ схем построения генераторов ПСП. Приведенный анализ позволяет сделать вывод, что для повышения стойкости алгоритмов шифрования речи рекомендуется использовать схему Фибоначчи. Кроме того, для схемы Фибоначчи была проведена оценка степени влияния на характеристики генераторов ПСП количества порождающих полиномов. Анализ остаточной разборчивости показал, что в зашифрованном файле нельзя разобрать ни одного слова, следовательно, остаточная разборчивость равна нулю, что подтверждает эффективность предлагаемого метода защиты информации.

Ключевые слова: алгоритм шифрования, алгоритм дешифрования, псевдослучайная последовательность, ключи шифрования, шифрограмма, генераторы псевдослучайных последовательностей, порождающий полином, синхропосылка, криптографическая стойкость

* Статья получена 19 декабря 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Особенности гидроакустических каналов связи были рассмотрены в работах [1–11]. В частности, в [1, 2] исследовались статистические характеристики сигналов и помех, в [3, 4] – принципы построения гидроакустических систем и их энергетические характеристики, в [8, 9] рассмотрены вопросы надежности подобных систем, в [10, 11] – вопросы применения помехоустойчивого кодирования.

Данная работа посвящена вопросам криптографической защиты таких каналов. Наиболее подходящим алгоритмом для шифрования в гидроакустическом канале связи является шифр RC4 [5, 12, 13]. Он позволяет достаточно быстро шифровать и дешифровывать данные и может применяться с переменной длиной ключа. Но даже этот алгоритм нуждается в доработках. Первое, что хочется отметить, это ключ. Он обычно формируется через генератор псевдослучайных последовательностей, и важно, чтобы этот генератор выдавал «чисто» случайные последовательности для наибольшей стойкости шифра. Кроме того, необходимо учитывать, что размеры ключа могут быть в диапазоне от 5 до 64 байт, поэтому в зависимости от расстояния между объектами и скорости их движения можно выбирать ключ либо большей, либо меньшей длины. Второе – это необходимость синхронизации при передаче и приеме сообщений. То есть необходимо разработать жесткую систему синхронизации, чтобы из всех принимаемых сигналов можно было принять верный.

В данной работе рассмотрим возможные пути уменьшения влияния первой проблемы (генерация псевдослучайных последовательностей).

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЕ

При синтезе и реализации криптографических модулей весьма важную роль играет выработка и распределение криптографически значимой информации (ключей, синхропосылок и т. п.). Важную и криптографически значимую роль играет выработка случайного числа, используемого для «индивидуализации» процесса подписи каждого сообщения.

Для решения задач создания (формирования) ключевой информации применяются различного рода генераторы псевдослучайных чисел, которые делятся на два больших класса – программные и аппаратные [13]. В аппаратных генераторах источником случайного процесса является шум в электронных приборах. Очевидно, применение аппаратных генераторов требует наличия специального оборудования. Обычно для генерации последовательности псевдослучайных чисел применяют компьютерные программы, которые на самом деле выдают детерминированные числовые последовательности, по своим свойствам похожие на случайные.

Генерируемые псевдослучайные ряды чисел часто называют гаммой шифра или просто гаммой (от буквы γ греческого алфавита, часто используемой в математических формулах для обозначения случайных величин).

К криптографически стойкому генератору псевдослучайной последовательности чисел (гаммы шифра) предъявляются три основных требования:

- период гаммы должен быть достаточно большим для шифрования сообщений различной длины;
- гамма должна быть практически непредсказуемой, что означает невозможность предсказать следующий бит гаммы, даже если известны тип генератора и предшествующий отрезок гаммы;
- генерирование гаммы не должно вызывать больших технических сложностей.

Длина периода гаммы является наиболее значимой характеристикой генератора псевдослучайных чисел. По окончании периода числа начнут повторяться, и их можно будет предсказать. Требуемая длина периода гаммы определяется степенью закрытости данных. Чем длиннее ключ, тем труднее его подобрать. Длина периода гаммы зависит от выбранного алгоритма получения псевдослучайных чисел.

Второе требование связано со следующей проблемой: как можно достоверно убедиться, что псевдослучайная гамма конкретного генератора является действительно непредсказуемой. В настоящее время не существуют такие универсальные и практически проверяемые критерии и методики. Чтобы гамма считалась непредсказуемой, т. е. истинно случайной, необходимо, чтобы ее период был очень большим, а различные комбинации битов определенной длины были равномерно распределены по всей ее длине.

Третье требование обуславливает возможность практической реализации генератора программным или аппаратным путем с обеспечением необходимого быстродействия.

Таким образом, независимо от выбранного алгоритма необходимо выбрать генератор случайных последовательностей. Для этого рассмотрим некоторые из них.

Линейный конгруэнтный генератор. Из известных процедур генерации последовательности псевдослучайных целых чисел наиболее часто применяется так называемый линейный конгруэнтный генератор. Этот генератор вырабатывает последовательность псевдослучайных чисел $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_{i-1}, Y_i, \dots$, используя соотношение

$$Y_i = (aY_{i-1} + b) \bmod m, \quad (1)$$

где Y_i – текущее число последовательности; Y_{i-1} – предыдущее число последовательности; a, b – константы; m – модуль; a – множитель (коэффициент); b – приращение; Y_0 – порождающее число (исходное значение).

Уравнение (1) генерирует псевдослучайные числа с периодом повторения, который зависит от выбираемых значений параметров a, b, m . Если a, b, m выбраны правильно, то генератор будет с максимальным периодом (например, b должно быть взаимно простым с m , а коэффициент a должен быть нечетным числом). Значение модуля m берется равным $2n$ либо равным простому числу.

Преимуществом линейных конгруэнтных генераторов является их быстрота за счет малого количества операций на бит.

Конгруэнтные генераторы, работающие по алгоритму, предложенному Национальным бюро стандартов США, используются, в частности, в системах программирования [12]. Эти генераторы имеют длину периода 224 и обладают хорошими статистическими свойствами. Однако такая длина периода мала для криптографических применений. Кроме того, доказано, что последовательности, генерируемые конгруэнтными генераторами, не являются криптографически стойкими.

Однако линейные конгруэнтные генераторы сохраняют свою полезность для некриптографических приложений (например, для моделирования). Они эффективны в большинстве используемых эмпирических тестов и демонстрируют хорошие статистические характеристики.

Линейные рекуррентные регистры. Существует способ генерации последовательностей псевдослучайных чисел на основе линейных рекуррентных соотношений.

Рассмотрим рекуррентные соотношения через их разностные уравнения:

$$\sum_{j=0}^k h_j a_{i+j} = 0, \quad (2)$$

$$a_{i+k} = -\sum_{j=0}^{k-1} h_j a_{i+j},$$

где $h_0 \neq 0$, $h_k = 1$, и каждое h_i принадлежат полю $\text{GF}(q)$.

Решением этих уравнений является последовательность элементов a_0, a_1, a_2, \dots поля $\text{GF}(q)$. Соотношение (2) определяет правило вычисления a_k по известным значениям величин $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{k-1}$. По известным зна-

числениям $a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$ находят a_{k+1} и т. д. В результате по начальным значениям $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{k-1}$ можно построить бесконечную последовательность, причем каждый ее последующий член определяется из k предыдущих. Последовательности такого вида легко реализуются на компьютере, при этом реализация получается особенно простой, если все h_i и a_i значения 0 и 1 из поля $GF(2)$.

На рис. 1 показана линейная последовательная переключательная схема, которая может быть использована для вычисления суммы и, следовательно, для вычисления значения a_k по значениям k предыдущих членов последовательности.

Исходные величины $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{k-1}$ помещаются в разряды сдвигового регистра, последовательные сдвиги содержимого которого соответствуют вычислению последовательных символов, при этом выход после i -го сдвига равен a_i . Данное устройство называют генератором последовательности чисел, построенным на базе линейного сдвигового регистра с обратной связью (linear feedback shift register, LFSR).

Как правило, в реальных криптосхемах линейный регистр сдвига с обратной связью (рис. 1) реализуется в одной из двух различных конструкций, именуемых, соответственно, регистрами Фибоначчи или Галуа. Все наиболее важные теоретические результаты справедливы для обоих типов [14].

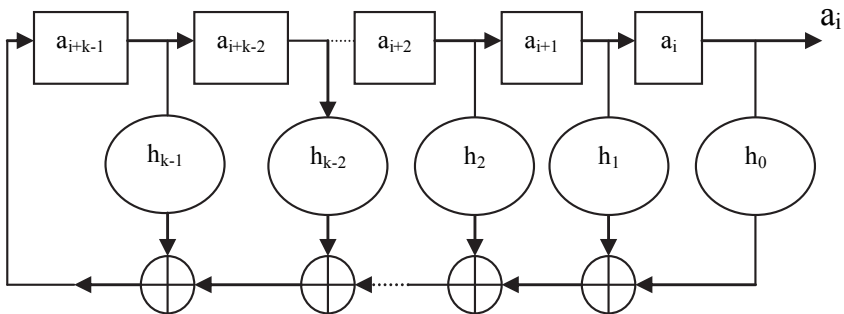


Рис. 1. Генератор с регистром сдвига

Регистры Фибоначчи. В литературе значительно чаще обращаются к регистрам Фибоначчи. Функция обратной связи здесь – простое сложение операций XOR (исключающее или) определенных битов регистра. Перечень этих битов называется отводной последовательностью. Схема регистра Фибоначчи показана на рис. 2.

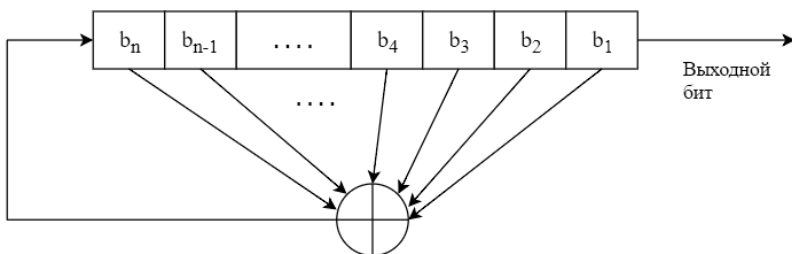


Рис. 2. Регистр Фибоначчи

N -битовый LFSR может находиться в одном из $(2^n - 1)$ внутренних состояний. Это означает, что теоретически такой регистр может генерировать псевдослучайную последовательность с периодом $(2^n - 1)$ битов. Только при определенных отводных последовательностях LFSR циклически пройдет через все $(2^n - 1)$ внутренних состояний. Такие LFSR являются LFSR с максимальным периодом. Для того чтобы LFSR имел максимальный период, многочлен, образованный от отводной последовательности и константы 1, должен быть примитивен по модулю 2. Степень многочлена является длиной сдвигового регистра. Примитивный многочлен степени n – это неприводимый многочлен, который является делителем $(x^{2^n-1} + 1)$, но не является делителем $x^d + 1$ для всех d , являющихся делителями $(2^n - 1)$.

В общем случае не существует простого способа генерировать примитивные многочлены данной степени по модулю 2. Проще всего выбирать многочлен случайным образом и проверять, не является ли он примитивным.

Примеры некоторых примитивных полиномов приведены в таблице.

Примитивные полиномы

Длина периода	Многочлен
22 – 1	(2, 1, 0)
23 – 1	(3, 1, 0)
24 – 1	(4, 1, 0)
25 – 1	(5, 2, 0)
26 – 1	(6, 1, 0)
27 – 1	(7, 1, 0)
28 – 1	(8, 6, 5, 1, 0)

Окончание таблицы

Длина периода	Многочлен
211 – 1	(11, 2, 0)
212 – 1	(12, 7, 4, 3, 0)
213 – 1	(13, 4, 3, 1, 0)
214 – 1	(14, 12, 11, 1, 0)
216 – 1	(16, 5, 3, 2, 0)
218 – 1	(18, 7, 0)
220 – 1	(20, 3, 0)
221 – 1	(21, 2, 0)
222 – 1	(22, 1, 0)
223 – 1	(23, 5, 0)
224 – 1	(24, 4, 3, 1, 0)
225 – 1	(25, 3, 0)
227 – 1	(27, 8, 7, 1, 0)
230 – 1	(30, 16, 15, 1, 0)
231 – 1	(31, 3, 0)
232 – 1	(32, 7, 6, 2, 0)

Например, запись (14, 12, 11, 1, 0) означает, что следующий многочлен примитивен по модулю 2: $x^{14} + x^{12} + x^{11} + x + 1$.

Первым числом является длина LFSR. Последнее число всегда равно нулю, и его можно опустить. Все числа, за исключением 0, задают отводную последовательность, отсчитываемую от левого края регистра. Далее запись (14, 12, 11, 1, 0) означает, что для взятого 32-битового регистра сдвига новый бит генерируется с помощью XOR четырнадцатого, двенадцатого, одиннадцатого и первого битов и результирующая последовательность будет иметь максимальный период – она пройдет через $(2^{14} - 1)$ значений до того, как начнет повторяться.

Следует отметить, что все полиномы обратной связи, приведенные в таблице, являются прореженными, то есть имеют лишь несколько ненулевых коэффициентов. Прореженность – это всегда источник слабости, облегчающей вскрытие такого алгоритма генерации. Для криптографических алгоритмов лучше использовать плотные примитивные многочлены, генерировать которые по модулю 2 нелегко. В общем случае для генерации примитивных многочленов степени k нужно знать разложение на множители числа $(2^k - 1)$.

Регистры Галуа. Схему обратной связи LFSR можно модифицировать. Получающийся генератор не будет криптографически более надежным, но он всё еще будет обладать максимальным периодом, и его легче реализовать программно.

Вместо использования для генерации нового крайнего левого бита отводной последовательности выполняется XOR каждого бита отводной последовательности с выходом генератора и замена его результатом действия, затем результат генератора становится новым крайним левым битом. Схема регистра Галуа показана на рис. 3.

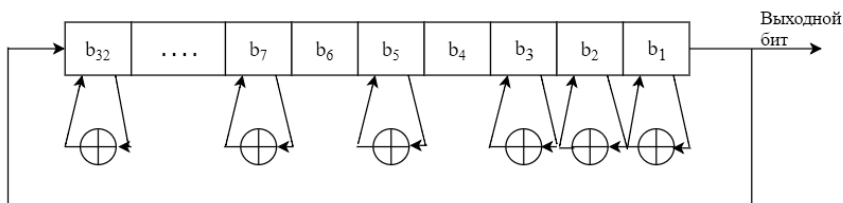


Рис. 3. Регистр Галуа

Таким образом, в отличие от регистра Фибоначчи, где обратная связь является функцией от всех ячеек в регистре, а результат помещается в самую левую ячейку, обратная связь в регистре Галуа потенциально применима к каждой ячейке регистра, хотя является функцией только от самой правой ячейки [15]. Выигрыш здесь в том, что все операции XOR можно выполнять как одну операцию.

Подводя общий итог, можно сказать, что если используется элементная база с быстрой реализацией сдвигов, то следует обратиться к регистрам Фибоначчи; если же есть возможность применить распараллеливание, то лучший выбор – регистр Галуа.

Но как бы хорошо не был подобран полином обратной связи, регистр сдвига с обратной связью (LFSR) остается линейным устройством. А такие устройства обычно легко поддаются криптоанализу независимо от того, насколько много параметров сохраняется в тайне. В современной криптографической литературе регистры сдвига с линейной обратной связью, как и линейные конгруэнтные генераторы, сами по себе не рекомендуются в качестве генераторов псевдослучайных шифрующих последовательностей. В то же время подавляющее большинство реальных конструкций для поточного шифрования (гаммирования) строится на основе LFSR.

Использование LFSR в программной реализации криптосхем намного проблематичней. Эффективны по скорости лишь прореженные полиномы, но

они слабы в отношении корреляционных атак; плотные же полиномы обратной связи слишком неэффективны. Стандартный поточный шифр выдает по одному биту за раз, и этот алгоритм приходится итерировать 64 раза для шифрования, а DES это делает за одну итерацию. Фактически оказывается, что несложный LFSR-алгоритм типа сжимающего генератора в программной реализации оказывается не быстрее, чем значительно более сложный DES.

Генератор Геффа. В этом генераторе потока ключей используются три LFSR, объединенные нелинейным образом. Два LFSR являются входами мультиплексора, а третий LFSR управляет выходом мультиплексора. Схема генератора Геффа показана на рис. 4. Если a_1, a_2, a_3 – выходы трех LFSR, выход генератора Геффа можно описать выражением [14]:

$$b = (a_1^{a_2}) + (-a)^{a_3}. \quad (3)$$

Если длины LFSR равны n_1, n_2, n_3 соответственно, то линейная сложность генератора равна [6]:

$$(n_1 + 1)n_2 + n_1n_3. \quad (4)$$

Период генератора равен наименьшему общему делителю периодов трех генераторов. При условии, что степени трех примитивных многочленов обратной связи взаимно просты, период этого генератора будет равен произведению периодов трех LFSR.

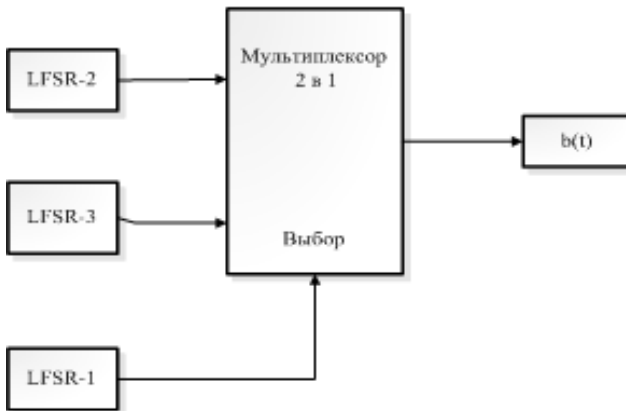


Рис. 4. Генератор Геффа

Хотя этот генератор неплохо выглядит на бумаге, он криптографически слаб и не может устоять против корреляционного вскрытия. В 75 % времени выход генератора равен выходу LFSR-2. Поэтому если известны отводные последовательности обратной связи, можно догадаться о начальном значении LFSR-2 и сгенерировать выходную последовательность этого регистра. Тогда можно подсчитать, сколько раз выход LFSR совпадает с выходом генератора. Если начальное значение определено неверно, две последовательности будут согласовываться в 50 % времени, а если правильно, то в 75 % времени.

Аналогично, выход генератора равен выходу LFSR в 75 % отсчетов времени. С такими корреляциями генератор потока ключей может быть легко взломан.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Для построения генератора ПСП, позволяющего получить наилучшую шифрограмму и, соответственно, наивысший уровень защиты передаваемой речи, был проведен сравнительный анализ схем построения генераторов ПСП [16]. Как было описано выше, на сегодняшний день применяются две схемы построения: схема Галуа и схема Фибоначчи. Результаты тестирования характеристик каждой из схем для одинаковых исходных порождающих полиномов генератора Геффа приведены ниже.

Для проверки частот встречаемости символов были оценены длины серий «1» и «0», частота биграмм и триграмм. Результаты исследования параметров генератора Геффа на основе схемы Фибоначчи приведены на рис. 5–7.

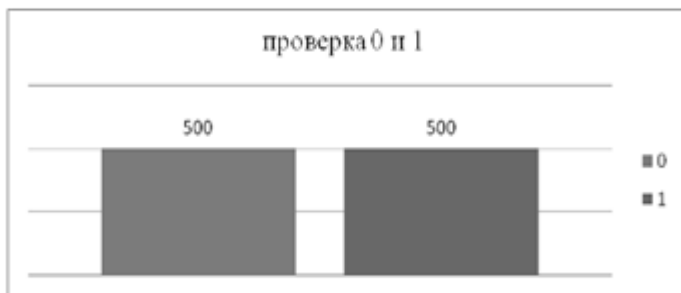


Рис. 5. Проверка серий для генератора Геффа (схема Фибоначчи)

Те же самые тесты были проведены для регистра Галуа [16], результаты испытаний показаны на рис. 8–10.

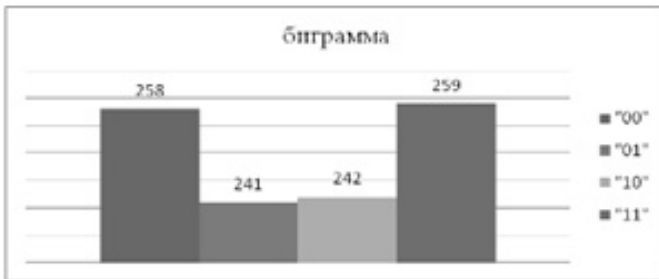


Рис. 6. Частота встречаемости биграмм для генератора Геффа (схема Фибоначчи)

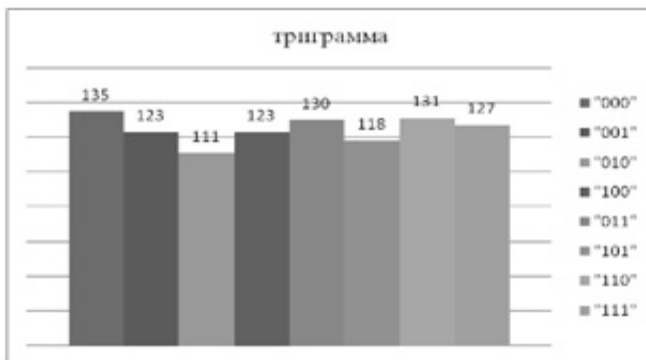


Рис. 7. Частота встречаемости триграмм для генератора Геффа (схема Фибоначчи)

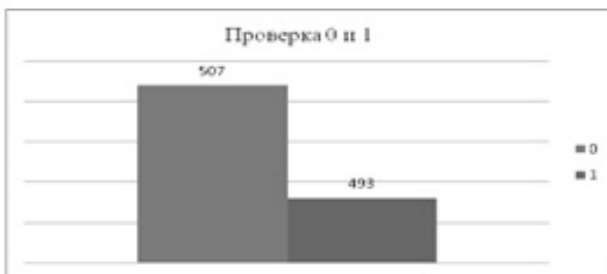


Рис. 8. Проверка серий для генератора Геффа (схема Галуа)

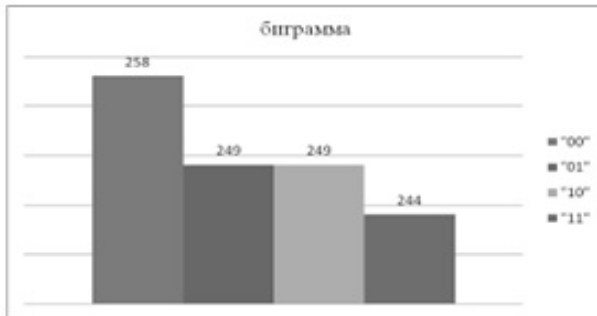


Рис. 9. Частота встречаемости биграмм для генератора Геффа (схема Галуа)

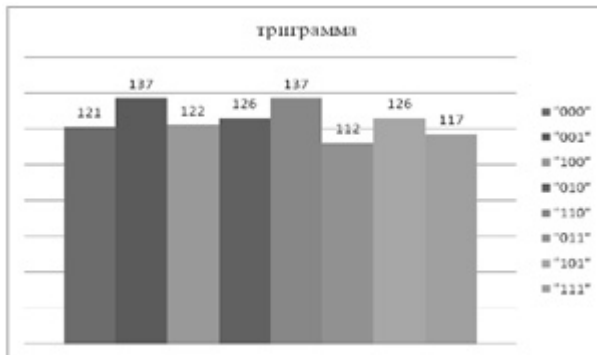


Рис. 10. Частота встречаемости триграмм для генератора Геффа (схема Галуа)

По полученным результатам можно сделать следующие выводы.

1. Сравнение частоты встречаемости символов (проверка серий) показывает значительное преимущество схемы Фибоначчи, у которой выборка с длиной периода в 1000 символов состоит поровну из «1» и «0», в то время как у схемы Галуа имеет место значительный перекоп в сторону нулевых элементов.

2. Сравнительный анализ биграмм позволяет отдать незначительное преимущество схеме построения Галуа. Поскольку преимуществом схемы Фибоначчи является совпадение частоты встречаемости двух пар биграмм, имеет место больший разброс относительно среднего значения и, следовательно, высокая частота встречаемости одной из биграмм. В схеме Галуа пара

биграмм имеет одинаковую частоту встречаемости, а оставшиеся биграммы имеют небольшие отклонения от центральной частоты.

3. Анализ триграмм не позволяет отдать преимущество ни одной из схем, поскольку в обеих схемах разница между максимальным и минимальным значениями частоты встречаемости практически одинакова.

Приведенный анализ позволяет сделать вывод, что для повышения стойкости алгоритмов шифрования речи рекомендуется использовать схему Фибоначчи.

Кроме того, для схемы Фибоначчи была проведена оценка степени влияния на характеристики генераторов ПСП количества порождающих полиномов.

Для этого в схеме генератора Геффа в качестве порождающего во всех трех регистрах использовался в первом случае один полином вида

$$x^{24} + x^4 + x^3 + x + 1, \quad (5)$$

а во втором случае – три различных полинома вида

$$\begin{aligned} x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{14} + 1, \\ x^{22} + x^{21} + 1, \\ x^{23} + x^{22} + x^{18} + x^7 + 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты исследований приведены на рис. 11–13.

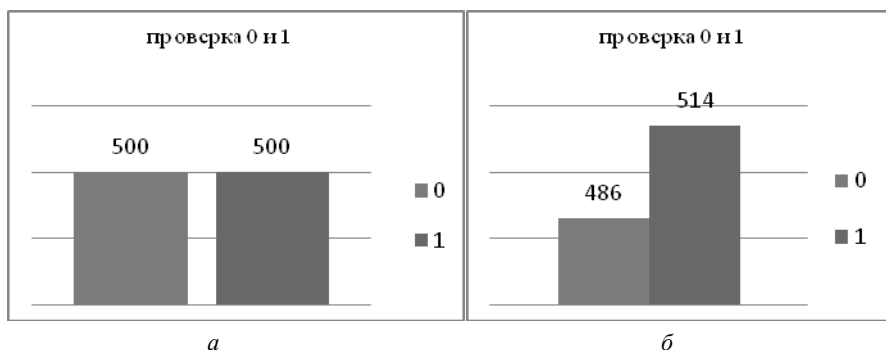


Рис. 11. Результаты проверки серий для генератора Геффа, собранного с использованием одного (а) и трех порождающих (б) полиномов

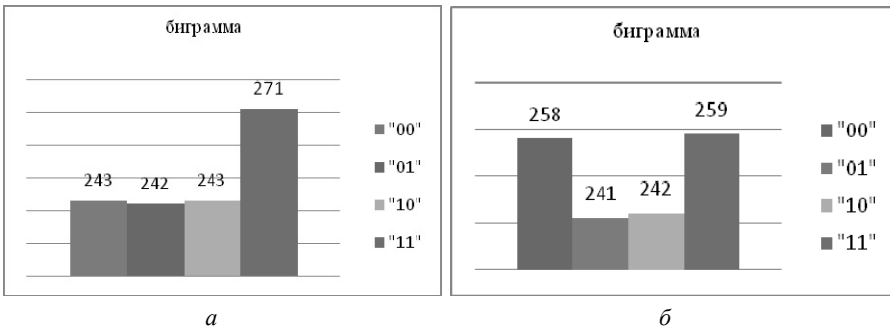


Рис. 12. Анализ частот встречаемости биграмм для генератора Геффа, собранного с использованием одного (а) и трех порождающих (б) полиномов

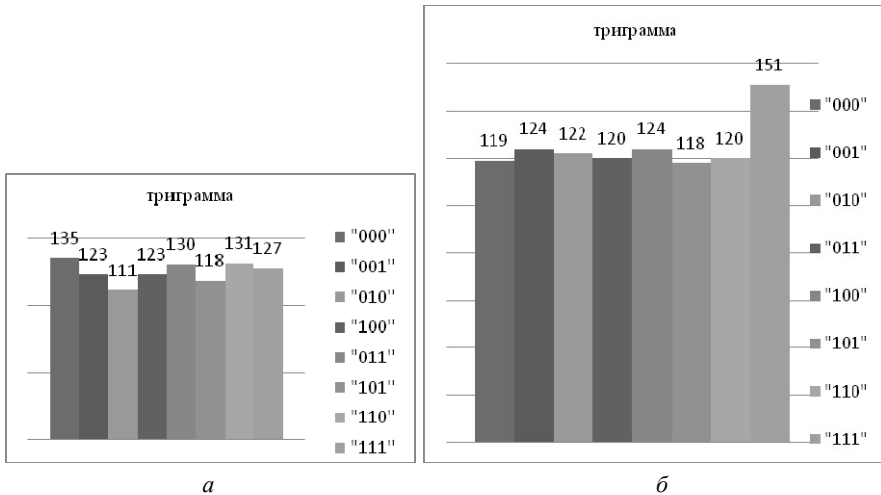


Рис. 13. Анализ частот встречаемости триграмм для генератора Геффа, собранного с использованием одного (а) и трех порождающих (б) полиномов

Результаты исследований показывают, что значительно лучшие характеристики ПСП обеспечивает использование одного регистра. Однако полученные результаты не могут полностью считаться объективными, поскольку полученные значения зависят от типа используемого генератора и степени используемых полиномов.

Для предлагаемой схемы защиты речи необходим анализ уровня защиты. Для этого была проанализирована остаточная разборчивость речевого фраг-

мента (отношение количества слов, которые могут правильно восприняты после шифрования к общему числу переданных слов), дешифрованного при помощи генератора Геффа на основе регистров Фибоначчи. Выбор данного генератора обуславливается приведенным выше сравнительным анализом схем включения и количества генераторов.

Для анализа защищенности речевой файл был просуммирован по модулю 2 с ПСП.

Результаты испытаний приведены на рис. 14 и 15.

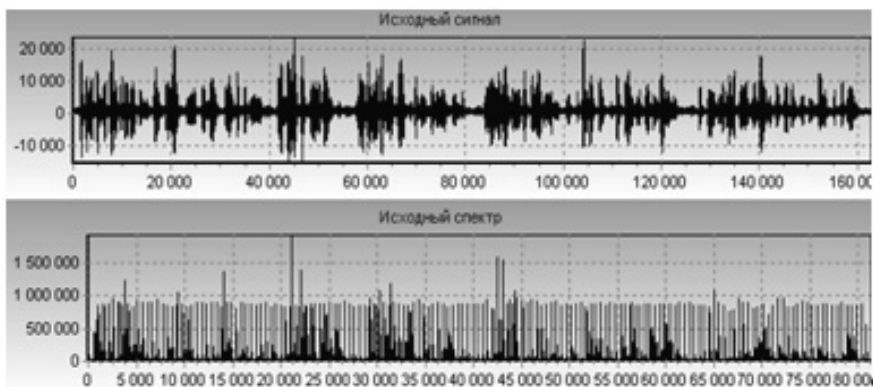


Рис. 14. Исходный речевой файл и его спектр

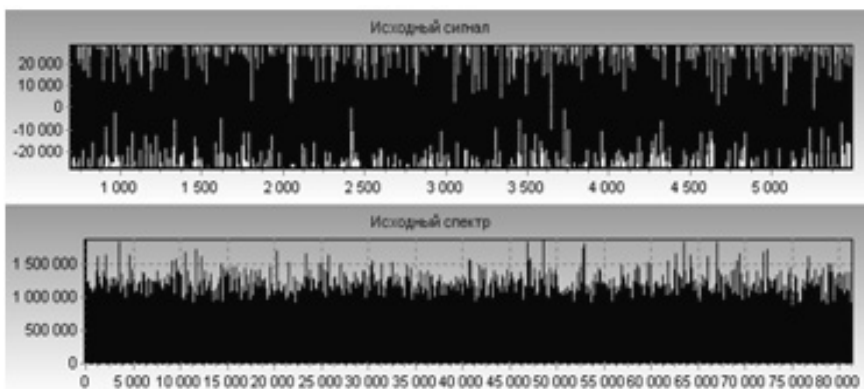


Рис. 15. Зашифрованный речевой файл и его спектр

Как видно из приведенных рисунков, зашифрованный файл претерпел значительные изменения. На рис. 15 мы можем наблюдать, что невозможно разобрать ни одного слова, следовательно, остаточная разборчивость равна нулю. Это подтверждает эффективность предлагаемого метода защиты информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения наилучшей шифрограммы и, соответственно, обеспечивающей наивысший уровень защиты передаваемой информации был проведен сравнительный анализ схем построения генераторов ПСП. Приведенный анализ позволяет сделать вывод, что для повышения стойкости алгоритмов шифрования речи рекомендуется использовать схему Фибоначчи.

Кроме того, для схемы Фибоначчи была проведена оценка степени влияния на характеристики генераторов ПСП количества порождающих полиномов. Анализ остаточной разборчивости показал, что в зашифрованном файле нельзя разобрать ни одного слова, следовательно, остаточная разборчивость равна нулю, что подтверждает эффективность предлагаемого метода защиты информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А.* Анализ статистических характеристик сигналов и помех в гидроакустических каналах связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 3. – С. 78–84.
2. Experimental estimation of delivery success of navigation data packages transmitted via digital hydroacoustic communication channel / K.G. Kekal, V.K. Kebkal, A.G. Kebkal, R. Petrocchia // Gyroscopy and Navigation. – 2016. – Vol. 7, N 4. – P. 343–352.
3. *Филиппов Б.И., Малахова Е.А.* Принципы построения систем гидроакустической связи // Вестник РГРТУ. – 2017. – № 62. – С. 33–40.
4. *Филиппов Б.И.* Энергетический расчет гидроакустических линий связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 3. – С. 81–91.
5. *Басалова Г.В.* Основы криптографии. – 2-е изд. – М.: Интуит, 2016. – 283 с.
6. *Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А.* Выбор ансамбля сигналов для передачи команд управления в гидроакустических каналах связи // Известия ВолгГТУ. – 2015. – № 3 (161). – С. 69–72.

7. *Филиппов Б.И.* Выбор метода разделения сигналов в гидроакустическом канале управления // Вестник РГРТУ. – 2018. – № 66, ч. 1. – С. 29–34.
8. *Филиппов Б.И., Малахова Е.А.* Расчет надежности донной части аппаратуры гидроакустического канала связи // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 3 (81). – С. 79–97.
9. *Филиппов Б.И., Малахова Е.А.* Расчет надежности аппаратуры гидроакустического канала связи // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 4 (82). – С. 67–91.
10. *Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А.* Повышение достоверности передачи блоков цифровой информации по гидроакустическому каналу связи // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2016. – № 9. – С. 490–498.
11. *Филиппов Б.И.* Исследование и разработка устройства защиты от ошибок для системы передачи изображений по гидроакустическому каналу связи // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23, № 12. – С. 897–904.
12. *Жданов О.Н.* Методика выбора ключевой информации для алгоритма блочного шифрования. – М.: Инфра-М, 2018. – 89 с.
13. *Ковтун В.Ю.* Генераторы случайных и псевдослучайных последовательностей. Статистические тесты. Криптографически безопасные генераторы псевдослучайных последовательностей [Электронный ресурс] / NRJETIX Ltd. – 2000–2008. – 16 с. – URL: www.nrjetix.com/fileadmin/doc/publications/Lectures_security/Lecture2.pdf (дата обращения: 18.03.2019).
14. *Бабенко Л.К., Ицукова Е.А.* Криптографическая защита информации: симметричное шифрование: учебное пособие для вузов. – М.: Юрайт, 2018. – 220 с. – (Университеты России). – ISBN 978-5-9916-9244-1.
15. Поточные шифры: результаты зарубежной открытой криптологии. – М., 1997. – С. 32–33.
16. *Шнайер Б.* Прикладная криптография: протоколы, алгоритмы и исходные тексты на языке СИ / пер.: Н. Дубнова. – 2-е изд. – М.: Диалектика, 2003. – 610 с. – ISBN 5-89392-055-4.

Филиппов Борис Иванович, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теория надежности, радиотехника и связь. Опубликовано 47 статей, два учебных пособия, учебник и монография. E-mail: filippov-boris@rambler.ru

Щедрина Анастасия Сергеевна, студент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. E-mail: miss.shedrina@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-116-135

The selection of encryption keys for hydroacoustic communication channel*

B.I. Filippov¹, A.S. Shchedrina²

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the associate professor, PhD in Engineering sciences. E-mail: filippov-boris@rambler*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the undergraduate student of Department Information Security. E-mail: miss.shedrina@mail.ru*

The most suitable algorithm for encryption in the hydroacoustic communication channel is the RC4 cipher. It allows to encrypt and decrypt information quickly and use keys with variable length. But even this algorithm needs to be improved. The main problem is the generation of efficient keys. They are usually formed by pseudo-random sequence generators (PRS) and it is important that these generators generate “pure” random sequences for the highest cipher strength. In addition, it should be noted that it may be necessary to change the size of the keys from 5 to 64 bytes, in depend of the distance between objects and the speed of their movement, and that will make it possible to choose a key of either greater or lesser length. The second problem is the need for synchronization of sending and receiving messages, so a strict synchronization system is needed. The purpose of this work is consideration of possible ways to solve the first problem (creation of the necessary set of effective encryption keys). In order to obtain the best encryption that provides the highest level of protection for the transmitted information, a comparative analysis of the schemes of construction of PRS generators was carried out. The analysis leads to the conclusion that it is recommended to use the Fibonacci scheme to increase the strength of speech encryption algorithms. In addition, an assessment of the degree of influence on the characteristics of the PRS generators of the number of generating polynomials was made for the Fibonacci scheme. The analysis of residual intelligibility showed that not a single word can be parsed in the encrypted file, therefore residual intelligibility is zero, which confirms the effectiveness of the proposed method of information security.

Keywords: encryption algorithm, decryption algorithm, pseudo-random sequence, encryption keys, ciphertext, pseudo-random sequence generators, generating polynomial, synchro sending, cryptographic strength

REFERENCES

1 Filippov B.I., Chernetskii G.A. Analiz statisticheskikh kharakteristik signalov i pomekh v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [Analysis of statistical characteristics of signals and noises in hydroacoustic communication channels]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical Uni-*

* Received 19 December 2018.

versity. Series: Management, Computer Science and Informatics, 2015, no. 3, pp. 78–84.

2. Kekal K.G., Kebkal V.K., Kebkal A.G., Petroccia R. Experimental estimation of delivery success of navigation data packages transmitted via digital hydroacoustic communication channel. *Gyroscopy and Navigation*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 343–352.

3. Filippov B.I., Malahova E.A. Printsipy postroeniya sistem gidroakusticheskoi svyazi [Principles of hydroacoustic communication systems creation]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2017, no. 4 (62), pp. 36–43.

4. Filippov B.I. Energeticheskii raschet gidroakusticheskikh linii svyazi [Energy calculation of hydroacoustic communication lines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2016, no. 3, pp. 81–91.

5. Basalova G.V. *Osnovy kriptografii* [Basics of cryptography]. 2nd ed. Moscow, Intuit Publ., 2016. 283 p.

6. Filippov B.I., Chernetsky G.A. Vybory ansamblya signalov dlya peredachi komand upravleniya v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [Choice of ensemble of signals for transfer of teams management in the hydroacoustic communication channels]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2015, no. 3 (161), pp. 69–72.

7. Filippov B.I. Vybory metoda razdeleniya signalov v gidroakusticheskom kanale upravleniya [The choice of signal separation method in hydroacoustic control channel]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2018, no. 4 (66), pt. 1, pp. 29–34.

8. Filippov B.I., Malahova E.A. Raschet nadezhnosti donnoi chasti apparatury gidroakusticheskogo kanala svyazi [Calculation of reliability of ground part of the equipment hydroacoustic communication channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (81), pp. 79–97.

9. Filippov B.I., Malahova E.A. Raschet nadezhnosti apparatury gidroakusticheskogo kanala svyazi [Calculation of reliability of the equipment hydroacoustic communication channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 4 (82), pp. 67–91.

10. Filippov B.I., Chernetsky G.A. Povyshenie dostovernosti peredachi blokov tsifrovoi informatsii po gidroakusticheskomu kanalu svyazi [Increase of reliability

of transfer of blocks the digital information on the hydroacoustic communication channel]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2016, no. 9, pp. 490–498.

11. Filippov B.I. Issledovanie i razrabotka ustroystva zashchity ot oshibok dlya sistemy peredachi izobrazhenii po gidroakusticheskomu kanalu svyazi [Research and development of the device of protection against mistakes for system of transfer of images on the hydroacoustic communication channel]. *Informatsionnye tekhnologii – Information Technologies*, 2017, vol. 23, no. 12, pp. 897–904.

12. Zhdanov O.N. *Metodika vybora klyuchevoi informatsii dlya algoritma blochnogo shifrovaniya* [The method of selection of key information for a block cipher algorithm]. Moscow, Infra-M Publ., 2018. 89 p.

13. Kovtun V.Yu. *Generatory sluchainykh i psevdosluchainykh posledovatel'nostei. Statisticheskie testy. Kriptograficheski bezopasnye generatory psevdosluchainykh posledovatel'nostei* [Random and pseudorandom sequence generators. Statistical test. Cryptographically secure pseudorandom sequence generators]. NRJETIX Ltd., 2000–2008. 16 p. Available at: www.nrjetix.com/fileadmin/doc/publications/Lectures_security/Lecture2.pdf (accessed 18.03.2019).

14. Babenko L.K., Ishchukova E.A. *Kriptograficheskaya zashchita informatsii: simmetrichnoe shifrovanie* [Cryptographic protection of information: symmetric encryption]. Moscow, Yurait Publ., 2018. 220 p. ISBN 978-5-9916-9244-1.

15. *Potochnye shifry: rezul'taty zarubezhnoi otkrytoi kriptologii* [Stream cipher. The results of the open foreign cryptology]. Moscow, 1997, pp. 32–33.

16. Schneier B. *Applied cryptography: protocols, algorithms and source code in C*. 2nd ed. New York, Wiley, 1996 (Russ. ed.: Shnaier B. *Prikladnaya kriptografiya: protokoly, algoritmy i iskhodnye teksty na yazyke Si*. 2nd ed. Moscow, Di-alektika Publ., 2003. 610 p. ISBN 5-89392-055-4).

Для цитирования:

Филиппов Б.И., Шедрина А.С. Выбор ключей шифрования для гидроакустического канала связи // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 116–135. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-116-135.

For citation:

Filippov B.I., Shchedrina A.S. Vybora klyuchej shifrovaniya dlya gidroakusticheskogo kanala svyazi [The selection of encryption keys for hydroacoustic communication channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 116–135. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-116-135.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 538.935, 53.087.92

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-136-146

**ХАЛЬКОГЕНИДЫ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ
В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ***

В.А. КУЗНЕЦОВ¹, А.А. ФЕДОРОВ², М.А. НАБЕРУХИН³,
А.С. БЕРДИНСКИЙ⁴, П.А. ПОЛТАРАК⁵, В.Е. ФЕДОРОВ⁶

¹ 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 3, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, инженер I категории лаборатории физики низких температур. E-mail: vitalii.a.kuznetsov@gmail.com

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: andrew.fedorov_1999@mail.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: mihailenaberukhin@gmail.com

⁴ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: berdinsky.alexander@gmail.com

⁵ 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 3, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, младший научный сотрудник лаборатории синтеза кластерных соединений и материалов. E-mail: poltarak@niic.nsc.ru

⁶ 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 3, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории синтеза кластерных соединений и материалов. E-mail: fed@niic.nsc.ru

На сегодняшний день для измерения в окружающей среде концентрации газов различной природы широко используются датчики с чувствительными резистивными элементами на основе полупроводниковых оксидов металлов. Одним из основных проблем их использования является необходимость нагрева чувствительного элемента до высоких температур. В связи с этим ведется большое количество научно-исследовательских работ по поиску новых материалов и модификации уже имеющихся. К числу материалов, привлекающих большой интерес в данной области, относятся халькогениды переходных металлов. В данной работе изучаются монокристаллические ди- и трихалькогениды переходных металлов в качестве чувствительных элементов сенсоров на летучие органические вещества. Показано, что образцы в зависимости от их природы при комнат-

* Статья получена 07 ноября 2018 г.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-13-00674).

ной температуре проявляют либо положительный, либо отрицательный отклик на присутствие в атмосфере газа восстановительной природы, этанола, т. е. электросопротивление образцов либо увеличивается либо уменьшается соответственно.

Ключевые слова: газовый сенсор, халькогениды переходных металлов (ХПМ), электронный транспорт

ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения атмосферы в среде обитания человека, контроля состава атмосферы в технологических процессах, добычи угля в шахтах является на сегодняшний день важной задачей. Для решения таких задач на сегодняшний день разработан ряд методов с различными типами чувствительных элементов. Так, для детектирования различных токсичных веществ используются полупроводниковые, термокаталитические, термокондуктометрические датчики, электрохимические сенсоры, а также оптические и ИК-спектральные методы [1–5].

Одними из наиболее распространенных являются датчики на основе полупроводниковых чувствительных элементов, принцип работы которых заключается в изменении электросопротивления полупроводникового материала при адсорбции на его поверхности молекул детектируемых газов – газов восстановителей или окислителей. К одной из главных проблем использования полупроводниковых чувствительных элементов в таких датчиках можно отнести необходимость нагрева чувствительного материала до температур от 100 до 800 °С [3]. Так, например, классический полупроводниковый газовый сенсор на основе оксида олова работает при температуре более 250 °С [5]. На сегодняшний день на практике используется широкий ряд полупроводниковых оксидов (например, SnO_2 , Ga_2O_3 для детектирования газов восстановительной природы и WO_3 , ZnO , TiO_2 для газов-окислителей) [2].

Как было сказано выше, одна из проблем резистивных газовых сенсоров – высокие рабочие температуры, и в настоящий момент ведутся работы по поиску новых материалов, способных проявлять газовую чувствительность при комнатной температуре. Другой проблемой является селективность полупроводниковых сенсоров к газам различной природы – чувствительность резистивных полупроводниковых газовых сенсоров может быть одинаковой к воздействию различных газов. В последнее время в поиске путей решения данных проблем интерес большого количества исследователей привлекают халькогениды переходных металлов (ХПМ) и графен в качестве сенсоров летучих органических веществ (ЛОВ) [6–16]. Так, была продемонстрирована возможность использования ХПМ при комнатной температуре и селективность, достигнутая путем декорирования поверхности ХПМ частицами благородных металлов [10, 17, 18].

Данная работа направлена на поиск новых материалов, которые могут быть использованы в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров при комнатной температуре. В работе приведены результаты экспериментального исследования чувствительности ряда монокристаллических образцов ХПМ к этанолу как к одному из представителей газов восстановительной природы.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве экспериментальных образцов использованы монокристаллические образцы $TiSe_2$, TiS_3 , $NbTe_2$. Монокристаллы $TiSe_2$, TiS_3 , $NbTe_2$ были синтезированы из простых веществ методом высокотемпературного ампульного синтеза. Навески исходных реагентов (233 мг титана и 767 мг селена для $TiSe_2$; 332 мг титана и 668 мг серы для TiS_3 ; 267 мг ниобия и 733 мг теллура для $NbTe_2$) были помещены в кварцевые ампулы объемом 80 мл. Ампулы были заполнены аргоном, затем в каждую был добавлен йод в качестве транспортногo агента в количестве 30 мг. Ампулы были охлаждены в жидком азоте, вакуумированы и герметизированы. Далее их поместили в печь на 150 ч при температурах 800, 500 и 840 °С для $TiSe_2$, TiS_3 и $NbTe_2$ соответственно. После охлаждения ампулы вскрывали и вручную отбирали кристаллы для измерений. Размеры кристаллов, полученных таким образом, составляли до 2–3 мм в наибольшем направлении.

Исследование влияния газа этанола проводилось при комнатной температуре в измерительной камере, состоящей из двух отделений: первое наполнялось воздухом при атмосферном давлении; второе наполнялось воздухом с этанолом, парциальное давление этанола было ниже насыщенного пара, концентрация порядка 10 000 м.д. Образцы подвергались воздействию атмосферы этанола в течение 20...30 мин и затем выдерживались на воздухе в течение 20...30 мин. Эксперименты проводились при комнатной температуре, образцы в течение всех экспериментов также находились при комнатной температуре. Эксперимент повторялся несколько раз.

Для измерения электросопротивления образцов использовался четырехконтактный метод. Сначала подготавливалась измерительная плата с четырьмя контактными дорожками с низкотемпературным припоем. Затем образцы размерами 1–2 мм в наибольшем направлении отбирались вручную из синтезированной массы образцов и впаивались в платы при температуре ниже 120 °С. Для измерения падения напряжения на потенциальных контактах образцов и образцовых катушек сопротивления (для измерения тока в цепи) использовался прецизионный мультиметр Keithley 2000. Для каждого образца измерялась вольт-амперная характеристика, при этом мощность, выделяемая на образцах во время проведения экспериментов, не приводила к их разогреву.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1–3 приведены временные зависимости электросопротивления экспериментальных образцов в присутствии этанола. Из полученных зависимостей видно, что на образцы различной природы газ-восстановитель (этанол) воздействует различным образом, электросопротивление одних уменьшается, других – увеличивается. На зависимостях видно, что электросопротивление не во всех случаях возвращается к исходному значению и возвращается с разной скоростью. Это может быть связано с различной природой адсорбционных центров и, как следствие, с различными скоростями адсорбции и десорбции молекул газа.

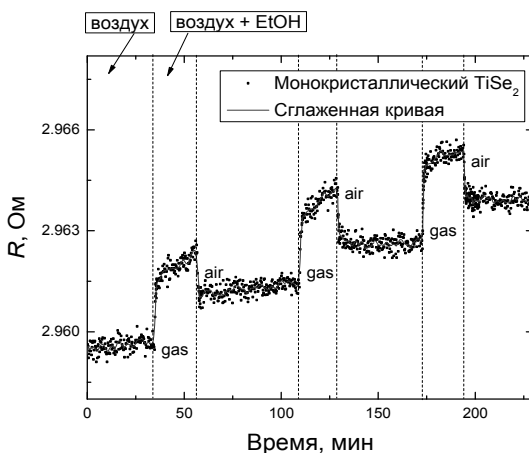


Рис. 1. Изменение электросопротивления монокристаллического образца $TiSe_2$ в газовой атмосфере этанола

Для исследованных образцов были измерены температурные зависимости электросопротивления. На основании характера полученных зависимостей и литературных данных было установлено, что $TiSe_2$ при комнатных температурах в качестве основных носителей заряда имеет дырки, объемный монокристаллический образец TiS_3 является полупроводником n -типа, а $NbTe_2$ – полуметаллом. Различный по знаку отклик электросопротивления образцов на этанол, газ восстановительной природы, может быть объяснен различным типом носителей заряда в образцах. Так, электросопротивление образца $TiSe_2$ увеличивается при воздействии газа восстановительной природы, т. е. концентрация основных носителей заряда, дырок, уменьшается. Для полупроводникового образца TiS_3 n -типа наблюдается уменьшение электросопротивле-

ния, т. е. воздействие газа восстановительной природы увеличивает концентрацию основных носителей – электронов. В случае полуметаллического образца NbTe_2 электросопротивление уменьшается, что свидетельствует о том, что концентрация электронов в образце выше концентрации дырок, и газ-восстановитель увеличивает эту концентрацию.

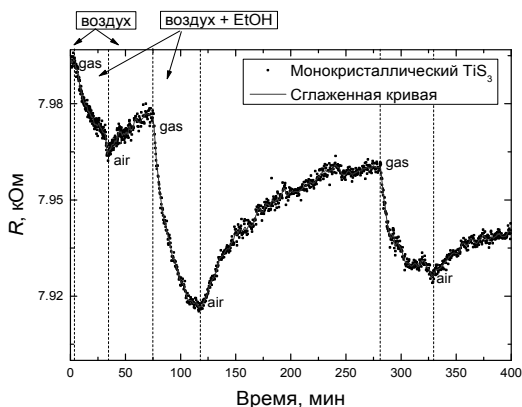


Рис. 2. Изменение электросопротивления монокристаллического образца TiS_3 в газовой атмосфере этанола

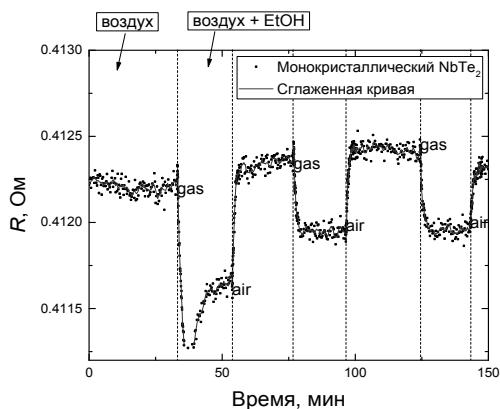


Рис. 3. Изменение электросопротивления монокристаллического образца NbTe_2 в газовой атмосфере этанола

Следует отметить, что экспериментальные образцы проявляют газосенсорные свойства при комнатной температуре, что является одной из важнейших задач поиска новых материалов для газовых сенсоров резистивного типа. Нами ранее было показано, что поликристаллические образцы ХПМ также проявляют чувствительность к газам [19]. Можно заключить, что одной из причин изменения электросопротивления поликристаллических образцов является изменение электросопротивления отдельных кристаллитов. Поскольку размеры экспериментальных монокристаллических образцов были достаточно большие (единицы микрометров толщины и сотни микрометров длины), то следует ожидать, что уменьшение их размеров приведет к значительному увеличению газовой чувствительности, поскольку увеличится отношение поверхности к объему, и изменение электросопротивления приповерхностного слоя будет приводить к значительно большему изменению полного сопротивления образцов. То есть для создания газосенсорных элементов на основе поликристаллических халькогенидов переходных металлов следует применять материалы с малым размером частиц. Наиболее эффективным методом получения частиц ХПМ малого (вплоть до нанометрового) размера является жидкофазное расщепление в полярных растворителях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе на примере монокристаллических халькогенидов переходных металлов TiSe_2 , TiS_3 , NbTe_2 показано, что данный класс веществ может быть использован в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров, работающих при комнатной температуре. Для достижения большей газовой чувствительности в поликристаллических образцах на основе данных соединений необходимым является уменьшение размеров кристаллитов. Полученные данные позволяют определить дальнейшее направление исследования данных материалов как с научной точки зрения, так и с практической.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fraden J.* Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. – 5th ed. – Cham [et al.]: Springer International Publishing Switzerland, 2016.
2. *Korotcenkov G.* Handbook of gas sensor materials. Vol. 1. Conventional approaches. – New York: Springer, 2013. – 442 p.
3. *Korotcenkov G.* Handbook of gas sensor materials. Vol. 2. New trends and technologies. – New York: Springer, 2014. – 454 p.

4. *Soloman S.* Sensors handbook. – 2nd ed. – New York [et al.]: McGraw-Hill, 2010. – 1385 p.
5. Modern sensors handbook / ed. by P. Ripka, A. Tipek. – London: ISTE Ltd, 2007.
6. Determination of the electrical behaviour of surfactant treated polymer/carbon black composite gas sensors / K. Arshak, E. Moore, L. Cavanagh, J. Harris, B. McConigly, Cun C. niffe, , G. Lyons S. Clifford // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2005. – Vol. 36 (4). – P. 487–491. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.10.015.
7. *Bondavalli P., Legagneux P., Pribat D.* Carbon nanotubes based transistors as gas sensors: state of the art and critical review // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2009. – Vol. 140 (1). – P. 304–318. – DOI: 10.1016/j.snb.2009.04.025.
8. Two-dimensional layered nanomaterials for gas-sensing applications / W. Yang, L. Gan, H. Li, T. Zhai // Inorganic Chemistry Frontiers. – 2016. – Vol. 3. – P. 433–451. – DOI: 10.1039/C5QI00251F.
9. Tunable volatile-organic-compound sensor by using au nanoparticle incorporation on MoS₂ / S.-Y. Cho, H.-J. Koh, H.-W. Yoo, J.-S. Kim, H.-T. Jung // ACS Sensors. – 2017. – Vol. 2 (1). – P. 183–189. – DOI: 10.1021/acssensors.6b00801.
10. MoS₂ nanosheet–Pd nanoparticle composite for highly sensitive room temperature detection of hydrogen / C. Kuru, C. Choi, A. Kargar, D. Choi, Y.J. Kim, C.H. Liu, S. Yavuz, S. Jin // Advanced Science. – 2015. – Vol. 2 (4). – P. 1500004. – DOI: 10.1002/advs.201500004.
11. Metal sulfides as sensing materials for chemoresistive gas sensors / A. Gaiardo, B. Fabbri, V. Guidi, P. Bellutti, A. Giberti, S. Gherardi, L. Vanzetti, C. Malagù, G. Zonta // Sensors. – 2016. – Vol. 16 (3). – P. 296. – DOI: 10.3390/s16030296.
12. Highly sensitive MoTe₂ chemical sensor with fast recovery rate through gate biasing / Z. Feng, Y. Xie, J. Chen, Y. Yu, S. Zheng, R. Zhang, Q. Li, X. Chen, C. Sun, H. Zhang, W. Pang, J. Liu, D. Zhang // 2D Materials. – 2017. – Vol. 4 (2). – P. 025018. – DOI: 10.1088/2053-1583/aa57fe.
13. Bifunctional sensing characteristics of chemical vapor deposition synthesized atomic-layered MoS₂ / B. Cho, A.R. Kim, Y. Park, J. Yoon, Y.-J. Lee, S. Lee, T.J. Yoo, C.G. Kang, B.H. Lee, H.C. Ko, D.-H. Kim, M.G. Hahm // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2015. – Vol. 7 (4). – P. 2952–2959. – DOI: 10.1021/am508535x.
14. Photoresponsive and gas sensing field-effect transistors based on multilayer WS₂ nanoflakes / N. Huo, S. Yang, Z. Wei, S.-S. Li, J.-B. Xia, J. Li // Scientific Reports. – 2014. – Vol. 4. – P. 5209. – DOI: 10.1038/srep05209.
15. *Late D.J., Doneux T., Bougouma M.* Single-layer MoSe₂ based NH₃ gas sensor // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 105 (23). – P. 233103. – DOI: 10.1063/1.4903358.

16. Chemical vapor sensing with monolayer MoS₂ / F.K. Perkins, A.L. Friedman, E. Cobas, P.M. Campbell, G.G. Jernigan, B.T. Jonker // Nano Letters. – 2013. – Vol. 13 (2). – P. 668–673. – DOI: 10.1021/nl3043079.

17. Fabrication of flexible MoS₂ thin-film transistor arrays for practical gas-sensing applications / Q. He, Z. Zeng, Z. Yin, H. Li, S. Wu, X. Huang, H. Zhang // Small. – 2012. – Vol. 8 (19). – P. 2994–2999. – DOI: 10.1002/sml.201201224.

18. Functionalization of transition metal dichalcogenides with metallic nanoparticles: implications for doping and gas-sensing / D. Sarkar, X. Xie, J. Kang, H. Zhang, W. Liu, J. Navarrete, M. Moskovits, K. Banerjee // Nano Letters. – 2015. – Vol. 15 (5). – P. 2852–2862. – DOI: 10.1021/nl504454u.

19. Tungsten dichalcogenides as possible gas-sensing elements / V.A. Kuznetsov, A.Y. Ledneva, S.B. Artemkina, M.N. Kozlova, G.E. Yakovleva, A.S. Berdinsky, A.I. Romanenko, V.E. Fedorov // 2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), May 22–26, 2017, Opatija, Croatia: Proceedings. – Opatija, Croatia, 2017. – P. 48–52.

Кузнецов Виталий Анатольевич, инженер I категории лаборатории физики низких температур Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН. Основное направление научных исследований – электронный транспорт, композиционные материалы, тензорезистивный эффект, газовые сенсоры. Имеет 25 публикаций. E-mail: vitalii.a.kuznetsov@gmail.com.

Федоров Андрей Александрович, студент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – электронный транспорт, газовые сенсоры. E-mail: andrew_fedorov_1999@mail.ru.

Наберухин Михаил Андреевич, студент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – электронный транспорт, газовые сенсоры. E-mail: mihailenaberukhin@gmail.com.

Бердинский Александр Серафимович, кандидат технических наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – низкоразмерные системы, электронный транспорт. Имеет более 100 публикаций. E-mail: berdinsky.alexander@gmail.com.

Полтарак Павел Андреевич, младший научный сотрудник лаборатории синтеза кластерных соединений и материалов Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН. Основное направление научных исследований – халькогениды металлов и халькогениды переходных металлов. Имеет 10 публикаций. E-mail: poltarak@niic.nsc.ru.

Федоров Владимир Ефимович, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории синтеза кластерных соединений и материалов Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН. Основное направление научных исследований – химия и физика твердого тела, соединения переходных металлов, низкоразмерные неорганические соединения. Имеет более 500 публикаций. E-mail: fed@niic.nsc.ru.

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-136-146

Transition metal chalcogenides as sensitive elements for gas sensors*

V.A. Kuznetsov¹, A.A. Fedorov², M.A. Naberukhin³, A.S. Berdinsky⁴, P.A. Poltarak⁵, V.E. Fedorov⁶

¹ *Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, engineer of Laboratory of low temperature physics. E-mail: vitalii.a.kuznetsov@gmail.com*

² *Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the Department of Semiconductors and Microelectronics. E-mail: andrew_fedorov_1999@mail.ru*

³ *Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the Department of Semiconductors and Microelectronics. E-mail: mihailnaberukhin@gmail.com*

⁴ *Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, C. Sc. (Eng.), associate professor of the Department of Semiconductors and Microelectronics. E-mail: berdinsky.alexander@gmail.com*

⁵ *Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, junior researcher of Laboratory of synthesis of cluster compounds and materials. E-mail: poltarak@niic.nsc.ru*

⁶ *Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, D. Sc. (Chem.), professor, principal researcher of Laboratory of synthesis of cluster compounds and materials. E-mail: fed@niic.nsc.ru*

Today, gas sensors with sensitive elements based on semiconducting metal oxides are widely used in detecting different gases in ambient. One of the main problems of their applications is the need of heating of sensitive elements up to high temperatures. Thereby many research groups are involved in the search for new sensitive materials and in modifying established ones. One of the representatives of such new materials is transition metal chalcogenides. In the present work monocrystalline transition metal di- and trichalcogenides are studied as sensing materials for volatile organic compounds. It is shown that the samples, depending on their nature, exhibit either positive or negative response at room temperature to the presence of reducing gas ethanol in ambient, that is, the electrical resistance of the samples either increases or decreases, respectively.

Keywords: gas sensor, transition metal chalcogenides (TMC), electron transport

* Received 07 November 2018.

REFERENCES

1. Fraden J. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 5th ed. Cham [et al.], Springer International Publishing Switzerland, 2016.
2. Korotcenkov G. *Handbook of gas sensor materials*. Vol. 1. *Conventional approaches*. New York, Springer, 2013. 442 p.
3. Korotcenkov G. *Handbook of gas sensor materials*. Vol. 2. *New trends and technologies*. New York, Springer, 2014. 454 p.
4. Soloman S. *Sensors handbook*. 2nd ed. New York [et al.], McGraw-Hill, 2010. 1385 p.
5. Ripka P., Tipek A., ed. *Modern sensors handbook*. London, ISTE Ltd, 2007.
6. Arshak K., Moore E., Cavanagh L., Harris J., McConigly B., Cunniffe C., Lyons G., Clifford S. Determination of the electrical behaviour of surfactant treated polymer/carbon black composite gas sensors. *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2005, vol. 36 (4), pp. 487–491. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.10.015.
7. Bondavalli P., Legagneux P., Pribat D. Carbon nanotubes based transistors as gas sensors: state of the art and critical review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, vol. 140 (1), pp. 304–318. DOI: 10.1016/j.snb.2009.04.025.
8. Yang W., Gan L., Li H., Zhai T. Two-dimensional layered nanomaterials for gas-sensing applications. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2016, vol. 3, pp. 433–451. DOI: 10.1039/C5QI00251F.
9. Cho S.-Y., Koh H.-J., Yoo H.-W., Kim J.-S., Jung H.-T. Tunable volatile-organic-compound sensor by using au nanoparticle incorporation on MoS₂. *ACS Sensors*, 2017, vol. 2 (1), pp. 183–189. DOI: 10.1021/acssensors.6b00801.
10. Kuru C., Choi C., Kargar A., Choi D., Kim Y.J., Liu C.H., Yavuz S., Jin S. MoS₂ Nanosheet–Pd nanoparticle composite for highly sensitive room temperature detection of hydrogen. *Advanced Science*, 2015, vol. 2 (4), p. 1500004. DOI: 10.1002/advs.201500004.
11. Gaiardo A., Fabbri B., Guidi V., Bellutti P., Giberti A., Gherardi S., Vanzetti L., Malagù C., Zonta G. Metal sulfides as sensing materials for chemoresistive gas sensors. *Sensors*, 2016, vol. 16 (3), p. 296. DOI: 10.3390/s16030296.
12. Feng Z., Xie Y., Chen J., Yu Y., Zheng S., Zhang R., Li Q., Chen X., Sun C., Zhang H., Pang W., Liu J., Zhang D. Highly sensitive MoTe₂ chemical sensor with fast recovery rate through gate biasing. *2D Materials*, 2017, vol. 4 (2), p. 025018. DOI: 10.1088/2053-1583/aa57fe.
13. Cho B., Kim A.R., Park Y., Yoon J., Lee Y.-J., Lee S., Yoo T.J., Kang C.G., Lee B.H., Ko H.C., Kim D.-H., Hahn M.G. Bifunctional sensing characteristics of chemical vapor deposition synthesized atomic-layered MoS₂. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, vol. 7(4), pp. 2952–2959. DOI: 10.1021/am508535x.

14. Huo N., Yang S., Wei Z., Li S.-S., Xia J.-B., Li J. Photoresponsive and gas sensing field-effect transistors based on multilayer WS₂ nanoflakes. *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, p. 5209. DOI: 10.1038/srep05209.
15. Late D.J., Doneux T., Bougouma M. Single-layer MoSe₂ based NH₃ gas sensor. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 105 (23), p. 233103. DOI: 10.1063/1.4903358.
16. Perkins F.K., Friedman A.L., Cobas E., Campbell P.M., Jernigan G.G., Jonker B.T. Chemical vapor sensing with monolayer MoS₂. *Nano Letters*, 2013, vol. 13 (2), pp. 668–673. DOI: 10.1021/nl3043079.
17. He Q., Zeng Z., Yin Z., Li H., Wu S., Huang X., Zhang H. Fabrication of flexible MoS₂ thin-film transistor arrays for practical gas-sensing applications. *Small*, 2012, vol. 8 (19), pp. 2994–2999. DOI: 10.1002/sml.201201224.
18. Sarkar D., Xie X., Kang J., Zhang H., Liu W., Navarrete J., Moskovits M., Banerjee K. Functionalization of transition metal dichalcogenides with metallic nanoparticles: implications for doping and gas-sensing. *Nano Letters*, 2015, vol. 15 (5), pp. 2852–2862. DOI: 10.1021/nl504454u.
19. Kuznetsov V.A., Ledneva A.Y., Artemkina S.B., Kozlova M.N., Yakovleva G.E., Berdinsky A.S., Romanenko A.I., Fedorov V.E. Tungsten dichalcogenides as possible gas-sensing elements. *2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, May 22–26, 2017, Opatija, Croatia: proceedings, pp. 48–52.

Для цитирования:

Халькогениды переходных металлов в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров / В.А. Кузнецов, А.А. Федоров, М.А. Наберухин, А.С. Бердинский, П.А. Полтарак, В.Е. Федоров // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 136–146. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-136-146.

For citation:

Kuznetsov V.A., Fedorov A.A., Naberukhin M.A., Berdinsky A.S., Poltarak P.A., Fedorov V.E. Khal'kogenidy perekhodnykh metallov v kachestve chuvstvitel'nykh elementov gazovykh sensorov [Transition metal chalcogenides as sensitive elements for gas sensors]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 136–146. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-136-146.

СООБЩЕНИЕ

УДК 658.336

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-147-163

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ НА ОСНОВЕ
ПОДХОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА***

Ю.М. КОНОНОВ

634012, РФ, г. Томск, ул. Елизаровых, 4, ком. 17, Информационно-консультационный центр «Мастер-Класс Консалт», кандидат технических наук. E-mail: yktom1@gmail.com

В статье представлена поэтапная методика решения задач, возникающих перед аналитиками и руководителями при управлении производственной проектной группой. Методика направлена на получение результата при выполнении производственных и научных показателей. Рассматривается пример подготовки продукции в виде проектно-технологической документации на разработку месторождений в условиях сжатых сроков, ограниченности ресурсов как временных, так и производственных. Большинство крупных промышленных и научных предприятий являются социотехническими системами. В таких системах не представляется возможным обойтись без участия человека в производственном процессе, а именно в процессе анализа, обработки информации. Управление данным процессом происходит в результате выводов и решений, сделанных на основе обработки и анализа входящей информации. Эффективно выстроенный процесс управления проектной группой является ключевым элементом, способствующим эффективности производственного процесса.

Рассмотрен экспресс-метод решения задач управления производственным процессом, применимый в условиях ограниченных ресурсов, сжатых сроков, выделения минимального количества времени на принятие решения в процессе осуществления обработки больших объемов информации, при высокой плотности потока входящей информации. Рассмотренный экспресс-метод для решения срочных задач основывается на анализе и совершенствовании методов системного анализа и подобных методик. Четкая систематизация и алгоритмизация процесса обработки информации сокращает трудозатраты машинные, технические и человеческие. Рассмотренная методика будет интересна работникам, чья деятельность связана с обработкой, комплексным анализом информации и принятием решений: аналитикам, научным работникам, руководителям, специалистам по подготовке персонала, преподавателям.

Ключевые слова: принятие решений, экспресс-метод, оперативное принятие решений, методика, алгоритм, поток информации, декомпозиция, коммуникация, проектная группа, показатель, информационная перегрузка, автоматизированная система обработки информации и управления, экспертная оценка, целостность информации, системный анализ.

* *Статья получена 18 июня 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

На текущем этапе развития общества в условиях стремительно развивающихся науки, техники и информатизации весомым фактором, влияющим на производственный процесс, является скорость происходящих изменений в этих сферах. Для устойчивого функционирования крупных научно-производственных систем необходимо уметь оперативно реагировать на изменившуюся ситуацию с учетом современных требований, предъявляемых к скорости обработки информации и принятию эффективных решений. Гибкость и оперативность решения производственных задач стала необходимостью для выживания научно-производственных систем.

При решении сложных производственных задач и оптимизации производственных процессов широко использовались системные исследования и методы системного анализа. В этой связи поиск и совершенствование методик принятия решений, адаптированных к современным условиям, является актуальной для науки и производства задачей.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существует множество вариантов определения термина «системный анализ», и имеются различные мнения о том, какой смысл должен быть вложен в это понятие. Считается, что системный анализ – это методология решения крупных проблем, основанная на концепции систем [1, 2].

Системный анализ используется в ситуациях, когда задача характеризуется слабой структурированностью, неопределенностью, неформальностью и многокритериальностью [3–5].

За несколько десятилетий идея формирования общеупотребительной методики решения проблем была доведена до создания специальной технологии, которую стали называть прикладным системным анализом. Эта область знаний уже стала профессией: в ряде университетов мира готовят системных аналитиков. Существуют десятки фирм, принимающих заказы на решение любых проблем от любых клиентов. В Вене давно существует Международный институт прикладного системного анализа, работающий над глобальными и межнациональными проблемами. Многие вузы курс прикладного системного анализа включают в учебные планы разных факультетов – как физико-математических, так и естественных и гуманитарных. Для решения проблем реальной жизни необходим некий сплав науки, искусства и ремесла. Пропорции между ними для каждой проблемы специфичны [1].

В связи с этим представляет интерес исследование и совершенствование подходов, применяемых в системном анализе и аналогичных методиках.

Проблемная ситуация – это некоторое реальное стечение обстоятельств, положение вещей, которым кто-то недоволен, не удовлетворен и хотел бы изменить.

Под проблемой понимается субъективное отрицательное отношение человека к реальности [1].

Проблему (задачу) можно определить как разницу между желаемым состоянием системы (С2) и существующим состоянием системы (С1).

Каждое из состояний зависит от множества составляющих факторов системы в существующем состоянии системы

$$C1 = f(a1, b1, c1, d1... n1) \quad (1)$$

и в желаемом состоянии системы

$$C2 = f(a2, b2, c2, d2... n2). \quad (2)$$

Задачей применения рассматриваемых методик и алгоритмов решения задач является способность повлиять на данные факторы для приведения их в желаемое состояние.

Такой подход реализован в теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) Г.А. Альтшуллера. ТРИЗ-технология – это технология решения творческих задач, т. е. задач, не имеющих четких механизмов решения [6]. Системный анализ, в свою очередь, является одним из методов ТРИЗ.

Анализ первоисточников

Во второй половине XX века в СССР издаются книги с названиями «Системный анализ: этап развития методологии решения проблем в США», «Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем», «Системный анализ для руководителей», «Системный подход к изучению экономических явлений», «Комплексное народно-хозяйственное планирование». Это первые издания, переведенные на русский язык и выпущенные большим тиражом для широкого круга читателей в СССР [2, 7, 8]. В вышеприведенных источниках рассматриваются подходы к решению крупных промышленных проблем.

Этапы алгоритма системного анализа

У разных авторов при близости общей схемы алгоритма системного анализа его этапы существенно отличаются. Это хорошо видно из сопоставления работ С.Л. Оптнера, С. Янга, Н.П. Федоренко, С.П. Никанорова, Ю.И. Черняка, Ф.П. Тарасенко. В табл. 1 приведена сравнительная классификация этапов системного анализа по отечественным и зарубежным источникам [1–3, 7–13].

Т а б л и ц а 1

Сравнительная классификация этапов системного анализа

№ п/п	С.Л. Оптнер	С. Янг	Н.П. Федоренко	С.П. Никаноров	Ю.И. Черняк	Ф.П. Тарасенко
1	Определение актуальности проблемы	Определение целей организации	Формулирование проблемы	Обнаружение проблемы	Анализ проблемы	Фиксация проблемы
2	Определение целей	Выявление проблемы	Определение целей	Оценка актуальности проблемы	Определение системы	Диагностика проблемы
3	Определение структуры системы и ее дефектов	Диагностика (определение, распознавание)	Сбор информации	Анализ ограничений проблемы	Анализ структуры системы	Составление списка стейкхолдеров
4	Определение возможностей	Поиск решения	Разработка максимального количества альтернатив	Определение критериев	Формирование общей цели и критерия системы	Выявление проблемного месива
5	Нахождение альтернатив	Оценка и выбор альтернатив	Отбор альтернатив	Анализ существующей системы	Декомпозиция цели, выявление потребности в ресурсах и процессах	Определение конфигуратора
6	Оценка альтернатив	Согласование решения	Построение модели в виде уравнений, программ или сценария	Поиск возможностей (альтернатив)	Выявление ресурсов и процессов, композиция цели	Целевыявление
7	Выработка решения	Утверждение решения	Оценка затрат	Выбор альтернативы	Провоз и анализ будущих условий	Определение критериев
8	Признание решения	Подготовка к вводу в действие	Испытание чувствительности решения (параметрическое исследование)	Обеспечение признания	Оценка целей и средств	Экспериментальное исследование систем

Окончание табл. 1

№ п/п	С.Л. Оптнер	С. Янг	Н.П. Федоренко	С.П. Никаноров	Ю.И. Черняк	Ф.П. Тарасенко
9	Запуск решения	Управление применением решения		Принятие решения (принятие формальной ответственности)	Отбор вариантов	Построение и усовершенствование моделей
10	Управление реализацией решения	Проверка эффективности		Реализация решения	Диагноз существующей системы	Генерирование альтернатив
11	Оценка реализации и ее последствий			Определение результатов решения	Построение комплексной программы развития	Выбор, или принятие решения
12					Проектирование организации для достижения целей	Реализация улучшающего вмешательства

Пояснение к табл. 1 и 2

Цвет заливки	Значение группы этапов в зависимости от заливки ячейки
Диагностика	Группа этапов диагностики
Модель	Группа этапов моделирования текущей ситуации
Гипотеза	Группа этапов подготовки и выбора решения
Действие	Группа этапов реализации решения и оценки результата

Цветом выделено условное разделение алгоритма системного анализа на укрупненные этапы.

Представленные технологии позволяют решить задачу изменения состояния исследуемой системы в желаемую сторону. Рассмотренные методики созданы в основном для решения крупных производственных задач.

Данная работа была выполнена по конкретной практической тематике с целью подбора методики, применимой для оперативного решения задач и принятия решений.

2. ВЫБОР МЕТОДА

В данном исследовании для условий ограниченности системы управления по размеру можно воспользоваться локальными методами управления. Установлено, что в случае мелкой социотехнической системы (проектная группа, включающая до 50 экспертов, и ее аппаратно-техническое и информационное обеспечение) эффективно влиять на ряд основных факторов, складывающих состояние системы, можно с помощью коммуникативных методов управления.

В XX веке на смену методу проб и ошибок пришел метод контрольных вопросов Г.С. Альтшуллера, который является одним из коммуникативных методов решения задач.

Коммуникативные методы – это методы симметричной и асимметричной коммуникации, целью которых является создание благоприятной коммуникативной обстановки в организации в сферах ее взаимодействия с компонентами внешней среды, в вопросах управления персоналом и принятия решений путем постановки конструктивных вопросов, задаваемых по определенному алгоритму.

Использование данного подхода целесообразно в небольших рабочих коллективах, когда субъект управления непосредственно может взаимодействовать с объектом управления, руководствуясь определенным алгоритмом.

Для оперативного реагирования на изменения в производственной системе руководителям коллективов необходимо на практике осваивать новые технологий управления. В настоящее время в России развивается направление бизнес-коучинга для решения задач оптимизации производственных процессов [15].

Методика представляет последовательность вопросов, помогающих самостоятельно понять и реализовать шаги к достижению цели подсистемы управления. Эта методика применительно к решению производственных задач аналогична методу контрольных вопросов, упомянутому выше.

В табл. 2 представлено сопоставление алгоритма прикладного системного анализа, алгоритма коучинга [15, 16] и этапов экспресс-метода решения срочных задач, основанное на укрупнении этапов алгоритма системного анализа и аналогичных методик.

Т а б л и ц а 2

Переход к укрупненным этапам коммуникативного метода управления

№ п/п	Ф.П. Тарасенко [1]	Д. Уитмор [18]			Модель экспресс-метода	
	Этапы		Контекст вопросов	Что анализируем?	Укрупненные этапы	Контекст «эффективных вопросов»
1	Фиксация проблемы	Проблема, цель	1. В чем проблема? Чего ты хочешь?	Желание, цель	I. Диагностика	1. В чем задача? 2. Что необходимо изменить?
2	Диагностика проблемы	Реальность (обследование текущей ситуации)	Что происходит сейчас?	Привычки, реальность, опыт	II. Модель	Что происходит сейчас? (текущее состояние системы и ее параметров)
3	Составление списка стейкхолдеров					
4	Выявление проблемного месива					
5	Определение конфигуратора					
6	Целевыявление	Варианты (список возможностей)	Что можно сделать?	Ресурсы, варианты, критерии, ограничения. Какие действия предпринимать?	III. Гипотеза	Какие варианты решения задачи?
7	Определение критериев					
8	Экспериментальное исследование систем	Намерения	Что ты будешь делать?	План: шаг 1, шаг 2, шаг 3 и т. д.	III. Гипотеза	Какие действия следует предпринять? (для изменения состояния системы, ее параметров)
9	Построение и усовершенствование моделей					
10	Генерирование альтернатив					

Окончание табл. 2

№ п/п	Ф.П. Тарасенко [1]	Д. Уитмор [18]			Модель экспресс-метода	
	Этапы	Контекст вопросов	Что анализируем?	Укрупненные этапы	Контекст «эффективных вопросов»	
11	Выбор или принятие решения					
12	Реализация улучшающего вмешательства	Действие	Когда?	Дата, срок реализации действия (№ 1, 2, 3)	IV. Действие	Когда?

Процедура постановки *эффективных вопросов* за счет использования укрупненных этапов экспресс-метода анализа позволяет оперативно перейти к конструктивному решению задачи.

Эффективность данного подхода подтверждается повышением производительности при обработке информации и принятии решений в рамках рассматриваемого производственного процесса, что, в свою очередь, позволяет сократить трудозатраты на выполнение производственных показателей [15–18].

Полная трудоемкость выполнения работ складывается из следующих составляющих: технологической трудоемкости, трудоемкости обслуживания, производственной трудоемкости и трудоемкости управления. Представленный частный случай экспресс-метода позволяет прежде всего эффективно влиять на трудоемкость обслуживания и трудоемкость управления.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

В работе [19] обобщен опыт изложенный в отечественных изданиях по вопросам взаимодействия с сотрудниками при выполнении рабочего процесса. В работе [20] предлагается шесть основных уровней отношения конкретного сотрудника к организации по степени убывания лояльности (по результатам анализа наработок Тарасова В.К. и Фридмана А.С.), рассмотрены основные характеристики поведения сотрудника. В работе [21] сотрудники классифицированы по их реакции на внешние изменения: введение нового порядка, контроль

и санкции. В зависимости от реакции предложены подходы взаимодействия с каждым типом сотрудников. Всего выделено семь типов сотрудников [20, 21].

В табл. 3 приведены характеристики трех рассматриваемых сотрудников.

Т а б л и ц а 3

Характеристики рассматриваемых сотрудников

Сотрудник	Тип сотрудника по [20,21]	Класс сотрудника [22]
1	Гиперприверженный	А
2	Гиперприверженный, неисполнительный	А, Б, В
3	Приверженный, недовольный	А, Б

Сотрудник 1 – перспективный молодой работник, рассматриваемый всеми как будущий руководитель. Общая характеристика: аналитический склад ума, готов выполнять новые задания, мотивирован, ориентирован на развитие. Сопротивление выражается в следующем: отвлекает начальство по мелочам, задает много вопросов, спорит.

Сотрудник 2 – средний возраст, имеет большой опыт в направлении, отличном от направления развития компании, текущим направлением занимается недолго.

Сотрудник 3 – большой опыт работы в своем направлении, ответственен, всеми воспринимается как компетентный в своем направлении специалист, к нему обращаются за советом. Сопротивление выражается в том, что много возмущается по мелочам, от которых ничего не зависит [19].

В табл. 4 приведены поставленные задачи развития трех типов сотрудников, упомянутых выше, и критерии их достижения.

Т а б л и ц а 4

Задачи развития сотрудников, критерии их выполнения

№ п/п	Задача	Критерий выполнения
1	Повысить самостоятельность в принятии решений и координации смежных подразделений, сотрудников Снизить уровень прерываний начальства (количество обращений к руководству по зоне своей компетенции) Повысить коммуникабельность Повысить количество и обоснованность предлагаемых сотрудником решений	Вопросы, касающиеся его уровня компетенции, решает сам, без привлечения начальства. Предлагает самостоятельно несколько обоснованных вариантов решения (мозговой штурм)

Окончание табл. 4

№ п/п	Задача	Критерий выполнения
2	Снизить количество вопросов к начальству Повысить коммуникабельность и самообучаемость коллег Повысить качество представляемого материала Повысить логичность представления материала Повысить обоснованность выдвигаемых решений, самостоятельность действий	Советуется с коллегами при выполнении работ, не отвлекает начальство мелкими промежуточными вопросами, представляет задания в нужном виде / формате, самостоятельно анализирует материал, выдвигает обоснованные предложения
3	Снизить уровень прерывания начальства Снизить уровень возмущения, доносимый до начальства (повысить лояльность) Повысить самостоятельность в выполнении решений Повысить репрезентативность материала (выполняет задания и не отвлекает руководителя)	Вопросы, вызывающие возмущение, решает самостоятельно с коллегами, к начальству обращается при необходимости принятия решений, выходящих за пределы его компетенции. С начальством разговаривает по существу дела, без лишней информации

В работе [19] приведены примеры реакций (сопротивления) сотрудников на определенное задание и использованные эффективные вопросы для решения поставленной задачи. Приведены варианты эффективных вопросов для типовых ситуаций, возникающих перед руководителями и наставниками при решении рабочих задач и задач развития коллектива.

За период наблюдения сотрудник 1 изменился от «гиперприверженного» в «приверженного». Большинство целей, представленных в табл. 4, было достигнуто. Основные результаты изменений представлены в табл. 5 и 6 [19].

Таблица 5

**Динамика развития сотрудников по приведенной классификации
в результате применения методики**

Сотрудник	Тип сотрудника до применения методики	Тип сотрудника после применения методики
1	Гиперприверженный	Приверженный
2	Гиперприверженный, неисполнительный	Приверженный
3	Приверженный, недовольный	Приверженный

Таблица 6

Динамика развития сотрудников (фрагмент таблицы)

Сот-руд-ник	Процесс	До применения методики	После применения методики
1	Затраты времени на принятие решения	Оттягивание принятия решения, попытка отсрочить принятие решения в порученной ему самостоятельной задаче	Самостоятельно предлагает решения и говорит, что ему нужно для принятия решения
1	Принятие решения в зоне своей компетенции	Отвлекает руководителя по поводу решений, находящихся в зоне его компетенции	Принимает решения в рамках своих обязанностей, самостоятельно осуществляет коммуникацию с другими сотрудниками
1	Восприимчивость к новым заданиям, решение которых требует смены подхода или логики, к которой привык сотрудник	Дает логическое обоснование невозможности выполнения поставленной задачи	Предлагает решения, допущения, которые необходимо сделать для достижения результата
1	Самостоятельность в рамках своего сектора работ	Отсутствует понимание контроля сроков, координации сотрудников	Самостоятельно проводил координацию сотрудников в своем секторе работ, контролирует сроки, проверяет результат
2	Затраты времени на принятие решения	Слишком быстро принимает решения (до получения оптимального объема информации, необходимой для проектной работы)	Советуется с коллегами, собирает достаточное количество материала Обращается к руководителю только тогда, когда узнает всю необходимую информацию Обосновывает свое решение фактами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была предложена модель экспресс-анализа. Данный алгоритм применим к решению задач при ограниченном размере подсистем, участвующих в технологическом процессе.

Рассмотрена процедура постановки «эффективных вопросов», реализованная укрупненными этапами экспресс-метода анализа, позволяющая оперативно перейти к конструктивному решению задачи.

Проведенные исследования подтвердили, что рассматриваемый метод применим для процесса управления производственным коллективом.

В статье представлена методика постановки эффективных вопросов и полезность ее применения руководителем для развития персонала и ускорения перевода диалога в конструктивное русло – наиболее быстрого решения возникающих рабочих задач.

Рассмотренная процедура постановки эффективных вопросов позволяет оперативно перейти к конструктивному решению задачи.

За период исследования и применения методики постановки эффективных вопросов повышена мотивация и результативность сотрудников, уменьшено сопротивление при выполнении задач, стоящих перед предприятием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарасенко Ф.П.* Прикладной системный анализ: учебное пособие. – М.: Кнорус, 2010. – 224 с.
2. *Черняк Ю.И.* Системный анализ в управлении экономикой. – М.: Экономика, 1975. – 171 с.
3. *Кононов Ю.М.* Разработка экспертной системы для выбора методов увеличения нефтеотдачи пластов в условиях нечетких входных данных: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 293 с.
4. *Абарникова Е.Б.* Разработка и исследование экспертной системы для анализа различных предметных областей в условиях нечеткой информации: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Комсомольск-на-Амуре, 2001. – 163 с.
5. *Шилов Н.Г., Ермолаев В.И.* Методологические основы интеллектуальной поддержки социально ориентированных решений в гибких транспортных системах // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 3 (64). – С. 59–72.
6. *Альтшуллер Г.С.* Найти идею: введение в теорию решения изобретательских задач. – 2-е изд., доп. – Новосибирск: Наука, 1991. – 225 с. – (Наука и технический прогресс).
7. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Теория систем и системный анализ: учебник для академического бакалавриата. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2015. – 616 с. – (Бакалавр. Академический курс).
8. *Волкова В.Н.* Из истории развития системного анализа в нашей стране // Экономическая наука современной России. – 2001. – № 2. – С. 138–152.
9. *Орлов А.И.* Теория принятия решений. – М.: Март, 2004. – 656 с.

10. *Оразбаев Б.Б.* Методы многокритериального выбора и интеллектуальные системы принятия решений для управления производственными объектами при нечеткой исходной информации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.16. – М., 1996. – 467 с.

11. *Норенков И.П.* Автоматизированные информационные системы: учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 342 с.

12. *Кононов Ю.М., Гольдштейн А.Е.* Экспертно-диагностическая система для выбора методов увеличения нефтеотдачи на нефтяных месторождениях в условиях нечетких входных данных // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 57–62.

13. *Кононов Ю.М., Иванов Е.Н.* Application of Fuzzy logic for enhanced oil recovery methods selection // Modern Techniques and Technologies: Proceedings of the Eighteenth International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. – Tomsk: TPU Press, 2012. – P. 107–108.

14. *Кононов Ю.М., Иванов Е.Н.* Использование нечеткой логики в задачах аналитического моделирования методов увеличения нефтеотдачи // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012 – Т. 3. – С. 95–96.

15. *Кононов Ю.М.* Коучинг как методика постановки эффективных вопросов для наставника и руководителя [Электронный ресурс]: дипломная работа. – Томск, 2016. – URL: <http://yktom1.wixsite.com/kononov-coach/blog> (дата обращения: 13.03.2019).

16. *Уитмор Д.* Коучинг высокой эффективности: пер. с англ. – М.: Международная академия корпоративного управления и бизнеса, 2005. – 165 с.

17. *Давидюк Н.В.* Методика оценки требуемого уровня защищенности информационных ресурсов автоматизированных систем обработки информации и управления // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 4 (65). – С. 100–109.

18. *Ханова А.А., Уразалиев Н.С., Усманова З.А.* Метод ситуационного управления сложными системами на основе сбалансированной системы показателей // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 3 (60). – С. 69–82.

19. *Кононов Ю.М.* Обзор методик и алгоритмов решения задач управления производственным процессом на основе подходов системного анализа // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 1. – С. 72–84.

20. *Бехтерев С.* Отношение сотрудников к организации: классификация и способы улучшить это отношение [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cfin.ru/management/people/motivation/approach.shtml> (дата обращения: 13.03.2019).

21. *Сивожезлов П.П.* Семь типов подчиненных и как ими управлять [Электронный ресурс]. – URL: <https://sbs.edu.ru/lp/sivozhelezov/cl-v1/> (дата обращения: 13.03.2019).

22. Кузин А.Ю. Эффективные переговоры, командообразование и управление командой. Предупреждение конфликтов и управление конфликтами: методические материалы. – Томск, 2014. – 91 с.

Кононов Юрий Михайлович, кандидат технических наук. Основное направление исследований – системный анализ, управление и обработка информации. Имеет более 20 публикаций. E-mail: ykto1@gmail.com

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-147-163

Improvement of algorithms for production process management based on the approaches of system analysis*

Y.M. Kononov

634012, Russian Federation, Tomsk, Elizarivih 4-17, Information and Consulting Center "Master-Class Consult", candidate of technical science. E-mail: ykto1@gmail.com

The article presents a step-by-step methodology for solving problems arising in front of managers of a production project team. The methodology is aimed at obtaining results in the performance of production and scientific indicators. An example of preparation of products in the form of design and technological documentation for the development of deposits, under conditions of tight deadlines, limited resources, both temporary and production, is considered. Most large industrial and scientific enterprises are sociotechnical systems. In such systems it is not possible to do without the participation of a person in the production process, namely in the process of analyzing and processing information. Management of this process occurs as a result of conclusions and decisions made on the basis of processing and analysis of incoming information. An effectively built project management process is a key element contributing to the efficiency of the production process.

The express control method applicable in conditions of limited resources, compressed deadlines, allocation of the minimum amount of time for decision making in the process of processing large volumes of information, with a high density of the incoming information flow is considered. The considered express method for solving urgent problems is based on the analysis and improvement of methods of system analysis and similar methods. A clear systematization and algorithmization of information processing reduces labor costs both machine, technical, and human. The considered methodology will be of interest to employees whose activities are related to processing, complex analysis of information and decision-making: analysts, researchers, managers, employees dealing with personnel, teachers.

Keywords: decision making, rapid analysis algorithm, rapid decision making, information flow, decomposition, communication, project team, indicator, information overload, automated information processing and management system, expert evaluation, information integrity, system analysis

* Received 18 June 2018.

REFERENCES

1. Tarasenko F.P. *Prikladnoi sistemnyi analiz* [Applied system analysis]. Moscow, Knorus Publ., 2010. 224 p.
2. Chernyak Yu.I. *Sistemnyi analiz v upravlenii ekonomikoi* [System analysis in the economy management]. Moscow, Ekonomika Publ., 1975. 171 p.
3. Kononov Yu.M. *Razrabotka ekspertnoi sistemy dlya vybora metodov uvelicheniya nefieotdachi plastov v usloviyakh nechetkikh vkhodnykh dannykh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of an expert system for selecting methods for increasing oil recovery in conditions of fuzzy input data. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 293 p.
4. Abarnikova E.B. *Razrabotka i issledovanie ekspertnoi sistemy dlya analiza razlichnykh predmetnykh oblastei v usloviyakh nechetkoi informatsii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of the expert system for the analysis of various subject areas in conditions of fuzzy information. PhD eng. sci. diss.]. Komsomolsk-on-Amur, 2001. 163 p.
5. Shilov N.G., Ermolaev V.I. Metodologicheskie osnovy intellektual'noi podderzhki sotsial'no-orientirovannykh reshenii v gibkikh transportnykh sistemakh [Methodological basis of intelligent socio-oriented decision support in flexible transport systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (64), pp. 59–72.
6. Al'tshuller G.S. *Naiti ideyu: vvedenie v teoriyu resheniya izobretatel'skikh zadach* [Find an idea. Introduction to the theory of solving inventive problems]. 2nd ed. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 225 p.
7. Volkova V.N., Denisov A.A. *Teoriya sistem i sistemnyi analiz* [Theory of systems and system analysis]. 2nd ed. Moscow, Yurait Publ., 2015. 616 p.
8. Volkova V.N. Iz istorii razvitiya sistemnogo analiza v nashei strane [From the history of the development of system analysis in our country]. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoi Rossii – Economics of Contemporary Russia*, 2001, no. 2, pp. 138–152.
9. Orlov A.I. *Teoriya prinyatiya reshenii* [Decision theory]. Moscow, Mart Publ., 2004. 656 p.
10. Orzbaev B.B. *Metody mnogokriterial'nogo vybora i intellektual'nye sistemy prinyatiya reshenii dlya upravleniya proizvodstvennymi ob"ektami pri nechetkoi iskhodnoi informatsii*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methods of multicriterial choice and intelligent decision-making systems for the management of production objects with fuzzy source information. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 1996. 467 p.
11. Norenkov I.P. *Avtomatizirovannye informatsionnye sistemy* [Automated information systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 342 p.

12. Kononov Yu.M., Gol'dshtein A.E. Ekspertno-dagnosticheskaya sistema dlya vybora metodov uvelicheniya nefteotdachi na neftyanykh mestorozhdeniyakh v usloviyakh nechetkikh vkhodnykh dannykh [Expert-diagnostic system for choosing methods of increasing oil recovery in oil fields under fuzzy input data]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov Bulletin*, 2013, no. 2, pp. 57–62.
13. Kononov Yu.M., Ivanov E.N. Application of Fuzzy logic for enhanced oil recovery methods selection. *Modern Techniques and Technologies: Proceedings of the eighteenth International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists*. Tomsk, TPU Press, 2012, pp. 107–108.
14. Kononov Yu.M., Ivanov E.N. [Use of fuzzy logic in problems of analytical modeling of methods of increasing oil recovery]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii: sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern techniques and technologies: a collection of works of the XVIII International Scientific and Practical Conference]. Tomsk, TPU Publ., 2012, vol. 3, pp. 95–96. (In Russian).
15. Kononov Y.M. *Kouching kak metodika postanovki effektivnykh voprosov dlya nastavnika i rukovoditelya: diplomnaya rabota* [Coaching as a method of effective questioning for the mentor and chief project manager: diploma work]. Tomsk, 2016. Available at: <http://yktom1.wixsite.com/kononov-coach/blog> (accessed 13.03.2019).
16. Whitmore J. *Coaching for Performance*. London, Brealey, 2002 (Russ. ed.: Uitmor D. *Kouching vysokoi effektivnosti*. Translated from English. Moscow, Mezhdunarodnaya akademiya korporativnogo upravleniya i biznesa Publ., 2005. 165 p.).
17. Davidyuk N.V. Metodika otsenki trebuemogo urovnya zashchishchennosti in-formatsionnykh resursov avtomatizirovannykh sistem obrabotki informatsii i upravleniya [The procedure of quantitative estimation of the required security level for information resources of automated information processing and management systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (65), pp. 100–109.
18. Khanova A.A., Urazaliev N.S., Usmanova Z.A. Metod situatsionnogo upravleniya slozhnymi sistemami na osnove sbalansirovannoi sistemy pokazatelei [The method of situational control of complex systems based on the balanced scorecard]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (60), pp. 69–82.
19. Kononov Yu.M. Obzor metodik i algoritmov resheniya zadach upravleniya proizvodstvennym protsessom na osnove podkhodov sistemnogo analiza [Review of methods and algorithms for solving the problems of production process manag-

ment based on the approaches of system analysis]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1 (87), pp. 72–84.

20. Bekhterev S. *Otnoshenie sotrudnikov k organizatsii: klassifikatsiya i sposoby uluchshit' eto otnoshenie* [Attitude of employees to the organization: classification and ways to improve this attitude]. Available at: <http://www.cfin.ru/management/people/motivation/approach.shtml> (accessed 13.03.2019).

21. Sivozhelezov P.P. *Sem' tipov podchinennykh i kak imi upravlyat'* [Seven types of subordinates and how to manage them]. Available at: <https://sbs.edu.ru/lp/sivozhelezov/cl-v1/> (accessed 13.03.2019).

22. Kuzin A.Yu. *Effektivnye peregovory, komandoobrazovanie i upravlenie komandoi. Preduprezhdenie konfliktov i upravlenie konfliktami* [Effective negotiations, team building and team management. Conflict prevention and conflict management]. Tomsk, 2014. 91 p.

Для цитирования:

Кононов Ю.М. Совершенствование алгоритмов управления производственным процессом на основе подходов системного анализа // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 147–163. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-147-163.

For citation:

Kononov Yu.M. Sovershenstvovanie algoritmov upravleniya proizvodstvennym processom na osnove podkhodov sistemnogo analiza [Improvement of algorithms for production process management based on the approaches of system analysis]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 147–163. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-147-163.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

УСЛОВИЯ ПРИЕМА СТАТЕЙ

В редакцию **Сборника научных трудов НГТУ** представляются следующие материалы.

1. Статья объемом 8–12 страниц от аспирантов и 16–22 страницы от докторантов, печатная версия – два экземпляра, подписанных авторами (требования к оформлению см. на сайте: <http://sbornik.infoterra.ru>).

2. Контактная информация (телефоны, адреса электронной почты, место работы, должность, ученая степень, ученое звание автора) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)» – печатная версия, один экземпляр (<http://sbornik.infoterra.ru>).

4. Электронная версия статьи, контактной информации, описание статьи для базы данных РИНЦ, реферат на англ. языке (в отдельных файлах на CD).

5. Рецензия объемом одна-две страницы в двух экземплярах.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Информацию о сборнике, дополнительную информацию, документацию по оформлению см. на сайте: <http://sbornik.infoterra.ru>
journals.nstu.ru/sbornik

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ РАЗДЕЛЫ СБОРНИКА

Автоматическое управление (и идентификация)

Моделирование процессов и устройств

Обработка информации

Современные информационные технологии

Электроэнергетика, электромеханика и электротехнологии

Механика (газодинамика)

Физика и математика

Материаловедение

Сообщения и дискуссии

Педагогика

Авторы, не являющиеся сотрудниками НГТУ, представляют сопроводительное письмо на имя проректора по научной работе НГТУ.

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов.

Плата за публикацию рукописей не взимается.