

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**



**ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА**

**2 (16)**

**Донецк – 2019**

УДК 004.3+004.9+004.2+51.7+519.6+519.7

**ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА, № 2 (16), 2019,**  
Донецк, ДонНТУ.

Представлены материалы по вопросам приоритетных направлений научно-технического обеспечения в области информатики, кибернетики и вычислительной техники.

Материалы предназначены для специалистов народного хозяйства, ученых, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Редакционная коллегия

**Главный редактор:** Павлыш В. Н., д.т.н., проф.

**Зам. глав. ред.:** Мальчева Р. В., к.т.н., доц.

**Ответственный секретарь:** Воронова А. И.

**Члены редакционной коллегии:** Аверин Г. В., д.т.н., проф.; Аноприенко А. Я., к.т.н., проф.;

Зинченко Ю. Е., к.т.н., доц.; Зори С. А., д.т.н., доц.; Карабчевский В. В., к.т.н., доц.;

Миненко А. С., д.ф-м.н., проф.; Привалов М. В., к.т.н., доц.; Скобцов Ю. А., д.т.н., проф.;

Федяев О. И., к.т.н., доц.; Шелепов В. Ю., д.ф-м.н., проф.

Рекомендовано к печати ученым советом ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» Министерства образования и науки ДНР. Протокол № 5 от 28 июня 2019.

Свидетельство о регистрации СМИ: серия ААА № 000145 от 20.06.2017.

Приказ МОН ДНР № 135 от 01.02.2019 о включении в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР.

Контактный адрес редакции

ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУ ВПО «ДонНТУ»,

4-й учебный корпус, к. 36., ул. Кобозева, 17.

Тел.: +38 (062) 301-07-35, +38 (071) 334-89-11

Эл. почта: [infcyb.donntu@yandex.ru](mailto:infcyb.donntu@yandex.ru)

Интернет: <http://infcyb.donntu.org>

© Донецкий национальный технический университет  
Министерство образования и науки ДНР, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

<b>Пусковой орган автоматизированного управления переключением на резервный источник питания двигательной нагрузки</b> <i>Сивокобыленко В. Ф., Деркачѳв С. В.</i> .....	5
<b>Задачи составления оптимального расписания программ обработки деталей для станков с ЧПУ и методы их решения</b> <i>Лазебная Л. А., Бельков Д. В.</i> .....	13
<b>Метод измерения параметров электромагнитных элементов и быстродействующей защиты при коммутации обмотки</b> <i>Жораев Т. Ю., Манилова Г. В.</i> .....	20
<b>Построение регрессионных моделей режимов работы водораспределительных сетей с помощью методов регуляризации и анализа главных компонент</b> <i>Беспалова С.В., Романчук С.М., Ермоленко Т.В., Бондаренко В.И.</i> .....	28
<b>Прогнозирование финансовых временных рядов с помощью нейронных сетей с использованием библиотеки Keras в Python</b> <i>Васяева Т.А., Мартыненко Т. В., Суббота Н.С.</i> .....	41
<b>Пути повышения эффективности устройств сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры</b> <i>Койбаш А.А.</i> .....	51
<b>Современные архитектуры и модели автономных наземных подвижных объектов</b> <i>Завадская Т. В.</i> .....	58
<b>Статистический анализ современных методов распознавания лиц и эмоций</b> <i>Ванѳжа Т.В.</i> .....	64
<p style="text-align: center;"><u>Компьютерные и информационные науки</u></p>	
<b>Алгоритм трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению методом перспективных масштабов</b> <i>Руденко М.П.</i> .....	72
<b>Полигоны над полугруппами, унарные алгебры и автоматы</b> <i>Кожухов И.Б., Михалѳев А.В.</i> .....	79
<b><u>Требования к статьям, направляемым в редакцию научного журнала «Информатика и кибернетика»</u></b> .....	84

# **Информатика и вычислительная техника**

УДК 621.316.925:681.3

## Пусковой орган автоматизированного управления переключением на резервный источник питания двигательной нагрузки

В. Ф. Сивокобыленко, С. В. Деркачѳв  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
[sergey\\_derkachev@mail.ru](mailto:sergey_derkachev@mail.ru)

### Аннотация

*Усовершенствован пусковой орган направления мощности автоматизированной системы управления переключением на резервный источник питания двигательной нагрузки, в котором для определения угла сдвига фаз между током на вводе секции и напряжением на секции в качестве опорного напряжения используется напряжение на секции рабочего источника питания из органа памяти доаварийного цикла измерений. Такой подход позволяет повысить надежность системы электроснабжения с непрерывным технологическим процессом и обеспечить успешную работу устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР) при близких коротких замыканиях и глубоких посадках напряжения.*

### Введение

Асинхронные и синхронные электродвигатели, как правило, являются основными приемниками электроэнергии на промышленных предприятиях с непрерывным технологическим процессом, таких как системы собственных нужд тепловых и атомных электростанций, газо- и нефтедобывающие предприятия, предприятиях химической и металлургической промышленности и т. д.

Применение синхронных и асинхронных электродвигателей на указанных предприятиях предъявляет ряд особых требований к обеспечению надежности их электроснабжения, поскольку даже кратковременное нарушение нормального режима электроснабжения может привести к нарушению устойчивой работы двигательной нагрузки и расстройству сложного технологического процесса. Наиболее эффективным способом для сохранения устойчивой работы электродвигателей на сегодняшний день является применение устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР), которые в сочетании с современными быстродействующими вакуумными выключателями позволяют выполнить подачу резервного питания за время 0,1-0,2 секунды.

Современный уровень развития микропроцессорной техники позволяет создавать устройства БАВР с различными алгоритмами работы. Существующие на сегодняшний день микропроцессорные устройства БАВР обладают рядом недостатков, так, например, устройства БАВР, описанные в [1, 2], не обеспечивают надежной работы при несимметричных коротких замыканиях в сети внешнего электроснабжения. Устройства БАВР [3, 4] требуют использования напряжения «здоровой» секции для фиксации

появления аварийного режима, которое может изменяться с частотой, отличной от частоты основного источника питания, и может привести к ложному срабатыванию, устройства, описанные в [5-8] требуют использования сигналов от дополнительных устройств релейной защиты в случае возникновения коротких замыканий.

Таким образом, совершенствование существующих устройств БАВР и разработка новых для обеспечения надежного электроснабжения ответственных потребителей является важной и актуальной задачей.

**Целью** данной работы является совершенствование пускового органа направления мощности устройства быстродействующего автоматического включения резерва при нарушении нормального режима электроснабжения, вызванного короткими замыканиями во внешней сети электроснабжения.

### Пусковой орган направления мощности

Принцип построения органа направления мощности для устройств БАВР, реагирующего на появление аварийного режима, подробно описан в работах [9, 10], а его реализация математически описывается выражением:

$$P = (u_x \cdot i_x + u_y \cdot i_y) \cdot \cos(\alpha) + (u_y \cdot i_x - u_x \cdot i_y) \cdot \sin(\alpha)$$

где  $u_x, u_y, i_x, i_y$  – ортогональные составляющие тока и напряжения;

$\alpha$  – угол максимальной чувствительности.

Зона работы реле определяется углом максимальной чувствительности  $\alpha$ , который может быть задан 0°, 30°, 60°, 90°.

Для организации пофазной работы органа направления мощности используются токи на вводе секции и напряжения на секции, к которой подключена двигательная нагрузка. На рис. 1 показаны результаты работы органа направления мощности с углом максимальной

чувствительности равным  $60^\circ$  при трехфазном коротком замыкании во внешней сети электроснабжения. В качестве критерия срабатывания пускового органа принято условие перехода мощности через ноль в отрицательную плоскость.

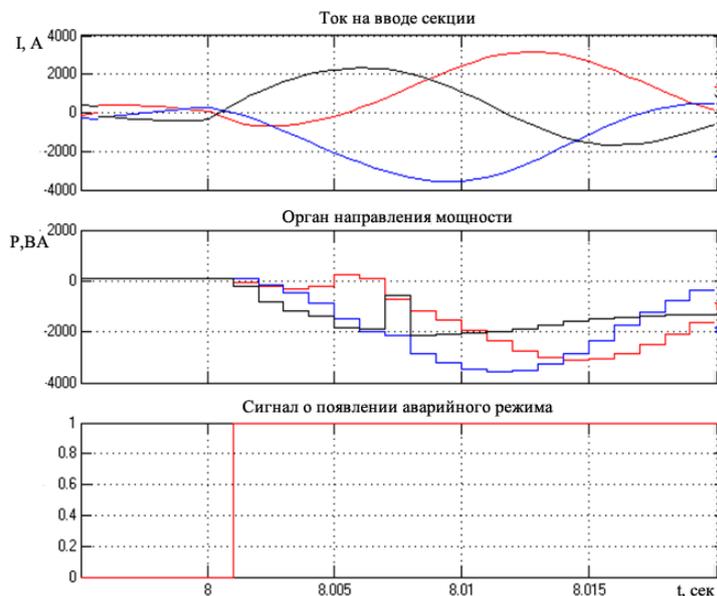


Рисунок 1 – Срабатывание органа направления мощности при внешнем трехфазном коротком замыкании

Из рис. 1 видно, что время реакции пускового органа направления мощности на появление аварийного режима при трехфазном коротком замыкании во внешней сети электроснабжения составило 0,001 сек.

Однако при таком подходе к

формированию пускового органа направления мощности пусковой орган может срабатывать ложно в режимах пуска двигательной нагрузки (рис. 2), так как в этих режимах из-за влияния апериодической составляющей в токе мощность кратковременно может изменять свой знак.

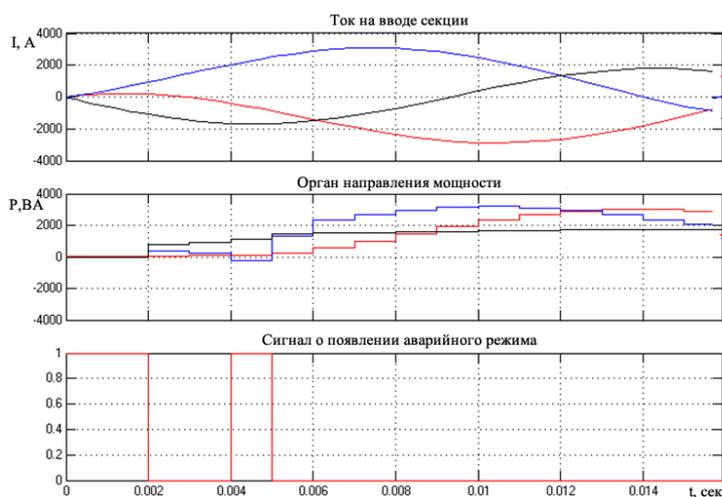


Рисунок 2 – Ложное срабатывание органа направления мощности в режиме пуска электродвигателей

В этом случае для обеспечения правильной работы пускового органа направления мощности и отстройки от пускового режима необходимо изменить угол максимальной чувствительности. Однако в этом случае время реакции пускового органа на аварийный режим увеличивается с 0,001 до 0,002

секунды, что приведёт к увеличению суммарного времени переключения на резервный источник питания.

При близких коротких замыканиях напряжение на секции снижается практически до нуля, что может привести к неправильной работе органа направления мощности и к ложному

срабатыванию устройства БАВР.

С целью повышения надежности работы и исключения ложного срабатывания пускового органа направления мощности при коротких замыканиях на секции и отходящих присоединениях для повышения уровня остаточного напряжения на секции предлагается в качестве напряжения, используемого для определения направления мощности, использовать напряжение, которое формируется на основе остаточного напряжения на секции и падения напряжения в трансформаторе. Напряжение для работы органа направления мощности в этом случае определяется по формуле:

$$U = U_{ост} + \Delta U,$$

где  $U_{ост}$  – остаточное напряжение на секции;

$\Delta U$  – падение напряжения на сопротивлении трансформатора.

Падение напряжения на трансформаторе рассчитаем по формуле:

$$\Delta U = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt},$$

где  $R$  – активное сопротивление трансформатора;

$L$  – индуктивность трансформатора.

Работа реле направления мощности при использовании напряжения, полученного описанным способом, при трехфазном коротком замыкании на секции 6 кВ показана на рис. 3. Угол максимальной чувствительности органа направления мощности был принят  $90^\circ$ .

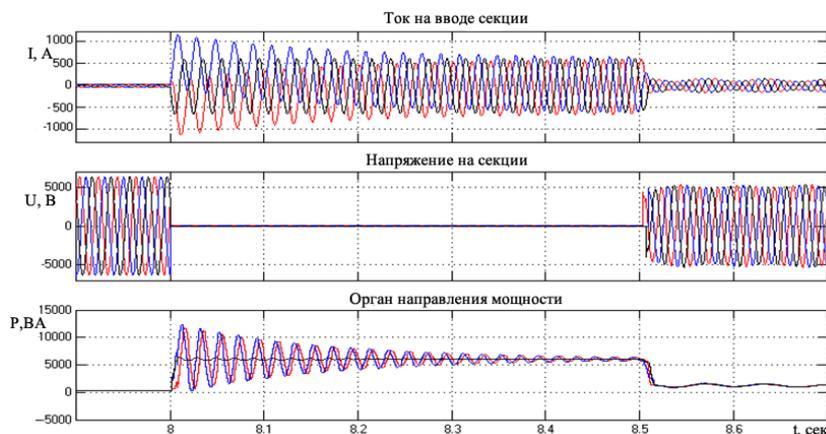


Рисунок 3 – Поведение реле направления мощности смешанного типа при коротком замыкании на секции

Из рис. 3 видно, что направление мощности на вводе секции не изменилось, а, следовательно, и орган направления мощности в таком режиме срабатывать не будет, что обеспечит надежность работы пускового органа при коротких замыканиях, как на секции, так и на отходящих присоединениях.

На рис. 4 показаны результаты моделирования работы рассмотренного органа направления мощности при трехфазном коротком замыкании в сети внешнего электроснабжения и время его реакции на появление аварийного режима, которое составило 0,002 секунды.

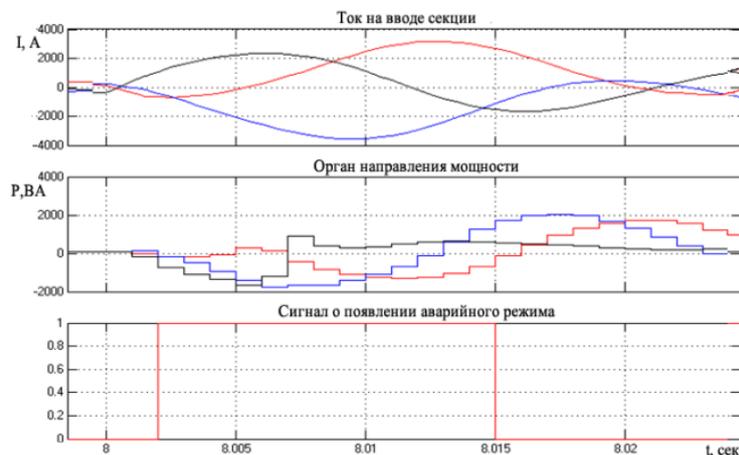


Рисунок 4 – Результаты работы органа направления мощности при внешнем трехфазном коротком замыкании

Однако одним из выявленных недостатков приведенного подхода к формированию органа направления мощности оказалась возможность ложного срабатывания в режиме пуска электродвигателей, что связано с наличием несимметрии фазных токов на начальном участке пуска.

Поэтому было предложено повысить надежность и селективность работы органа направления мощности путем использования токов и напряжений прямой последовательности для определения направления мощности на вводе секции. Поскольку при близких коротких замыканиях, как во внешней сети электроснабжения, так и на отходящих присоединениях уровень напряжения на секции

снижается практически до нуля, то для правильного определения направления мощности предложено использовать мгновенные значения напряжения прямой последовательности предшествующего периода напряжения, хранящиеся в блоке памяти. Такой подход позволяет отказаться от традиционных алгоритмов, в которых для правильной работы реле направления мощности используют долю напряжения резервного источника питания. На рис. 5 показаны результаты моделирования работы предложенного органа направления мощности при внешнем трехфазном коротком замыкании с установленным углом максимальной чувствительности  $60^\circ$ .

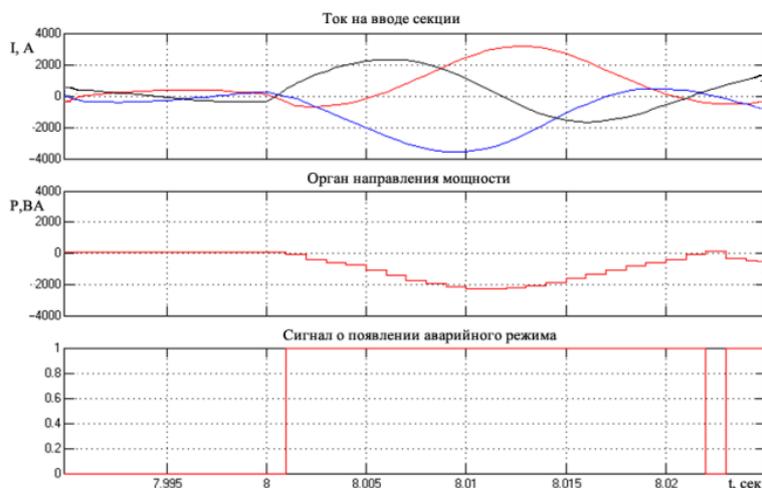


Рисунок 5 – Результаты работы органа направления мощности прямой последовательности при внешнем трехфазном коротком замыкании

Как видно из рис. 5 время реакции на появление аварийного режима составило 0,001 сек., что обеспечивает максимальное по скорости выявление аварийного режима в сети внешнего электроснабжения.

На рис. 6 и на рис. 7 приведены результаты работы органа направления мощности прямой последовательности при коротком замыкании на секции и в режиме пуска двигательной нагрузки соответственно.

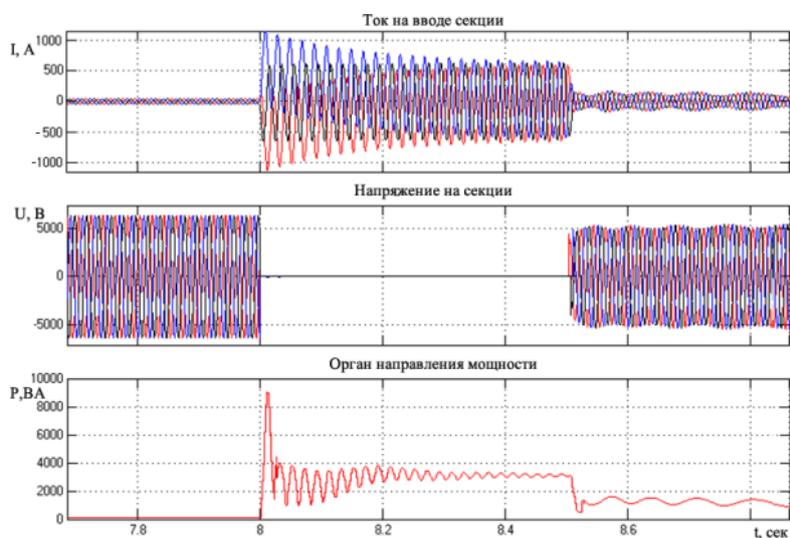


Рисунок 6 – Результаты работы органа направления мощности прямой последовательности при коротком замыкании на секции

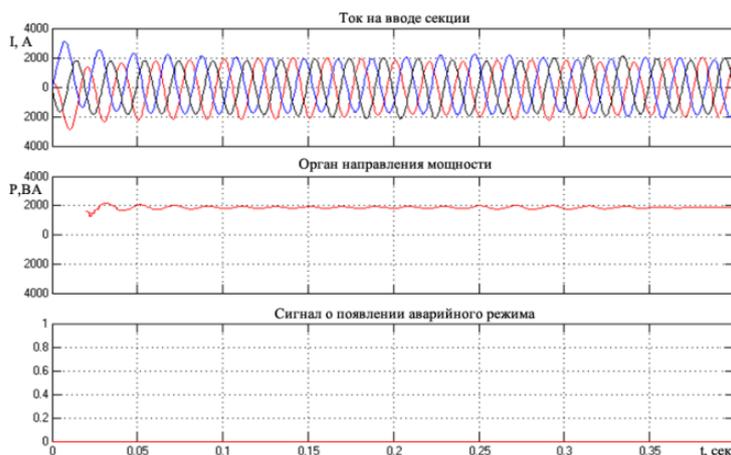


Рисунок 7 – Поведение органа направления мощности прямой последовательности при пуске электродвигателей

Из рис. 6 видно, что орган направления мощности прямой последовательности, несмотря на глубокую посадку напряжения на секции, не срабатывает и тем самым обеспечивает селективную работу устройства БАВР.

Из рис. 7 видно, что предложенные алгоритмы исключают возможность ложной работы органа направления мощности в режиме пуска электродвигателей.

На основе проведенных исследований в табл. 1 приведена сравнительная характеристика

рассмотренных алгоритмов органа направления мощности:

I – алгоритм пофазного реле направления мощности;

II – алгоритм органа направления мощности с использованием сформированного на основе остаточного напряжения на секции и падения напряжения в трансформаторе;

III – алгоритм органа направления мощности с органом памяти по напряжению.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика алгоритмов работы органа направления мощности

Алгоритм	Вид повреждения	Время реакции, сек	Угол максимальной чувствительности, град	Срабатывание в пусковом режиме
I	Внешнее трехфазное короткое замыкание	0,001	60	+
II		0,002		+
III		0,001		-
I		0,002	90	-
II		0,002		-
III		0,001		-
I	Внешнее двухфазное короткое замыкание	0,001	60	+
II		0,002		+
III		0,001		-
I		0,002	90	+
II		0,002		+
III		0,002		-
I	Внешнее однофазное короткое замыкание	0,004	60	+
II		0,005		+
III		0,004		-
I		0,003	90	+
II		0,003		+
III		0,004		-

Из данных табл. 1 видно, что III алгоритм пускового органа направления мощности устройства БАВР является наиболее эффективным и при значении угла максимальной чувствительности 60° градусов наиболее быстродействующий, что позволяет сократить время переключения на резервный источник питания. А использование в органе направления

мощности в качестве контролируемого параметра направление мощности прямой последовательности на вводе секции позволяет обеспечить селективную работу органа направления мощности при возникновении несимметричных коротких замыканий, как в сети внешнего, так и внутреннего электроснабжения.

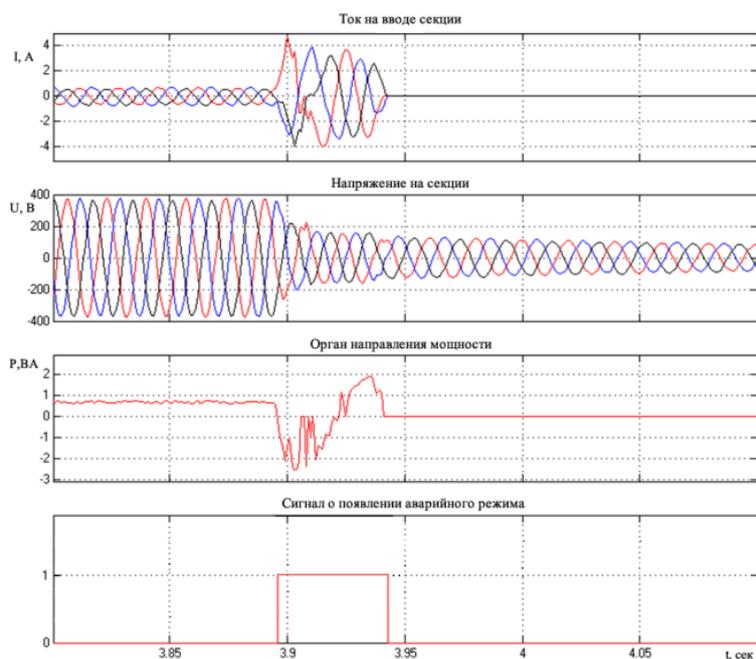
### **Результаты лабораторных испытаний органа направления мощности устройства БАПР**

Проверка работы пускового органа устройства БАПР была выполнена на лабораторном стенде, моделирующем двухсекционную подстанцию с двигательной нагрузкой в виде асинхронных двигателей напряжением 0,4 кВ.

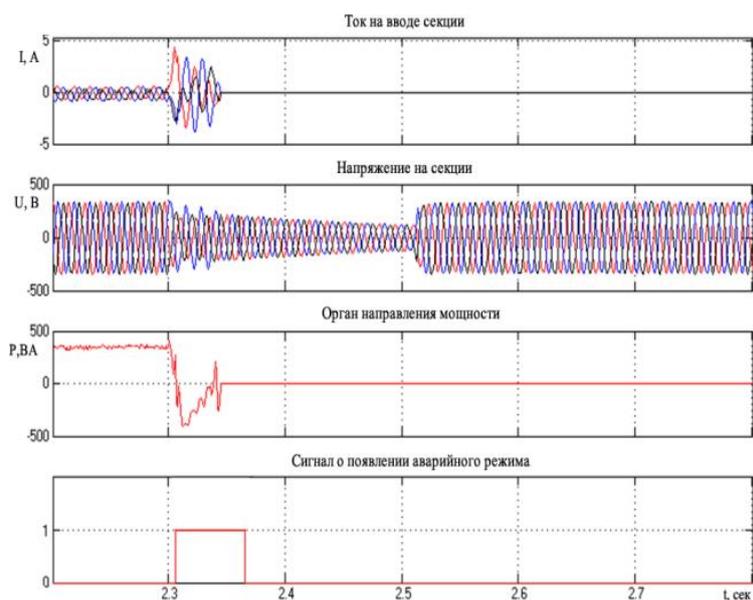
На рис. 8 приведены осциллограммы работы усовершенствованного пускового органа направления мощности при трехфазном коротком замыкании в сети внешнего

электрообеспечения. Из рис. 8 видно, что при возникновении трехфазного короткого замыкания в сети внешнего электрообеспечения время реакции усовершенствованного органа направления мощности микропроцессорного устройства БАПР составило 0,003 сек, после чего была дана команда на отключение вводного выключателя секции.

На рис. 9 показаны осциллограммы работы усовершенствованного пускового органа направления мощности при двухфазном коротком замыкании в сети внешнего электрообеспечения.



*Рисунок 8 – Осциллограмма работы органа направления мощности прямой последовательности при внешнем трехфазном коротком замыкании*



*Рисунок 9 – Осциллограмма работы органа направления мощности прямой последовательности при внешнем двухфазном коротком замыкании*

Из рис. 9 видно, что время реакции усовершенствованного пускового органа направления мощности на появление двухфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения составило 0,003 сек.

На рис. 10 приведены осциллограммы работы усовершенствованного пускового органа направления мощности в режиме пуска

двигательной нагрузки. Из рис. 10 видно, что усовершенствованный орган направления мощности не срабатывает в пусковых режимах двигательной нагрузки, что обеспечивает селективную работу микропроцессорного устройства БАВР и исключает его ложную работу в пусковых режимах.

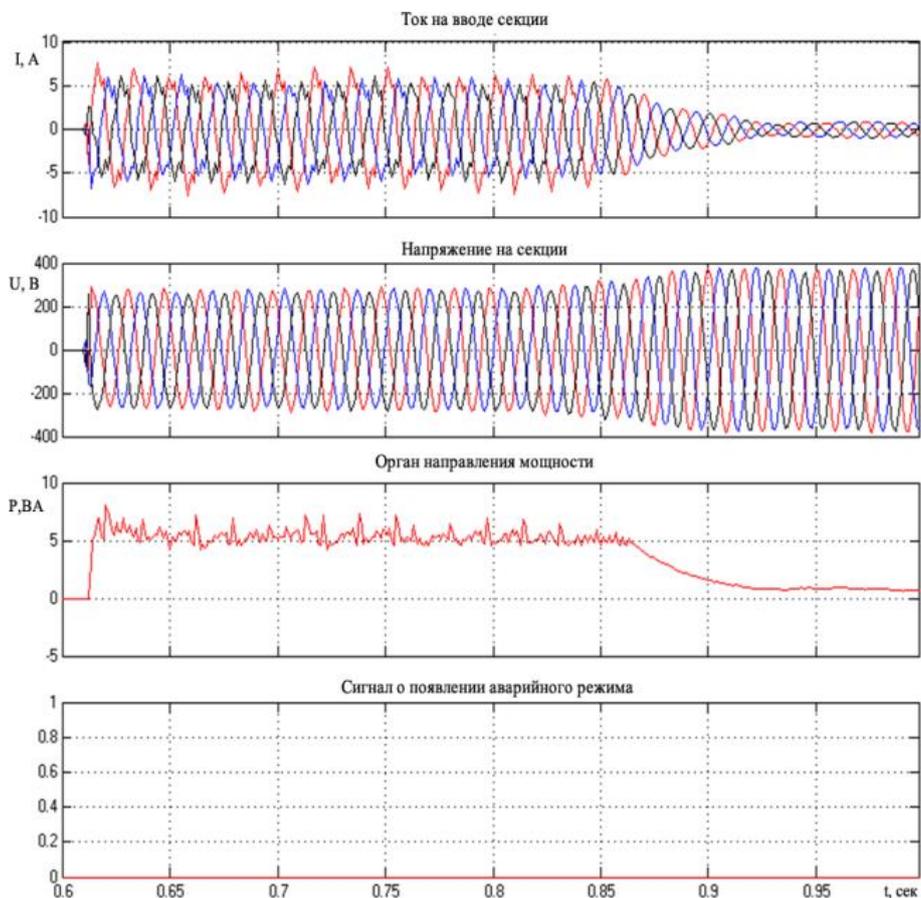


Рисунок 10 – Осциллограмма работы органа направления мощности прямой последовательности при пуске двигательной нагрузки

### Выводы

Усовершенствован пусковой орган БАВР путем определения в нем направления мощности прямой последовательности, что позволило обеспечить надёжную и селективную работу устройства БАВР при возникновении аварийных режимов в сети внешнего и внутреннего электроснабжения.

В устройстве БАВР предложено использовать в качестве опорного напряжение на секции рабочего источника питания из органа памяти доаварийного цикла измерений, что позволило обеспечить его надёжную работу при коротких замыканиях и глубоких посадках напряжения.

Результатами лабораторных испытаний усовершенствованного пускового органа направления мощности устройства БАВР подтверждена эффективность применения

разработанного алгоритма работы органа направления мощности устройства БАВР для систем электроснабжения с двигательной нагрузкой.

### Литература

1. Патент на изобретение 2326481(13) С1, Российская федерация, МПК H02J 9/06 Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей и устройство для его осуществления / Цырук С. А., Гамазин С. И., Пупин В. М., Козлов В. Н., Павлов А. О.; заявитель и правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)» (ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)»). - № 2006139086/09; заявка 07.11.2006; опубл. 07.11.2006

2. Патент на изобретение 2447565(13) С1, Российская федерация, МПК H02J 9/06 Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей и устройство для его осуществления / Гамазин С. И., Жуков В. А., Куликов А. И., Пупин В. М., Цырук С. А.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»» (ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ»). - № 2011105886/07; заявка 17.02.2011; опубл. 17.02.2011.

3. Жуков В. А. Быстродействующее устройство АВР с однократным принципом определения нарушения нормального электроснабжения потребителей / В. А. Жуков, В. М. Пупин, С. И. Гамазин, А. И. Куликов, С. А. Цырук // Электрооборудование: Эксплуатация и ремонт – 2011 - № 9. – С. 11-18.

4. Киреева Э. Современные устройства быстродействующего АВР / Э. Киреева, В. Пупин, Д. Гумиров // Главный энергетик. – 2005. - № 11. – С. 23-25.

5. 30 ms High Speed Transfer System (HSTS): Product / ABB Power and productivity for a better world, - 2011. - 12 с.

6. SUE3000 High Speed Transfer Device: Product Description / ABB Power and productivity for a better world, – 2010. – 24 с.

7. Siemens High-Speed Busbar Transfer System - Operation Manual / Siemens Power Automation Ltd, - 2012. - 14 с.

8. Multifunction High Speed Busbar Transfer Device 7VU683 / Siemens Power Automation Ltd. – 2014. – 24 с.

9. Сивокобыленко В. Ф. Особенности измерительных органов цифровых устройств быстродействующего автоматического включения резерва для систем электроснабжения с двигательной нагрузкой / Сивокобыленко В. Ф. Деркачев С. В. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3/2015 (31). – С. 126-133.

10. Сивокобыленко В. Ф. Разработка микропроцессорного устройства для подачи резервного питания при нарушениях электроснабжения ответственных потребителей / Сивокобыленко В. Ф. Деркачев С. В. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 1/2016 (33). – С. 97-103.

**Сивокобыленко В. Ф., Деркачев С. В. Пусковой орган автоматизированного управления переключением на резервный источник питания двигательной нагрузки.** Усовершенствован пусковой орган направления мощности автоматизированной системы управления переключением на резервный источник питания двигательной нагрузки, в котором для определения угла сдвига фаз между током на вводе секции и напряжением на секции в качестве опорного напряжения используется напряжение на секции рабочего источника питания из органа памяти доаварийного цикла измерений. Такой подход позволяет повысить надежность системы электроснабжения с непрерывным технологическим процессом и обеспечить успешную работу устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР) при близких коротких замыканиях и глубоких посадках напряжения.

**Ключевые слова:** автоматизированная система, пусковой орган, надежность электроснабжения, переключение питания, быстродействующее автоматическое включение резерва.

**Syvokobylenko V., Derkachev S. Starting device of automated control switching to a backup power source of the motor load.** The starting device of the power direction of the automated control system for switching to the backup power source of the motor load has been improved, in which for determine the angle between the current at the input bus bar and the voltage on the bus bar, as reference voltage on the bus bar of the working power supply is used the voltage from the memory device of the pre-emergency measurement cycle. Such an approach makes it possible to increase the reliability of the power supply system with a continuous technological process and to ensure the successful operation of fast-acting automatic transfer switch devices (FATS) at short circuits and deep voltage drops.

**Keywords:** automated system, starting device, reliability of power supply, power switching, fast-acting automatic transfer switch.

Статья поступила в редакцию 29.04.2019  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Задачи составления оптимального расписания программ обработки деталей для станков с ЧПУ и методы их решения

Л. А. Лазебная, Д. В. Бельков

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

[l.lazebnay@mail.ru](mailto:l.lazebnay@mail.ru), [belkovdv@list.ru](mailto:belkovdv@list.ru)

### Аннотация

*В статье сформулированы задачи минимизации переналадок станков с ЧПУ и максимизации вероятности работы без сбоев оборудования. Для решения задач предложены «жадные» методы, которые позволят повысить производительность работы станков с ЧПУ и могут быть использованы в САПР технологических процессов механической обработки деталей.*

### Введение

Ведущую роль в современном машиностроении играют станки с числовым программным управлением. Станки с программным управлением сейчас используются практически во всех направлениях машиностроения, выполняя разнообразные технологические операции – от токарных до шлифовальных и т. п. Станок с ЧПУ реализует заложенную в него программу работы, совершая требуемые операции и осуществляя переналадку автоматически. Опции, которые позволяют вводить и изменять нужные параметры работы станка, размеры, точность и переключаться на нужные режимы работы – все это открывает колоссальные возможности при обрабатывании металлических заготовок. Роль человека сводится только к созданию программ и переналадкам станка при переключениях от одной программы к другой.

Для повышения эффективности программирования станка в работе [1, 2] предложена система автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов токарной обработки деталей. Ее применение позволяет:

- проследить ход обработки детали;
- уменьшить количество рутинной работы, связанной с повторяющимися действиями;
- уменьшить количество ошибок в программе для ЧПУ;
- автоматизировать создание мнемкокода программы для ЧПУ.

При составлении программы разработчик может следить за обработкой детали, используя графическое изображение траектории инструмента. Просмотр опорных точек детали позволяет разработчику точно задавать параметры технологических операций.

Использование САПР при программировании станков приводит к значительному повышению производительности

труда за счет ускорения процесса создания программ [3]. Однако не все системы дают возможность увеличить скорость обработки партии деталей за счет выполнения программ в оптимальной последовательности. Для достижения этой цели необходимо решить задачу составления рационального расписания выполнения программ. Она возникает на этапе эксплуатации станков с ЧПУ при механической обработке деталей. В данной работе предлагаются две постановки задачи составления рационального расписания выполнения программ и методы их решения.

В первой задаче рассматривается вопрос минимизации количества переналадок станков с целью ускорения обработки партии деталей. Исходными данными задачи являются сроки выполнения программ и директивное время обработки деталей. Функциональное назначение программ предполагается заданным в соответствии с технологией обработки деталей.

Во второй задаче рассматривается вопрос максимизации вероятности обработки партии деталей без сбоев оборудования, которые задерживают выполнение программ обработки деталей. Ускорение выполнения программ может быть достигнуто за счет составления расписания программ с максимизацией вероятности их выполнения без сбоев оборудования.

### Задача минимизации количества переналадок станков с ЧПУ

Для решения задачи необходимо построить математическую модель. Введем обозначения:  $m$  – число деталей;  $n$  – число программ, совпадающее с максимальным количеством переналадок станка;  $T_j$  – директивное время обработки детали  $i$ ;  $x_j = 1$ , если программа  $j$  используется при обработке деталей, иначе  $x_j = 0$ ;  $V_j$  – время выполнения программы  $j$ ;  $U_j$  – остаточное время выполнения программы  $j$ :

$$U_j = B_j - \sum_{i=1}^m V_i x_j;$$

$a_{ij} = 1$ , если деталь  $i$  может обрабатываться программой  $j$ :  $T_j \geq U_j$ , иначе  $a_{ij} = 0$ .

В задаче составления расписания необходимо минимизировать количество используемых программ, что приводит к минимизации числа переналадок. Задача изоморфна известной [4] задаче о покрытии.

Целевая функция будет иметь вид:

$$\sum_{j=1}^n x_j \rightarrow \min. \quad (1)$$

Неизвестные в данной задаче должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1, & i = 1, 2, \dots, m \\ X_j \in \{0,1\} \end{cases} \quad (2)$$

В результате решения задачи необходимо найти значения матрицы  $A$  и вектора  $X$ , которые обеспечивают минимум целевой функции (1) при ограничениях (2).

### Метод решения задачи минимизации количества переналадок станков

Для многих оптимизационных задач решение можно найти с помощью жадных алгоритмов (greedy algorithms). Такой алгоритм делает на каждом шаге локально оптимальный выбор, в надежде, что итоговое решение также окажется оптимальным. Это не всегда так, но для многих задач такие алгоритмы действительно дают оптимум. Для решения задачи (1)-(2) можно использовать «жадный» метод с временной сложностью  $O(m \cdot n)$ . Последовательность действий решения задачи следующая:

Шаг 1. Переменной  $i$  присвоить значение единица, элементам вектора  $U$  присвоить значения элементов вектора  $B$ , элементам матрицы  $A$  и вектора  $X$  присвоить значение ноль.

Шаг 2. Переменным  $a_{ij}$  и  $x_j$  присвоить значение единица, если  $V_i \geq U_i$ .

Шаг 3. Переменной  $i$  присвоить значение  $(i + 1)$ .

Шаг 4. Если  $i \geq m$ , то перейти к шагу 2, иначе перейти к шагу 5.

Шаг 5. Вычислить значение целевой функции и завершить метод.

Для «жадных» методов в задаче о покрытии известна верхняя оценка максимальной относительной погрешности:  $A/P \leq I + \ln(m)$ , где  $A$  – решение, полученное

«жадным» методом,  $P$  – оптимальное решение задачи. Жадный метод позволяет получить оценку значения целевой функции через параметры матрицы  $A$ : если  $\varepsilon(A)$  – глубина матрицы  $A$ , и каждый столбец матрицы  $A$  содержит не менее  $k$  единиц, то справедливо неравенство:  $\varepsilon(A) \leq n/k (1 + \ln(mk/n)) + 1$ . Для любого фиксированного числа  $\delta > 0$  для большинства матриц выполняется условие:  $\varepsilon(A) \geq (1 - \delta) n/k \ln(mk/n)$ .

Таким образом, жадный метод для задачи о покрытии является асимптотически оптимальным для широкого класса матриц  $A$  [4].

### Задача максимизации вероятности обработки деталей без сбоев оборудования

Для решения задачи необходимо построить математическую модель. Введем обозначения:  $T$  – время выполнения программы,  $P$  – вероятность того, что сбой оборудования не помешает выполнению программы. Если в процессе выполнения программы возник сбой оборудования, то ее выполнение прекращается. Программа будет выполняться заново после устранения неполадки. Поэтому величина  $P$  является вероятностью выполнения программы с первой попытки.

Определим значения  $P$  при заданной величине  $T$  и условии, что поток сбоев – это поток Эрланга  $k$ -го порядка с параметром  $\lambda$ . Пусть, например, программа начинает выполняться сразу после устранения очередного сбоя. В этом случае вероятность  $P$  определяется по формуле  $P = 1 - F(T)$ , где  $F(T) = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} (\lambda \cdot T)^n \cdot e^{-\lambda T} / n!$  [3]. Если  $k = 1$ , то  $F(T) = 1 - e^{-\lambda T}$  и  $P = e^{-\lambda T}$ . В этом случае значения  $P$  будут тем больше, чем меньше величина  $T$ .

Если  $k = 2$ , то  $F(T) = 1 - \lambda \cdot T \cdot e^{-\lambda T}$  и  $P = \lambda \cdot T \cdot e^{-\lambda T}$ ,  $dP/dT = \lambda \cdot e^{-\lambda T} - \lambda^2 \cdot T \cdot e^{-\lambda T}$ . Функция  $P$  имеет максимальное значение, если  $T = 1/\lambda$ .

Пусть программа начинает выполняться в момент, когда после очередного сбоя оборудования прошло  $t$  единиц времени. Это означает, что программа не является первой в списке выполняемых программ. Перед ней были другие программы, на выполнение которых потребовалось  $t$  единиц времени.

В этом случае значение  $P$  можно определить по формулам [5]:

$$f_r = \frac{(\lambda[\lambda(r+t)])^{k-1} \cdot e^{-\lambda(r+t)}}{((k-1)! R((k-1), \lambda \cdot t))},$$

где

$$R((k-1), \lambda \cdot t) = \sum_{n=0}^{k-1} (\lambda \cdot t)^n \cdot e^{-\lambda t} / n!$$

$$P = \int_T^{\infty} f_r dr$$

Для быстрого выполнения программ необходимо составить их оптимальное расписание. Критерием оптимальности является максимизация вероятности выполнения программ с первой попытки (без сбоев оборудования).

Введем обозначения:  $T_j$  – время выполнения программы  $i$ ,  $P_{ij}$  – вероятность выполнения программы  $i$  с первой попытки, если в расписании оно находится на  $j$ -м месте. Пусть на  $j$ -м месте может находиться несколько программ, т.е. разные программы могут начинать выполняться одновременно, но на разных станках. В таком случае количество мест в расписании меньше, чем число программ.

Обозначим:  $m$  – количество программ,  $n$  – количество мест в расписании,  $X_{ij} = 1$ , если задание  $i$  должно быть в расписании на  $j$ -м месте, иначе  $X_{ij} = 0$ .

Пусть число программ, которые могут начинать выполняться одновременно ограничено и  $B_j$  – допустимое суммарное время выполнения программ, которые находятся в расписании на  $j$ -м месте.

Задача об оптимальном расписании выполнения программ будет иметь следующий вид. Целевая функция:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} X_{ij} \rightarrow \max \quad (3)$$

Неизвестные в данной задаче должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m T_i X_{ij} \leq B_j, & j = 1, 2, \dots, n \\ X_{ij} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (4)$$

В задаче необходимо найти значения матрицы  $X$  расписания программ, которая обеспечивает максимум целевой функции (3) при ограничениях (4). В задаче максимизируется вероятность выполнения программ без сбоев оборудования.

Для решения задачи (3)-(4) в данной работе предлагаются два жадных метода, отличающиеся друг от друга по точности и времени решения задачи.

### Методы решения задачи максимизации вероятности обработки деталей

Методы решения задачи (3)-(4) состоят из  $m \cdot n$  этапов,  $m$  – количество программ,  $n$  – количество мест в расписании. На  $i$ -м этапе выполняется процедура назначения  $i$ -й программы на одно из мест в расписании.

Процедура состоит из 3 шагов.

На первом шаге метода  $A1$  определяется место в расписании с наибольшим значением  $P_{ij}$ ,  $j = 1, \dots, n$ . На втором шаге, если условие  $\sum_{i=1}^m T_i X_{ij} \leq B_j$  выполняется, то программа назначается на это место. Иначе назначение программы на найденное место запрещается, и процедура повторяется с первого шага. Временная сложность метода  $A1$  составляет  $O(m \cdot n^2)$ .

На первом шаге метода  $A2$  сравниваются величины  $B_j$  и величины  $\sum_{i=1}^m T_i X_{ij}$ , чтобы найти допустимые для программы места в расписании. На втором шаге, среди найденных мест в расписании определяется место с наибольшим значением  $P_{ij}$ ,  $j = 1, \dots, n$ . На третьем шаге программа назначается на это место. Исходными данными для процедуры служат значения  $P_{ij}$ ,  $T_j$ ,  $B_j$ . Временная сложность метода  $A2$  составляет  $O(m \cdot n)$ .

Вычислительные эксперименты при исследовании предложенных методов показали, что в большинстве случаев метод  $A2$  превосходит метод  $A1$  по точности.

Результаты экспериментов показаны на рис. 1.

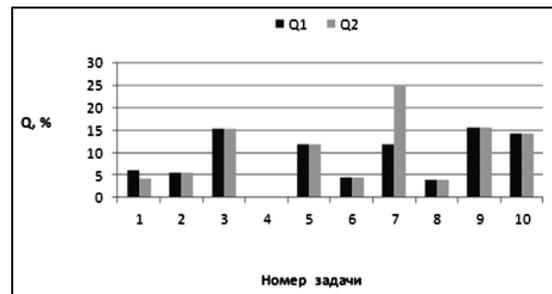


Рисунок 1 – Относительная погрешность методов  $A1$  и  $A2$

Однако в некоторых случаях метод  $A2$  значительно уступает методу  $A1$  по быстрдействию. Поэтому среди предложенных методов решения задачи невозможно выбрать лучший по всем параметрам.

При решении конкретных задач составления расписаний можно использовать последовательно оба метода с целью выбора расписания, обеспечивающего максимальное значение целевой функции.

**Задача мониторинга работы станка**

В процессе длительной работы станка могут возникнуть неисправности, требующие устранения. Непрерывный автоматический мониторинг работы станка с целью обнаружения неисправности требует больших затрат как вычислительных, так и временных. Мониторинг целесообразно проводить периодически.

Введем обозначения:  $\tau_k$  – среднее время обработки детали на станке,  $s$  – число деталей. Состояния, в которых может находиться станок, разделяются на два класса. Первый класс содержит единственное состояние неисправности. После устранения неисправности станок начинает функционировать. Второй класс состояний содержит множество состояний функционирования. В каждом таком состоянии обрабатывается одна деталь, поэтому количество состояний равно  $s$ . Момент завершения обработки детали, совпадающий с моментом перехода к обработке другой детали, является моментом перехода станка в другое состояние функционирования. Из любого состояния функционирования система может перейти в другое состояние функционирования или в состояние неисправности.

Граф состояний системы показан на рис. 2.

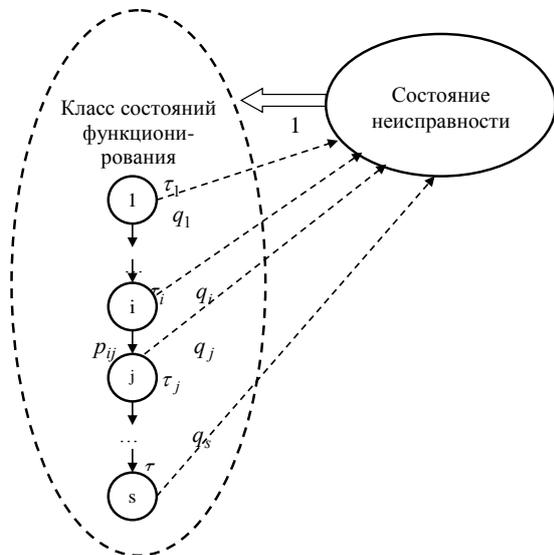


Рисунок 2 – Граф состояний станка

Пусть система пребывает в  $i$ -м состоянии функционирования случайное время с произвольной функцией распределения и средним значением  $\tau_i$ ,  $q_i$  – вероятность перехода из  $i$ -го состояния функционирования в состояние неисправности,  $P_{ij}$  – вероятность перехода из  $i$ -го состояния функционирования в  $j$ -е состояние функционирования, вектор начального распределения имеет вид:

$$\sum_{j=1}^s P_{ij} < 1, \quad P_1 = \{P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1s}\}.$$

Такой процесс функционирования системы является полумарковским. Отличие от марковского процесса состоит в том, что матрица переходов является полустохастической  $\left(\sum_{j=1}^s P_{ij} < 1\right)$  и случайное время пребывания системы в состояниях функционирования имеет произвольную функцию распределения.

Для определения среднего времени пребывания станка в классе состояний функционирования до перехода в состояние неисправности используем методику [6].

Пусть  $\alpha_i$  – среднее время пребывания системы в классе состояний функционирования до перехода в состояние неисправности при условии, что начальным состоянием является состояние  $i$ . Время  $\alpha_i$  состоит из времени  $\tau_i$  и суммы времен, накопленных в состояниях  $j$ :

$$\alpha_i = \tau_i + \sum_{j=1}^s P_{ij} \cdot \alpha_j, \quad j \neq i. \quad (5)$$

Для реальных условий работы станка сложно определить точные значения переходных вероятностей  $P_{ij}$ . Число  $s$  может достигать больших значений и решение системы уравнений (5) трудоемко. Поэтому среднее время  $T$  пребывания системы в классе состояний функционирования до перехода в состояние неисправности целесообразно определить приближенно.

В оптимальных условиях работы станок должен редко находиться в состоянии неисправности. Поэтому вероятности переходов между состояниями функционирования близки к единице ( $P_{ij} \approx 1$ ) и вероятность перехода станка из класса состояний функционирования в состояние неисправности близка к нулю ( $q_i \approx 0$ ). Следовательно, выполняются условия укрупнения полумарковских систем и для определения значения  $T$  можно использовать метод фазового укрупнения полумарковских систем.

Для оценки погрешности, возникающей при укрупнении состояний станка, рассмотрим идеальный станок, который отличается от реального станка тем, что для него никогда не требуется переналадка. Такой станок не имеет состояния неисправности, все состояния являются состояниями функционирования.

Введем обозначения:  $P_{ij}$  – вероятность перехода из  $i$ -го состояния идеального станка в  $j$ -е состояние, вектор начального распределения идеального станка имеет вид:

$$\sum_{j=1}^s P_{ij}^* = 1, \quad P_i^* = \left\{ P_{i1}^*, P_{i2}^*, \dots, P_{is}^* \right\}.$$

Переходные вероятности идеального станка связаны с переходными вероятностями реального станка по формуле:

$$P_{ij}^* = P_{ij} + q_{ij},$$

где  $q_{ij}$  – вероятность перехода из  $i$ -го состояния функционирования в состояние неисправности при условии, что следующим состоянием функционирования является  $j$ -е состояние.

Матрица  $Q$  характеризует параметр близости идеального станка реальному станку  $\lambda$ :

$$\gamma = \max(\gamma_{ij}),$$

где

$$\gamma_{ij} = P_{ij} / P_{ij}^* = \left( P_{ij} - q_{ij} \right) / P_{ikj}^* = 1 - q_{ij} / P_{ij}^*.$$

Для реального станка значение  $\gamma$  близко к единице, значит, в системе уравнений (5)

можно заменить значения  $P_{ij}^*$  значениями  $P_{ij}$ :

$$\alpha_i = \tau_i + \sum_{j=1}^s P_{ij} \cdot \alpha_j.$$

Таким образом, погрешность, возникающая при укрупнении состояний системы, определяется значением  $(1 - \gamma)$ .

Обозначим:  $q$  – вероятность перехода системы из класса состояний функционирования в состояние неисправности,  $p$  – вероятность пребывания системы в классе состояний функционирования:  $p = 1 - q$ .

Все состояния функционирования станка склеиваются в одно состояние функционирования.

Граф состояний полученной укрупненной системы представлен на рис. 3.

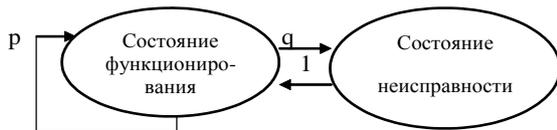


Рисунок 3 – Граф состояний укрупненной системы

Процесс переходов укрупненной системы является марковским с двумя состояниями. Переключения состояний управляются

дискретной цепью Маркова с матрицей переходов:

$$\pi = \begin{vmatrix} p & q \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Основные характеристики укрупненной системы приближенно, с погрешностью  $(1 - \gamma)$ , могут быть приняты в качестве характеристик реального станка. Поэтому время пребывания станка в классе состояний функционирования приблизительно равно времени пребывания укрупненной системы в состоянии функционирования. Это время распределено показательно с параметром  $\lambda$ , где  $\lambda$  – интенсивность переходов системы из состояния функционирования в состояние неисправности.

Пусть событием является переход системы из состояния функционирования в состояние неисправности. На укрупненную систему, находящуюся в состоянии функционирования, действует пуассоновский поток событий с интенсивностью  $\lambda$ , переводящий ее в состояние неисправности. Из состояния неисправности система переходит в состояние функционирования. Пусть значение  $t_a$  равно среднему времени неисправности и  $\mu$  – интенсивность переходов системы из состояния неисправности в состояние функционирования,  $\mu = 1 / t_a$ . Граф переходов укрупненной системы показан на рис. 4.

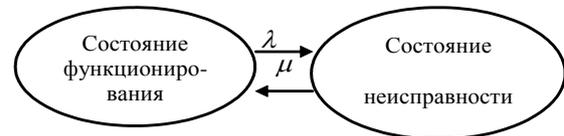


Рисунок 4 – Граф переходов укрупненной системы

Поведение вероятностей  $p_1$  и  $p_2$  состояний укрупненной системы описывается уравнениями Колмогорова [7]:

$$\begin{aligned} dp_1(t) / dt &= p_2(t)\mu - p_1(t)\lambda, \\ dp_2(t) / dt &= p_1(t)\lambda - p_2(t)\mu, \\ p_2(t) &= p_1(t). \end{aligned}$$

Пусть в начальный момент времени укрупненная система находилась в состоянии функционирования:  $p_1(0) = 1, p_2(0) = 0$ . В таком случае решениями уравнений являются следующие выражения:

$$p_1(t) = \mu / (\lambda + \mu) + (\lambda + \mu) e^{-(\lambda + \mu)t},$$

$$p_2(t) = \lambda / (\lambda + \mu) - \lambda e^{-(\lambda + \mu)t} / (\lambda + \mu).$$

При большой величине  $t$  в укрупненной системе устанавливается стационарный режим:

$$P_1 = \mu / (\lambda + \mu), P_2 = \lambda / (\lambda + \mu).$$

Обозначим:  $\tau_i$  – среднее время пребывания системы в  $i$ -м состоянии функционирования,  $p_i$  – вероятность пребывания системы в  $i$ -м состоянии функционирования,  $q_i$  – вероятность перехода системы из  $i$ -го состояния функционирования в состояние неисправности.

Для определения значений времени  $T$  и дисперсии  $D_T$  используются известные формулы:

$$q = \sum_{i=1}^s p_i \cdot q_i, \quad \lambda = q / \sum_{i=1}^s p_i \cdot \tau_i, \quad (6)$$

$$T = 1 / \lambda, \quad D_T = 1 / \lambda^2.$$

Пусть состояния функционирования системы равновероятны:  $p_i = 1 / s$ , переходы системы из каждого состояния функционирования в состояние перераспределения файлов равновероятны:  $q_i = 1 / s$ . В таком случае:

$$q = 1 / s, \quad T = s \cdot \sum_{i=1}^s \tau_i / s = \sum_{i=1}^s \tau_i, \quad D_T = T^2.$$

Таким образом, среднее время  $T$  пребывания системы в классе состояний функционирования до перехода в состояние неисправности определяется по формуле:

$$T = \sum_{i=1}^s \tau_i \quad (7)$$

Обозначим:  $\theta$  – среднее значение интервала между событиями с применением мониторингов. Длительность мониторинга много меньше, чем время  $T$ , поэтому для определения  $\theta$  можно использовать известную [7] формулу:

$$\theta = T + DT / T.$$

В таком случае:

$$\theta = 2T = 2 \sum_{i=1}^s \tau_i = 2 / \lambda \quad (8)$$

Таким образом, если мониторинги применяются, то поток событий является потоком Эрланга 2-го порядка с интенсивностью  $\lambda$ :  $\lambda = 1 / \theta = \lambda / 2$ .

Определим оптимальную периодичность мониторингов. Обозначим:  $\Omega$  – пауза между мониторингами,  $t_{mon}$  – время проведения мониторинга. Целевая функция при периодическом мониторинге состоит из двух частей. Во-первых, число мониторингов и время  $t_{mon}$  должны быть минимальными, чтобы задержка обработки детали, вызванная мониторингом, была минимальной. Для выполнения этого условия необходимо минимизировать величину  $t_{mon} / \Omega$ . Во-вторых, на интервале  $\theta$  нужно с минимальной задержкой опознать событие. Задержка опознания события будет минимальной, если оно возникло во время мониторинга. Величина этой задержки не превышает  $t_{mon}$ . Максимальная задержка опознания события будет, если событие возникло сразу по окончании мониторинга. Она больше значения  $t_{mon}$  на величину  $\Omega$ . Для минимизации задержки опознания события время между мониторингами на интервале  $\theta$  должно быть минимальным. Поэтому необходимо условие:  $\Omega / \theta \rightarrow \min$ . Таким образом, целевая функция задачи определения оптимального времени  $\Omega$  между мониторингами:  $E = t_{mon} / \Omega + \Omega / \theta \rightarrow \min$ .

Решив уравнение  $dE / d\Omega = 0$ , найдем значение  $\Omega$ , при котором величина  $E$  достигает минимума:

$$\Omega_{opt} = \sqrt{t_{mon} \cdot \theta} \quad (9)$$

Таким образом, с использованием метода фазового укрупнения сложных систем, по критерию минимизации задержки обработки деталей, вызванной мониторингом, по формуле (9) определяется оптимальный период времени между мониторингами работы станка.

## Выводы

Распространение на предприятиях современных высокопроизводительных станков с ЧПУ, остро ставит проблему их рационального использования. Увеличение скорости обработки партии деталей на станке с ЧПУ может быть достигнуто за счет выполнения программ в оптимальной последовательности. Поэтому на этапе эксплуатации станков с ЧПУ при механической обработке деталей возникает задача составления рационального расписания выполнения программ. В данной работе предлагаются две постановки задачи и методы их решения.

В первой постановке задача состоит в минимизации количества переналадок станков с целью ускорения обработки партии деталей. Исходными данными задачи являются сроки выполнения программ и директивное время обработки деталей. Функциональное назначение

программ предполагается заданным в соответствии с технологией обработки деталей. Задача минимизации количества переналадок станков сформулирована в виде комбинаторной задачи о покрытии. В статье предложен эффективный жадный метод ее решения. Он позволяет в большинстве случаев получать решения задачи близкие к оптимальным.

Сбои оборудования задерживают выполнение программ механической обработки деталей на ЧПУ. Ускорение выполнения программ может быть достигнуто за счет составления расписания программ с максимизацией вероятности их выполнения без сбоев оборудования. В работе предложены два метода составления такого расписания и определены их трудоемкости.

Предложенные в статье методы позволяют повысить производительность станков с ЧПУ за счет сокращения количества переналадок и повышения вероятности выполнения программ без сбоев оборудования. Эти методы необходимо использовать в системах автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки деталей. Это позволит повысить эффективность процессов обработки деталей на этапе эксплуатации станков.

В процессе длительной работы станка могут возникнуть неисправности, требующие устранения. Непрерывный автоматический мониторинг работы станка с целью обнаружения неисправности требует больших вычислительных и временных затрат. Мониторинг целесообразно проводить периодически. В статье предложена формула для вычисления оптимального периода времени

между мониторингами работы станка. Оптимальный период определяется с использованием метода фазового укрупнения сложных систем, по критерию минимизации задержки обработки деталей, вызванной мониторингом.

### Литература

1. Должиков В. П. Основы программирования и наладки станков с ЧПУ: учебное пособие - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 143 с.
2. Мычко В. С. Программирование технологических процессов на станках с программным управлением: учебное пособие - Минск: Выш.шк., 2010. – 287 с.
3. Фроликов Е. А., Андросова С. И. САПР ТП механической обработки деталей на станках с ЧПУ // Вісник східноукраїнського національного університету, 2002. - № 4. - С. 125-129.
4. Новиков Ф. А. Дискретная математика для программистов: учебник для вузов. – 3 - изд. - СПб.: Питер, 2009. - 384 с.
5. Лифшиц М. А. Случайные процессы от теории к практике: учебное пособие. - СПб.: Лань, 2016. - 320 с.
6. Зеленцов Б. П. Укрупнение состояний сложных систем, моделируемых марковскими процессами. // Вестник СибГУТИ, 2017. - № 3. - С. 43-56.
7. Булинский А. В., Ширяев А. Н. Теория случайных процессов. М.: Физматлит, 2005. – 408 с.

*Лазебная Л. А., Бельков Д. В. Задачи составления оптимального расписания программ обработки деталей для станков с ЧПУ и методы их решения. В статье сформулированы задачи минимизации переналадок станков с ЧПУ и максимизации вероятности работы без сбоев оборудования. Для решения задач предложены «жадные» методы, которые позволят повысить производительность работы станков с ЧПУ и могут быть использованы в САПР технологических процессов механической обработки деталей.*

**Ключевые слова:** станки с ЧПУ, методы решения, программы обработки деталей, производительность, задачи минимизации и максимизации.

*Lazebnaya L., Belkov D. The tasks of compiling the optimal schedule of part-processing programs for CNC machines and methods for solving them. The article formulates the tasks of minimizing changeovers of CNC machines and maximizing the likelihood of working without equipment failures. To solve the problems, “greedy” methods have been proposed that will improve the performance of CNC machines and can be used in CAD systems for machining parts.*

**Keywords:** CNC machines, solution methods, parts processing programs, productivity, minimization and maximization problems.

Статья поступила в редакцию 20.04.2019  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Метод измерения параметров электромагнитных элементов и быстродействующей защиты при коммутации обмотки

Т. Ю. Жораев, Г. В. Манилова

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва  
[consafe@yandex.ru](mailto:consafe@yandex.ru)

### Аннотация

Разработана методика аппроксимации переходного процесса с постоянной времени активно-индуктивной цепи, сопоставимой с периодом коммутации. Предложен метод измерения параметров обмотки реле в периодическом режиме работы с измерением средней составляющей, создана аналитическая модель. Предложена схема снабберной цепи, позволяющей ускорить переходный процесс спада тока с заданным ограничением по напряжению. В простейшей снабберной цепи ток спадает за время, определяемое относительно малым дифференциальным сопротивлением диода и обмотки; чтобы ускорить спадание тока, применяется эквивалентное увеличение сопротивления снабберной цепи со стабилизацией по напряжению специальной ограничительной цепью.

### Введение

В работе рассмотрена методика измерения параметров электромагнитных элементов на примере электромагнитного контактного реле. Реле это – автоматическое устройство, состояние которого изменяется скачком при достижении входным сигналом определённого порогового значения. Скачкообразное изменение электрофизического состояния выхода реле позволяет коммутировать (замыкать, размыкать, переключать) подключённые к выходу электрические цепи. Наиболее многочисленную по номенклатуре и исполнению группу малогабаритных реле, предназначенных для работы в устройствах связи, сигнализации, автоматики и телемеханики, радиоэлектронной аппаратуре составляют слаботочные электромагнитные реле. Разделение электромагнитных реле по величине коммутируемого сигнала носит условный характер: в электротехнике сильноточными реле или контакторами считают устройства, коммутирующие ток свыше 50-60 А, а высоковольтными – коммутирующие напряжение от 500 до 1200 В и более. Поэтому рассматриваемые в данной работе типы реле являются слаботочными в соответствии с требованиями ГОСТ 16121-86 «Реле слаботочные электромагнитные. ОТУ»: при коммутации электрических цепей при нагрузке на один контакт, не превышающей для постоянного тока 25 А, 300 В, 750 Вт [1].

Широкое применение таких реле в быту, народном хозяйстве, ракетно-космической отрасли, приборах и устройствах военного назначения предопределяет актуальность работ, связанных с исследованием параметров и разработкой защиты от перенапряжений при коммутации обмотки. Параметры реле

характеризуют их эксплуатационные возможности, область применения, и, в конечном итоге, влияют на надёжность, быстродействие и нормальную работоспособность реле.

В качестве основных параметров электромагнитных реле, характеризующих быстродействие реле, можно назвать время срабатывания  $t_{cp}$  и время отпускания  $t_{omn}$ . Эти параметры определяются при анализе переходных процессов, происходящих при включении и отключении реле. Эти процессы рассмотрены в нашей работе применительно к обмотке нейтрального реле постоянного тока. Основным фактором, влияющим на время срабатывания реле  $t_{cp}$ , является постоянная времени:

$$T = \frac{L}{R},$$

которая тоже изменяется в процессе движения якоря к сердечнику за счёт возрастания индуктивности. Способы ускорения и замедления срабатывания реле постоянного тока основаны именно на изменении длительности переходного процесса. В [2] предложены способы ускорения срабатывания путём включения последовательно с обмоткой реле добавочного активного сопротивления, рассчитанного так, чтобы установившееся значение тока осталось неизменным, а также подключения параллельно ему конденсатора. К схемным методам замедления времени срабатывания и отпускания относится метод шунтирования обмотки реле конденсатором или диодом. В работе Капырина [3] показано, что шунтирование индуктивности диодом приводит к исчезновению тлеющего разряда и значительному уменьшению времени горения

дуги. А в работе Карпова [4] доказывається, что применение диодов ухудшает динамическую характеристику размыкания контактов, замедляя процесс размыкания и время отпуская в 3-4 раза, увеличивая время горения дуги и снижая срок службы контактов. Поэтому вместо схемных способов изменения параметров быстрого действия и демпфирования перенапряжения при отключении индуктивности, Карпов предлагает [4] магнитное демпфирование, при котором электромагнит имеет две обмотки: рабочую и короткозамкнутую-демпфирующую.

Однако эффективность применения диодов при коммутации индуктивных нагрузок подтверждается многочисленными исследованиями, в том числе в [5, 6, 7].

Анализ осциллограмм реле позволяет не только оценить характеристики быстрого действия реле, но разработать принципы технической диагностики, что можно делать, например, методом совместного анализа двух осциллограмм – изменения тока в обмотке и напряжения на контактах при коммутации реле, как показано в [8]. В работе [9] рассматривается применение осциллографа в разработанном стенде диагностики механической части слаботочных электромагнитных реле по кинетике тока обмотки, сравнивается его значение для исследуемого и эталонного реле.

Математические методы описания работы релейных систем в автоколебательном режиме рассмотрены в [10].

### Цели и задачи исследования

- Целями данного исследования являются:
- разработка методики измерения параметров электромеханических устройств на примере реле со звонком;
  - проведение расчёта параметров сглаживающего R-C фильтра, предназначенного для сглаживания сигналов с датчиков тока и напряжения;
  - получение математической модели, позволяющей упростить методы измерения эффективной индуктивности обмотки в рабочем режиме на основе разработанной авторами методики аппроксимации переходного процесса с отношением  $L/R$ , сопоставимым с периодом коммутации;
  - предложить метод измерения параметров обмотки реле в автоколебательном режиме работы с измерением средней составляющей и периода;
  - предложить схему снабберной цепи, позволяющей ускорить переходный процесс спада тока с заданным ограничением по напряжению.

### Расчёт цепи для выделения постоянной составляющей сигнала

Расчёт и моделирование R-C цепи выполнены авторами в системе компьютерной алгебры для символьных расчётов «Mathima». Предполагая, что пульсации малы, напряжение на конденсаторе равно:

$$I = C \cdot \frac{dU_c}{dt}.$$

Этот ток создаётся резистором и источником входного напряжения  $V$ , при этом, пренебрегая пульсацией, можно принять допущение, что имеется источник тока, определяемый резистором и напряжением  $V$ . Напряжение делится пополам при меандре с длительностью импульса равному половине периода – что можно отразить в виде:

$$\frac{V}{2} = I \cdot R$$

Уравнение

$$\frac{V}{2} = \frac{C \cdot R \cdot dU_c}{dt}$$

имеет решение:

$$dU_c = \frac{V \cdot dt}{2 \cdot C \cdot R}.$$

Следует отметить, что максимальная относительная пульсация будет при глубине модуляции 0,5. Далее приведён пример работы для расчётных параметров  $C = 100$  мкФ,  $R = 20$  кОм, напряжение равно напряжению на обмотке звонка (определение напряжения), период повторения 50 мс (20 Гц), длительность импульса 25 мс. По графику (рис. 1) пульсация равна  $2,527 - 2,492 = 35$  мВ (примерно) при напряжении источника 5 В.

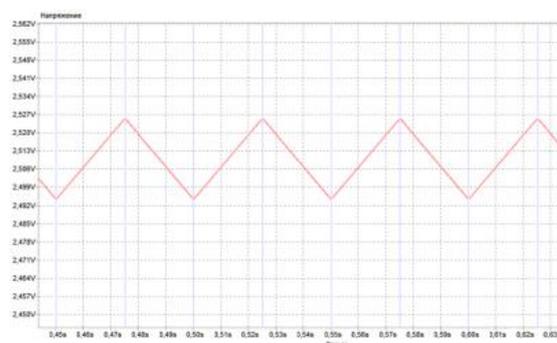


Рисунок 1 – Переходной процесс в схеме с RC-цепью

Вычислим расчётное значение пульсации с учётом формулы пульсации. Если период равен 50 мс, то изменение учитывается на половине периода равным 25 мс, тогда

$$dU_c = (5 \cdot 25 \text{ мс}) / (2 \cdot 100 \text{ мкФ} \cdot 20 \text{ кОм}) = 31,25 \text{ мВ},$$

что близко к полученному ранее экспериментальному значению.

Такие же результаты получаются и для измерения тока на шунте (240 мВ). Линейный характер нарастания и спадания тока при заданном периоде продемонстрирован на рис. 2.

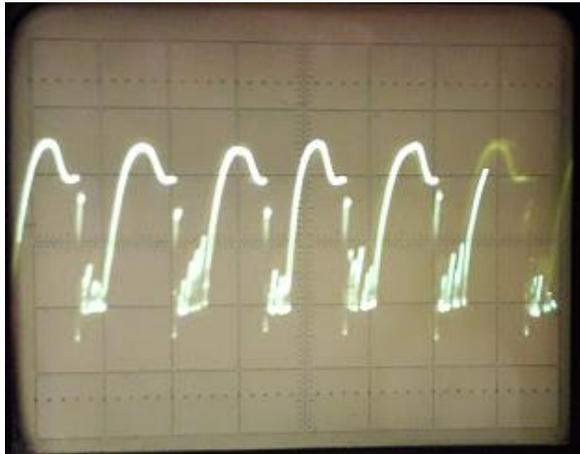


Рисунок 2 – Пример сигнала с датчика тока обмотки реле

Выброс тока определяется перерегулированием, создаваемым источником питания при подключении обмотки реле, и не используется в модели. Осциллограмма работы реле в автоколебательном режиме показывает характерный «дребезг» контактов внешнего коммутатора. Данная методика предполагает также контроль состояния контактов благодаря усреднению общей кривой. Отклонение от номинального значения может интерпретироваться как необходимость проведения более детального анализа заданного образца реле уточнёнными методами.

### Моделирование R-L цепи

Известно, что ток в R-L-цепи определяется как:

$$I(t) = \frac{V}{R} - \frac{V \cdot e^{-\frac{R \cdot t}{L}}}{R}. \quad (1)$$

Данное выражение позволяет определить значение тока в момент времени  $t$ .

Однако, данное выражение не позволяет найти время  $t$ , соответствующее заданной площади под кривой, так как является

трансцендентным. В этом случае можно использовать разложение данной функции в ряд Тейлора в окрестности точки  $t = 0$ :

$$I(t) = \frac{V \cdot t}{L}.$$

Однако это выражение не вполне отражает необходимое приближение (прямая 1).

Необходимую зависимость можно найти, сделав предположение, что площадь, образованная графиком на рис. 3, по формуле (1) равна площади, образованной треугольником с прямой 2 над этой прямой. График приведён для значений  $R = 5 \text{ Ом}$ ,  $L = 5 \text{ мГн}$ , напряжение  $V = 5 \text{ В}$ .

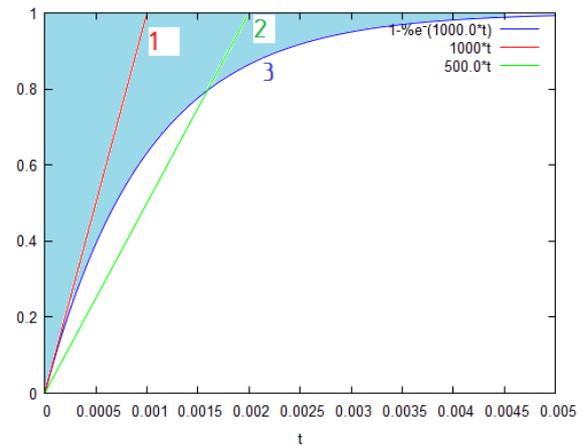


Рисунок 3 – Аппроксимация переходного процесса с активно-индуктивной цепью

Площадь кривой 3 на рис. 3 равна:

$$\int_0^{\infty} \frac{V \cdot e^{-\frac{R \cdot t}{L}}}{R} dt = \frac{L \cdot V}{R^2}. \quad (2)$$

Эту же кривую должен иметь треугольник, образованный некоторой функцией

$$f(t) = k \cdot t.$$

В момент времени  $t = t_4$  график достигает значения

$$\frac{V}{R},$$

при этом

$$k \cdot t_4 = \frac{V}{R},$$

откуда

$$t_4 = \frac{V}{R \cdot k}.$$

Равенство площадей определяется уравнением:

$$\frac{V^2}{2 \cdot R^2 \cdot k} = \frac{L \cdot V}{R^2}.$$

Решая это уравнение, можно получить:

$$k = \frac{V}{2 \cdot L}.$$

Уравнение прямой:

$$f(t) = \frac{V \cdot t}{2 \cdot L}.$$

Полученное значение в 2 раза меньше, чем оценка по разложению функции в ряд Тейлора.

### Метод нахождения индуктивности

Рассмотрим модель переходных процессов в активно-индуктивной цепи при периодической коммутации, представленную на рис. 4.

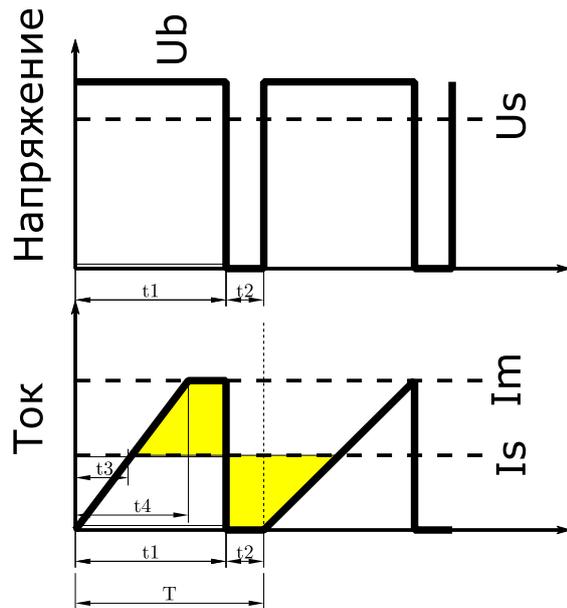


Рисунок 4 – Модель переходных процессов в активно-индуктивной цепи при периодической коммутации

На рис. 4 площади прямоугольников по напряжению одинаковы над  $U_s$  и под  $U_s$ , сумма интервалов времени равна периоду:

$$(U_b - U_s) \cdot t_1 = U_s \cdot t_2; \quad (3)$$

площадь трапеции над током равна площади трапеции под током  $I_s$ , площади трапеций в свою очередь равны площади прямоугольника и треугольника, её образующей:

$$\begin{aligned} \frac{(I_m - I_s) \cdot (t_4 - t_3)}{2} + (I_m - I_s) \cdot (t_1 - t_4) &= \\ &= \frac{I_s \cdot t_3}{2} + I_s \cdot t_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение для прямой тока, пересекающей средний ток:

$$\frac{U_b \cdot t_3}{2 \cdot L} = I_s \quad (5)$$

$$\frac{U_b \cdot t_4}{2 \cdot L} = I_m \quad (6)$$

Общая система уравнений составляется с учётом того, что сумма интервалов  $t_1$  и  $t_2$  равна периоду путём дополнения уравнений (3), (4), (5), (6) уравнением связи  $t_1 + t_2 = T$ :

$$\begin{cases} (U_b - U_s) \cdot t_1 = U_s \cdot t_2, \\ \frac{(I_m - I_s) \cdot (t_4 - t_3)}{2} + (I_m - I_s) \cdot (t_1 - t_4) = \\ = \frac{I_s \cdot t_3}{2} + I_s \cdot t_2, \\ \frac{U_b \cdot t_3}{2 \cdot L} = I_s, \\ \frac{U_b \cdot t_4}{2 \cdot L} = I_m, \\ t_2 + t_1 = T. \end{cases} \quad (7)$$

В (7) имеется 4 уравнения и 4 выбранных неизвестных; откуда можно найти решение относительно переменных состояния  $t_1, t_2, t_3, t_4, L$ :

$$\begin{cases} t_1 = \frac{T \cdot U_s}{U_b}, \\ t_2 = -\frac{T \cdot U_s - T \cdot U_b}{U_b}, \\ t_3 = \frac{2 \cdot I_m \cdot I_s \cdot T \cdot U_s - 2 \cdot I_s^2 \cdot T \cdot U_b}{I_m^2 \cdot U_b}, \\ t_4 = \frac{2 \cdot I_m \cdot T \cdot U_s - 2 \cdot I_s \cdot T \cdot U_b}{I_m \cdot U_b}, \\ L = \frac{I_m \cdot T \cdot U_s - I_s \cdot T \cdot U_b}{I_m^2}. \end{cases} \quad (8)$$

Выбранное из полученного решения системы уравнений (8) значение индуктивности катушки представлено выражением:

$$L = \frac{I_m \cdot T \cdot U_s - I_s \cdot T \cdot U_b}{I_m^2}. \quad (9)$$

Максимальный ток при этом определяется как отношение напряжения батареи к сопротивлению обмотки:

$$I_m = \frac{U_b}{R},$$

которое можно измерить омметром. В другом методе время  $t_4$  равно  $t_1$ , когда ток обмотки не успевает преодолеть максимальное значение. В этом случае площади прямоугольников по напряжению одинаковы над  $U_s$  и под  $U_s$ , сумма интервалов времени равна периоду:

$$(U_b - U_s) \cdot t_1 = U_s \cdot t_2; \quad (10)$$

площадь треугольника над током равна площади трапеции под током  $I_s$ , площадь трапеции в свою очередь равна площади прямоугольника и треугольника:

$$\frac{(I_m - I_s) \cdot (t_1 - t_3)}{2} = \frac{I_s \cdot t_3}{2} + I_s \cdot t_2. \quad (11)$$

Время  $t_3$  легко определяется из уравнения прямой, проходящей через ноль:

$$\frac{I_m \cdot t_3}{t_1} = I_s \quad (12)$$

Составляется система уравнений из выражений (10), (11), (12) и равенства  $t_1 + t_2 = T$ :

$$\begin{cases} (U_b - U_s) \cdot t_1 = U_s \cdot t_2, \\ \frac{(I_m - I_s) \cdot (t_1 - t_3)}{2} = \frac{I_s \cdot t_3}{2} + I_s \cdot t_2, \\ \frac{I_m \cdot t_3}{t_1} = I_s, \\ t_2 + t_1 = T. \end{cases} \quad (13)$$

Имеется 4 уравнения и 4 выбранных неизвестных откуда можно найти решение (13) относительно  $t_1, t_2, t_3, I_m$ , в итоге получается:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{T \cdot U_s}{U_b}, \\ t_2 = -\frac{T \cdot U_s - T \cdot U_b}{U_b}, \\ t_3 = \frac{T \cdot U_s^2}{2 \cdot U_b^2}, \\ I_m = \frac{2 \cdot I_s \cdot U_b}{U_s}. \end{cases} \quad (14)$$

Соотношение

$$I_m = \frac{2 \cdot I_s \cdot U_b}{U_s}$$

позволяет определить максимальный ток лишь используя измерение средних значений. Таким образом, полученная математическая модель позволяет упростить методы измерения эффективной индуктивности обмотки в рабочем режиме и определение тока срабатывания с использованием автоколебательного режима.

### Схема снабберной цепи

Предложена схема снабберной цепи, позволяющей ускорить переходной процесс спада тока с заданным ограничением по напряжению. С простейшей снабберной цепью ток спадает за время, определяемое дифференциальным сопротивлением диода и его напряжением «ступеньки», внутренним сопротивлением обмотки. Характер электромагнитных процессов представлен на рис. 5. Моделирование производится в САПР электронных схем KiCAD с использованием SPICE-моделей полупроводниковых приборов.

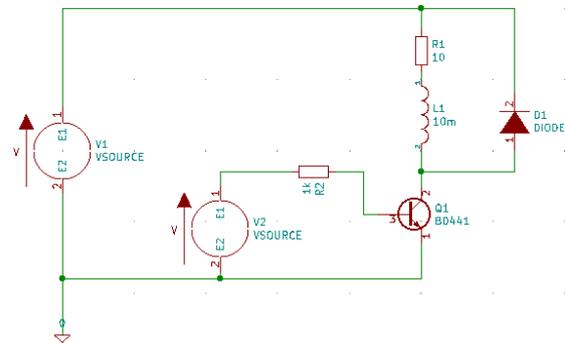


Рисунок 5 – Схема широко используемой снабберной цепи

На рис. 6 представлен переходной процесс: 1 – напряжение на коллекторе транзистора Q1, 2 – ток коллектора транзистора, 3 – ток диода, 4 – управляющее напряжение на базе транзистора.

Чтобы ускорить спадание тока, необходимо применять увеличенное внутреннее сопротивление снабберной цепи, однако, при этом может быть довольно большой выброс по напряжению. Чтобы ограничить напряжение выброса, можно использовать режим источника напряжения, реализуемого с использованием стабилитрона и транзистора, как показано на схеме на рис. 7.

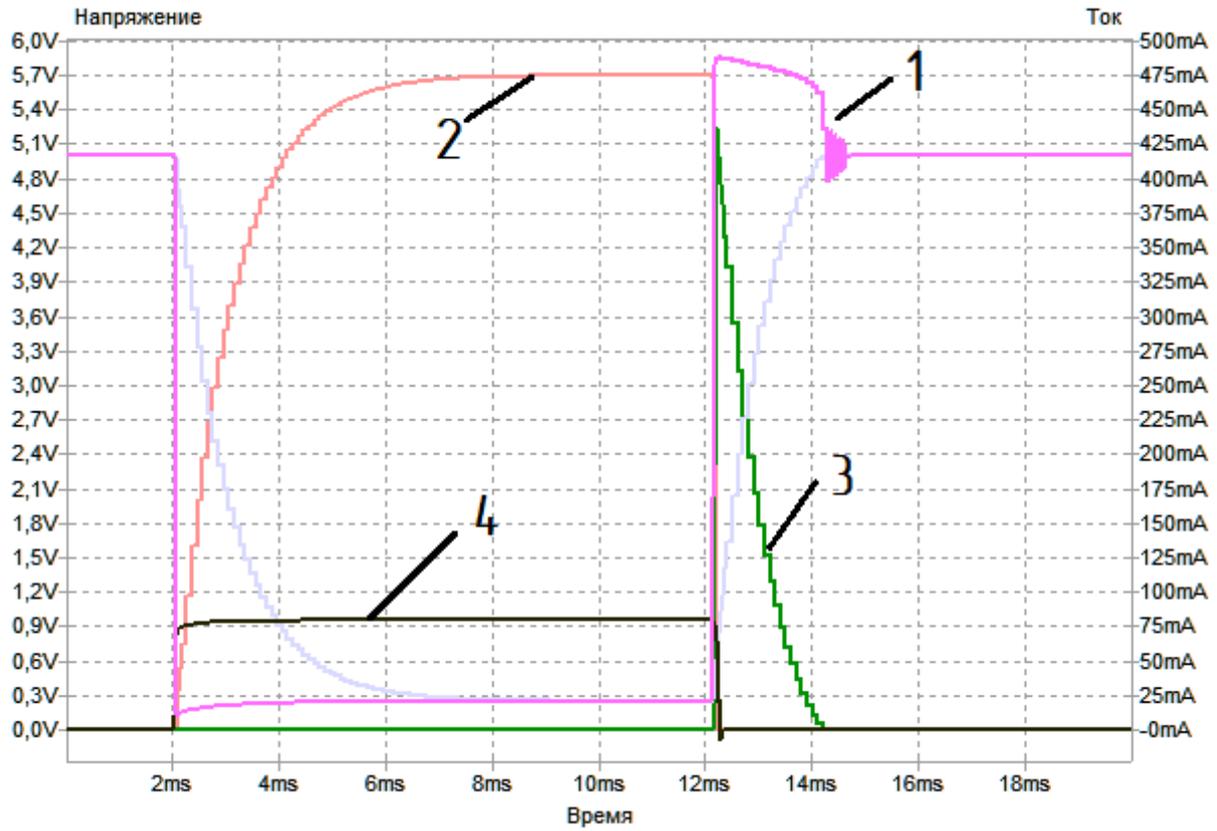


Рисунок 6 – Переходные процессы (протекающие в схеме на рис. 5).

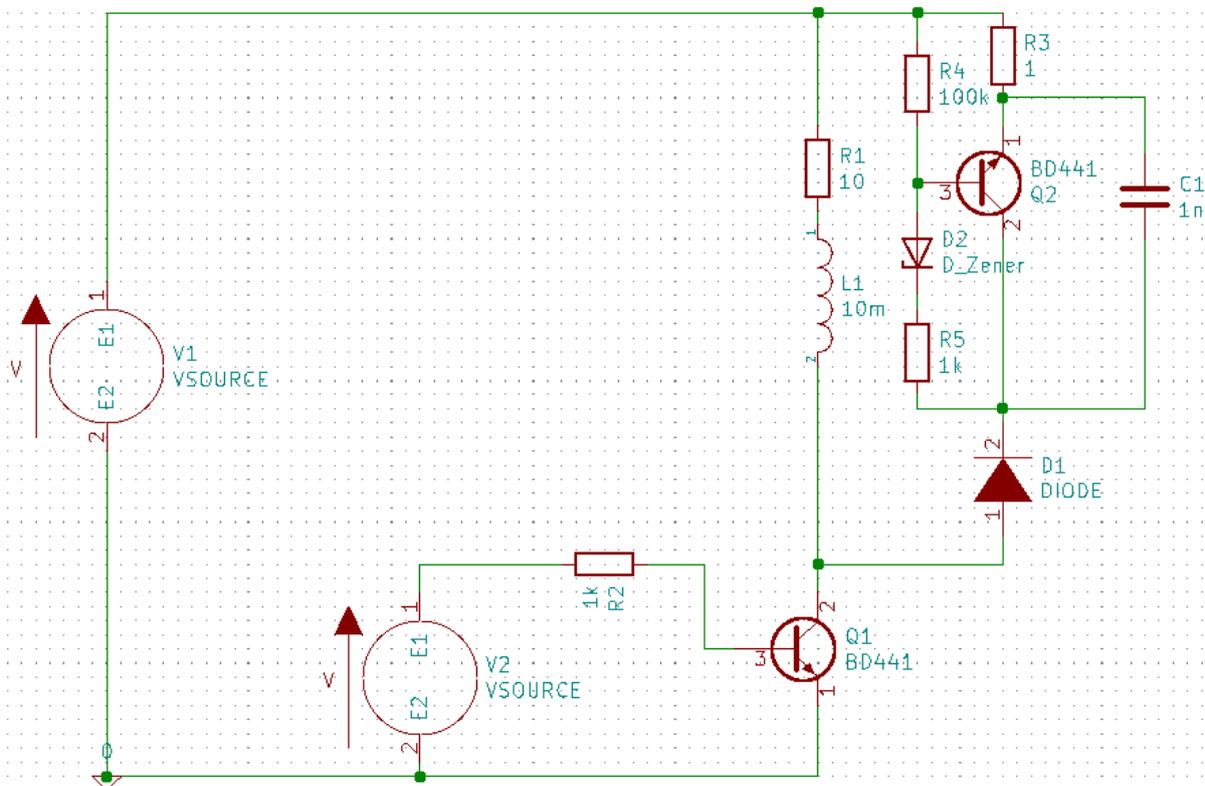


Рисунок 7 – Схема снабберной цепи с повышенной скоростью спада тока и ограничением по напряжению

При коммутации открывается диод D1, ток начинает изначально протекать через конденсатор C1 и резистор R3, чтобы избежать существенного первоначального выброса; затем, по мере зарядки C1 начинает открываться транзистор Q2, ведомый током, создаваемым стабилитроном D2. При этом отпирание D2 производится тогда, когда напряжение коллектор-эмиттер транзистора будет больше, чем напряжение диода плюс

напряжение отпирания база-эмиттер. Фактически, общее напряжение стабилизации составляет на 3-4 В больше, чем напряжение на стабилитроне, и определяется падением напряжения как на диоде D1, так и напряжением отпирания Q2, напряжением насыщения и напряжением обратной связи на токоограничивающем резисторе R3. На рис. 8 видно, что данная цепь позволяет достичь током нулевого значения в 3-4 раза быстрее.

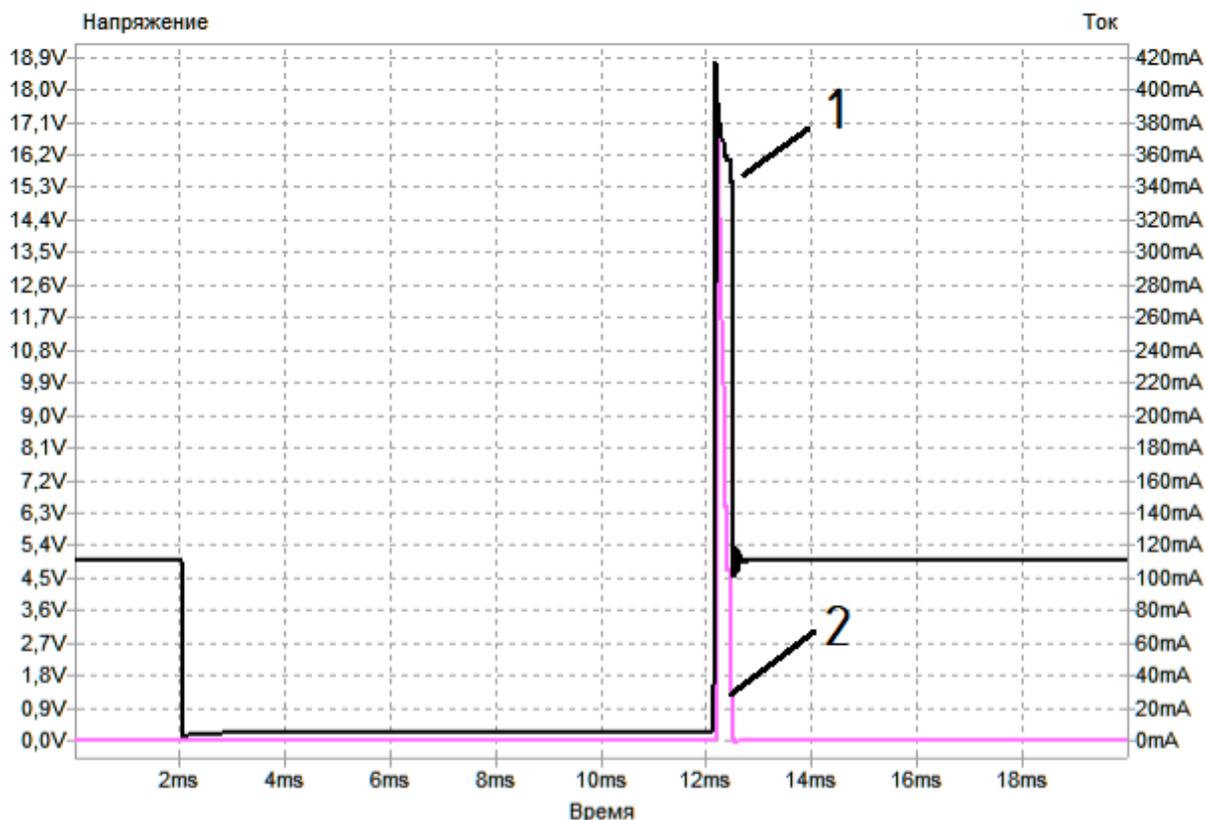


Рисунок 8 – Переходные процессы (протекающие в схеме на рис. 7).

Ток, спадающий в обмотке быстродействующего реле, препятствует отпусанию якоря за малое время. Выброс же напряжения в данном случае будет превышать номинальное напряжение питания в заданное количество раз, но не более допустимого значения напряжения коллектор-эмиттер Q1 с заданным запасом.

### Выводы

В работе создана методика аппроксимации переходного процесса с отношением  $L/R$ , сопоставимым с периодом коммутации; разработана методика расчёта, исходя из параметров средних значений и периода, позволяющая определять параметры реле расчётным методом по средним составляющим, что применимо к простым системам контроля и тестирования, например, для массового

производства с применением недорогих микроконтроллеров обработки сигналов с датчиков тока и напряжения, избегая анализа сигналов сложной формы. Это позволяет производить комплексный контроль реле, в том числе состояния контактов и зазора ярма при быстродействующей коммутации. Предложенная в работе снабберная цепь позволяет достичь более высокой скорости спадания тока и отпусания ярма для реле высокого быстродействия.

### Литература

1. Малашенко А. А. Электромагнитные реле // Электронные компоненты, 2003, № 7
2. Быстродействие электромагнитных реле // лекции по предмету «Технические средства автоматизации», Нижнекамский химико-технологический институт (филиал)

«Казанского национального исследовательского технологического университета» [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/2610428/page:63/>

3. Капырин В. А. Схемные методы сокращения времени горения дуги при коммутации слаботочными контактами индуктивных нагрузок // Техника средств связи, серия ТПС, 1976, вып. 5.

4. Карпов О. Г. О перенапряжениях в электромагнитных реле и некоторых способах их уменьшения // Техника средств связи, серия ТПС, 1986, вып. 6, с. 51-58

5. Мицун В. В., Ленская Л. Н., Голуб В. И. Эффективность применения диодов для защиты контактов, коммутирующих индуктивные нагрузки // Вопросы радиоэлектроники, серия ТПС, 1973, вып. 4.

6. Электрические и электронные аппараты: учебник для вузов / под ред. Ю. К. Розанова - М.: Информэлектро, 2001, - 417 с.

7. Родштейн Л. А. Электрические аппараты - Л.: Энергоатомиздат, 1989, - 304 с.

8. Корсунский Г. М., Мироненко А. Ф., Федорец П. С. Применение метода осциллографического анализа динамических характеристик электромагнитных реле для его технической диагностики // Техника средств связи, серия ТПС, 1979, вып. 5, с. 38

9. Парфеленко А. А., Сукиязов А. Г. Стенд диагностики механической части слаботочных электромагнитных реле: Сборник трудов конференции: «Фундаментальные основы, теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: Материалы 19-ой Международной молодежной научно-практической конференции». Издательство: ООО «Лик» (Новочеркасск), 2018, с. 228-231

10. Красовский А. А. Основы автоматики и технической кибернетики. - М.-Л., Госэнергоиздат, 1962, - 600 с. (с. 414). Режим доступа: [http://info.alnam.ru/book\\_a\\_kiber.php?id=200](http://info.alnam.ru/book_a_kiber.php?id=200)

**Жораев Т. Ю., Манилова Г. В. Метод измерения параметров электромагнитных элементов и быстродействующей защиты при коммутации обмотки.** Разработана методика аппроксимации переходного процесса с постоянной времени активно-индуктивной цепи, сопоставимой с периодом коммутации. Предложен метод измерения параметров обмотки реле в периодическом режиме работы с измерением средней составляющей, создана аналитическая модель. Предложена схема снабберной цепи, позволяющей ускорить переходный процесс спада тока с заданным ограничением по напряжению. В простейшей снабберной цепи ток спадает за время, определяемое относительно малым дифференциальным сопротивлением диода и обмотки; чтобы ускорить спадание тока, применяется эквивалентное увеличение сопротивления снабберной цепи со стабилизацией по напряжению специальной ограничительной цепью.

**Ключевые слова:** электромагнитное реле, переходные процессы, методика измерения параметров, снабберные цепи.

**Zhorayev T., Manilova G. Method of measurement of electromagnetic elements' and fast-acting damper's parameters when commutating the coiling.** The methodology of approximation of transitional process with transient time comparable to the period of commutation is developed. Method of measuring of relay coiling's parameters in periodical mode with varying of average component is suggested; analytical model is created. Scheme of snubber network that allows to quicken the transitional process of current dropping with specified voltage limit is suggested. In simplest snubber network the current drops during time that is determined by relatively small differential resistance of diode and coiling; to quicken the current drop equivalent increase of resistance of snubber network with voltage stabilization using special limiting chain is used.

**Keywords:** electromagnetic relay, transitional processes, methodic of measuring the parameters, snubber networks.

Статья поступила в редакцию 24.04.2019  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Построение регрессионных моделей режимов работы водораспределительных сетей с помощью методов регуляризации и анализа главных компонент

С. В. Беспалова, С. М. Романчук, Т. В. Ермоленко, В. И. Бондаренко  
Донецкий национальный университет, г. Донецк  
[rector@donnu.ru](mailto:rector@donnu.ru), [s.romanchuk@donnu.ru](mailto:s.romanchuk@donnu.ru)

### Аннотация

*Задачи поддержания эффективных и оптимальных режимов работы объектов водораспределительной сети, позволяющих обеспечить экономию электроэнергии и воды, а также задачи распознавания внештатных режимов и аварийных ситуаций являются наиболее важными для предприятий водоснабжения. В этой статье исследуется эффективность методов регрессионного анализа для прогнозирования поведения водопроводной сети с использованием онлайн-данных автоматизированной системы сбора и передачи информации. Исходные данные представлены временными рядами значений давления воды в контрольных точках водопроводной сети. Проведен разведочный анализ, построены предсказательные модели для показаний датчиков давления воды в неактивных точках водораспределительной сети на основе моделей гребневой и лассо-регрессии, и регрессии на главные компоненты. Произведена оценка статистической значимости трех моделей и произведено сравнение эффективности построенных моделей при прогнозировании. Разработанные модели позволяют прогнозировать процессы, происходящие в водопроводных сетях. Показано, что для двух переменных выбраны оптимальные модели для прогноза. В то время как для третьей переменной ни одна из моделей не позволяет использовать их для предсказания. Для данного случая предполагается использование нелинейных регрессионных моделей.*

### Введение

Развитие современных средств измерительной техники и систем сбора и передачи информации позволяет создавать пространственно-распределенные системы мониторинга технологических параметров работы водопроводных сетей [1-3]. Результатом эксплуатации таких систем мониторинга является накопление предприятиями водоснабжения и водоотведения больших объемов технологической информации и необходимость при ее использовании применения методов интеллектуального анализа данных [4, 5].

Так для решения задач оперативного управления подсистемами водоснабжения по факту поддержания эффективных режимов, а также задач распознавания внештатных режимов и аварийных ситуаций, необходимо иметь формализованное представление объектов автоматизации в виде гидравлических моделей или в виде статистических моделей. Разработка гидравлических моделей требует большого количества исходных данных, получение которых связано с большими затратами и организационными трудностями, и как следствие, имеющих достаточно высокую погрешность.

Более перспективным представляется применение методов прогнозирования

временных рядов, регрессионных деревьев, эволюционного программирования, алгоритмов ограниченного перебора, многомерной визуализации и т. д.

Развитие этих методов является актуальной задачей в области совершенствования АСУ ТП, т. к. установление закономерностей в базах данных, содержащих информацию о режимах работы оборудования и водопроводных сетей, позволит разработать эффективные алгоритмы управления технологическими процессами [6].

Таким образом, объединение средств мониторинга с большими базами статистических данных и инструментами Data mining является перспективным путем развития информационно-аналитических и экспертных систем, обеспечивающих поддержку принятия решений на предприятиях водоснабжения и водоотведения.

### Постановка задачи

Источником информации являются датчики давления, расположенные на насосных станциях, а также автономные системы измерения давления, расположенные в контрольных точках на водоводах сети. В рамках данной работы через  $x_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) обозначены показатели давления воды на насосных станциях, через  $y_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) – на сетях.

Замеры производились автоматически каждые 30 мин с передачей на сервер центральной диспетчерской по GPRS-каналу.

Временное окно полученных данных: с 14.02.2012 по 30.07.2012.

Необходимо построить предсказательную модель значений давления воды в контрольных точках на сети.

Для построения регрессионной модели по имеющимся наблюдениям переменной-отклика  $z = \{y_i\}_{i=1}^n$  подается матрица наблюдений (значений предикторов)  $W$  размерностью  $n \times m$ :

$$W = \{w^i\}_{i=1}^n,$$

где  $w^i = (w_1^i, \dots, w_m^i)$  – значения предикторов  $i$ -го объекта обучающей выборки;  
 $n$  – количество наблюдений;  
 $m$  – количество предикторов.

Необходимо найти аппроксимирующую функцию  $f(W, \beta)$  с постоянными параметрами  $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m)$ , которая с ошибкой  $\varepsilon$  восстанавливает среднюю величину реализаций  $y$  переменной-отклика для произвольных значений  $x_{ij}$  предикторов:

$$z = f(W, \beta) + \varepsilon.$$

В рамках данной работы в качестве переменной-отклика  $z$  рассматривается поочередно значения давления воды в неактивной точке  $y_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ), в качестве предикторов  $w_i$  – значения давления, снятые с датчиков в активных точках  $x_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) и в неактивных  $y_k$  ( $k \neq j$ ).

Первым естественным приближением функции регрессии отклика  $z$  на предикторы  $w_1, w_2, \dots, w_m$  ( $m = 1, 2, \dots, 7$ ) в работе является модель простой линейной регрессии

$$z = \beta_0 + \beta_1 w_1 + \beta_2 w_2 + \dots + \beta_m w_m + \varepsilon \quad (1)$$

**Цель работы** – построить регрессионные модели давления воды с использованием методов регуляризации и анализа главных компонент, провести анализ эффективности их работы на реальных данных.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– провести разведочный анализ данных для выявления выбросов и пропущенных значений, а также наличия связи между переменными;

– используя методы регуляризации для обеспечения надежности и эффективности оценок параметров регрессии в условиях мультиколлинеарности, построить модели множественной регрессии: гребневую и лассо-регрессию;

– построить модель регрессии на главные компоненты для отбора информативных факторов и комбинаций предикторов, позволяющую сократить количество предикторов и устранить их мультиколлинеарность;

– оценить статистическую значимость моделей, используя критерии качества полученных моделей такие как среднеквадратичная ошибка регрессии, коэффициент детерминации и дисперсионное отношение Фишера;

– сравнить эффективность построенных моделей при прогнозировании, оценивая средний квадрат ошибки прогноза на данных из тестовой выборки.

**Объектом исследования** являются регрессионные модели и методы их применения для реализации практических задач анализа работы водораспределительных сетей.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы регрессионного анализа в задачах моделирования процессов в водораспределительных сетях.

**Методы исследования** – методы интеллектуального анализа данных, методы машинного обучения, методы математической статистики.

### **Показатели, используемые для оценки качества регрессионных моделей**

Рассмотрим количественные показатели, отражающие разные аспекты качества регрессионных моделей, которые будем использовать в данной работе. Введем следующие обозначения:  $\hat{\varepsilon}_i$  – отклонения выборочных величин  $z_i$  переменной-отклика от значений  $\hat{z}_i$ , получаемых по уравнению регрессии,  $\bar{z}$  – среднее значение переменной-отклика  $z$ ,  $n$  – объем выборки,  $k$  – количество параметров модели.

Общая сумма квадратов,  $TSS$ , отражает общий разброс значений зависимой переменной без учета регрессионной модели:

$$TSS = \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2.$$

Сумма квадратов остатков,  $RSS$ , является оценкой остаточной дисперсии значений переменной-отклика, которую не удалось объяснить при помощи построенной модели:

$$RSS = \sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2.$$

$RSE$  – стандартное отклонение остатков модели, является оценкой разброса наблюдаемых значений зависимой переменной относительно истинной линии регрессии.  $RSE$  в общем виде

рассчитывается как:

$$RSE = \sqrt{RSS/(n-k-1)}.$$

Коэффициент детерминации  $R^2$  измеряет долю общей дисперсии зависимой переменной, объясненную моделью, и изменяется от 0 до 1. Чем ближе значение  $R^2$  к 1, тем точнее модель описывает данные:

$$R^2 = 1 - RSS / TSS \quad (2)$$

Дисперсионное отношение Фишера ( $F$ -статистика) представляет собой отношение дисперсий и используется для проверки нулевой гипотезы о статистической незначимости уравнения регрессии в целом:

$$F = \frac{(TSS - RSS)/k}{RSS/(n - k - 1)}.$$

Современные подходы к выбору хорошо интерпретируемых моделей оптимальной сложности ориентируются на применение информационных критериев, основанных на функции максимального правдоподобия и более чувствительных к увеличению числа параметров модели. В данной работе для сравнения моделей с разным числом параметров использовался информационный критерий Акаике:

$$AIC = n \cdot \ln\left(\sum \hat{\varepsilon}_i^2 / n\right) + 2k.$$

В нашем случае сравнения моделей на выборках одинаковой длины выражение можно упростить, выкидывая члены, зависящие только от  $n$ :

$$AIC = n \cdot \ln(RSS) + 2k.$$

Этот критерий не только вознаграждает за качество приближения, но и штрафует за использование излишнего количества параметров модели. Считается, что наилучшей будет модель с наименьшим значением критерия  $AIC$ .

### Разведочный анализ данных

Предварительный анализ данных проводится с целью выявления наиболее общих закономерностей и тенденций, характера и свойств анализируемых данных, законов распределения анализируемых величин и подготовки данных для дальнейшего изучения. На этапе разведочного анализа проводится выявление аномалий (точек-выбросов), заполнение пропущенных значений, проводится процедура анализа распределений переменных,

просмотр корреляционных матриц с целью поиска коэффициентов, превосходящих по величине определенные пороговые значения, факторный и дискриминантный анализ, многомерное шкалирование, визуальный анализ гистограмм и т. п. [7].

При анализе нескольких количественных переменных очень удобным инструментом выявления характера связи между переменными являются матричные диаграммы рассеяния. На рис. 1 изображен матричный график для переменных  $x_i$ ,  $y_j$  и  $dt$  (дата и время). На рисунке диаграммы рассеяния организованы в форме матрицы (значения переменной по столбцу используются в качестве координат  $X$ , а значения переменной по строке – в качестве координат  $Y$ ).

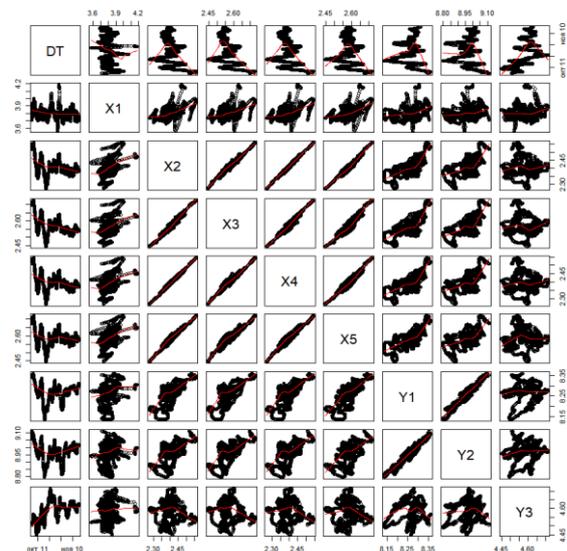


Рисунок 1 – Матричные диаграммы рассеяния, полученные для данных датчиков давления воды с активных ( $X$ ) и неактивных ( $Y$ ) точек

Визуальный анализ выявил мультиколлинеарность переменных. Традиционным способом оценки мультиколлинеарности является анализ корреляционной матрицы – набора значений коэффициента корреляции между переменными, представленного в виде матрицы. Этот способ основан на предположении о линейной связи между переменными и их нормальном распределении, которое далеко не всегда верно. Другим способом оценить степень мультиколлинеарности  $m$ -мерного комплекса переменных является вычисление фактора инфляции дисперсии. В присутствии мультиколлинеарности дисперсия оценок параметров модели возрастает пропорционально величине [8]:

$$VIF_j^o = 1/(1 - R_j^2).$$

$VIF_j$  (variance inflation factor) – фактор инфляции дисперсии, чем он выше для  $j$ -го предиктора, тем сильнее линейная связь между этим и остальными предикторами. В приведенной выше формуле  $R_j^2$  – коэффициент детерминации (2)  $j$ -го предиктора относительно остальных.

Показатель  $VIF$  часто используется в регрессионном анализе для выявления мультиколлинеарности и последующего исключения из модели тех предикторов, у которых  $VIF$  оказывается слишком высоким. Существуют разные мнения по поводу того, какое значение  $VIF$  считать пороговым. Обычно критическим считают значение  $VIF = 5$ , в исследованиях, где наблюдаемые сигналы слабы, имеет смысл применять в качестве порогового значения  $VIF = 2$ .

Наличие мультиколлинеарности приводит к неустойчивости оценок параметров статистической модели, что выражается, в частности, в повышенной дисперсии этих оценок.

Для выявления мультиколлинеарности по матрице наблюдений  $W$  и значениям переменной-отклика были построены  $m$  регрессионных моделей типа (1), из которых исключалось по одному предиктору, после чего для каждого  $j$ -го предиктора были вычислены коэффициенты детерминации (2) и рассчитаны факторы инфляции дисперсии  $VIF_j$ , которые, в свою очередь сравнивались с порогом, равным 2. Полученные показатели сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения  $VIF$  для модели линейной регрессии для переменной-отклика  $Y1$

X1	X2	X3	X4
1.730062	326.2375	39.3474	135.7604
X5	Y2	Y3	
34.740705	1.789938	1.262520	

В результате расчетов выяснилась, что у предикторов X2-X5 показатель  $VIF$  выше порога, а, следовательно, присутствует мультиколлинеарность, которую необходимо учитывать при выборе структуры регрессионной модели.

Таблица 5 – Значения  $VIF$  для моделей линейной регрессии для переменной-отклика  $Y2$

X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y3
1.712758	337.235056	39.315573	140.717604	37.661498	2.421308	1.247474
<b>Исключаем X2</b>						
1.368758	–	25.165536	41.083279	14.093022	2.142676	1.203471
<b>Исключаем X4</b>						
1.374102	–	8.109117	–	7.940405	2.061502	1.158141
<b>Исключаем X3</b>						
1.342365	–	–	–	2.432141	1.990933	1.085703

Максимальный показатель  $VIF$  имеет предиктор X2. После его исключения из модели были получены следующие показатели  $VIF$  (см. табл. 2).

Таблица 2 – Значения  $VIF$  для модели линейной регрессии с исключённым предиктором X2 для переменной-отклика  $Y1$

X1	X3	X4
1.394129	25.220946	40.413645
X5	Y2	Y3
13.340509	1.631141	1.215943

Теперь максимальный показатель  $VIF$  имеет предиктор X4. После его исключения из модели имеем следующие показатели  $VIF$  (см. табл. 3)

Таблица 3 – Значения  $VIF$  для модели линейной регрессии с исключёнными предикторами X2 и X4 для переменной-отклика  $Y1$

X1	X3	X5	Y2	Y3
1.387783	8.474067	7.687832	1.600710	1.172038

Как видно из таблиц при последовательном исключении предикторов показатели  $VIF$  значительно уменьшаются. Тем не менее для предикторов X3 и X5 они выше допустимого порога. Исключая X3, получаем следующие значения  $VIF$  (см. табл. 4).

Таблица 4 – Значения  $VIF$  для модели линейной регрессии с исключёнными предикторами X2, X4 и X3 для переменной-отклика  $Y1$ .

X1	X5	Y2	Y3
1.357981	1.893205	1.480917	1.074341

Для оставшихся предикторов  $VIF$  не превышает порога, именно на них будем строить линейную регрессию для переменной-отклика  $Y1$ .

Аналогичные действия по исключению предикторов из моделей были проведены для переменной-отклика  $Y2$  (см. табл. 5) и  $Y3$  (см. табл. 6).

Таблица 6 – Значения  $VIF$  для моделей линейной регрессии для переменной-отклика  $Y_3$

X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2
1.65342	325.43838	38.72584	131.80648	41.11208	24.29518	18.37282
<b>Исключаем X2</b>						
1.364954	–	22.921622	40.572688	17.519282	23.841528	18.367246
<b>Исключаем X4</b>						
1.337824	–	8.169587	–	10.035198	22.953273	17.884261
<b>Исключаем Y1</b>						
1.312449	–	7.575422	–	7.802637	–	1.522853
<b>Исключаем X5</b>						
1.283727	–	1.860086	–	–	–	1.516931

Модели имеют вид, описываемый формулами:

$$Y_1 = 0.012192 X_1 + 0.208780 X_5 + 0.592178 Y_2 + 0.002460 Y_3 + 2.358158 \quad (3)$$

$$Y_2 = -0.03225144 X_1 - 0.24365432 X_5 + 1.54056018 Y_1 + 0.01344844 Y_3 - 3.07554400 \quad (4)$$

$$Y_3 = 0.1631115 X_1 - 0.4601894 X_3 + 0.2655687 Y_2 - 2.7673262 \quad (5)$$

На рис. 2 выведены временные ряды значений переменных-откликов, полученных по моделям (3)-(5), а также реальных, взятых из тестовой выборки.

Из визуального анализа графиков можно сделать вывод о непригодности модели линейной регрессии (5) для  $Y_3$ , а также об эффективности моделей (3) и (4).

Для предсказания  $Y_3$  необходимы другие методы. Методы регуляризации применяют для борьбы с переизбыточностью данных, когда предикторы коррелируют друг с другом. В условиях высокой коррелированности входных переменных оценки коэффициентов регрессии, полученные методом наименьших квадратов (МНК), проявляют неустойчивость. Следствием мультиколлинеарности является плохая обусловленность матрицы  $W^T W$  и бесконечное возрастание по этой причине дисперсии оценок линейной регрессии. Чтобы обеспечить надежность и эффективность оценок параметров регрессии, одним из выходов является использование методов регуляризации, выполняющими своего рода «корректировку» отклонений от нормального распределения остатков.

**Методы регуляризации.**

Идея регуляризации заключается в том, чтобы в функцию потерь, в качестве которой используют сумму квадратов ошибок:

$$RSS = \sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2 = \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2,$$

и которая минимизируется при нахождении оценок параметров модели методом МНК, добавить дополнительный член, зависящий от этих самих этих параметров.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Временные ряды предсказанных по модели линейной регрессии и реальных значений переменной  $Y_1$  (а),  $Y_2$  (б),  $Y_3$  (в)

Например, вместо  $RSS$  можно было бы минимизировать выражение:

$$L_1 = RSS + \lambda \sum_{i=1}^m |\beta_i|$$

или

$$L_2 = RSS + \lambda \sum_{i=1}^m \beta_i^2.$$

Тем самым вводится штраф за неоправданно большие значения  $\beta_i$ , причем величина этого штрафа пропорциональна величине параметра  $\lambda$ , с помощью которого теперь можно настраивать алгоритм подгонки модели и попытаться получить более устойчивое решение. Первый вариант носит название  $L_1$ -регуляризации, второй –  $L_2$ -регуляризации или регуляризации Тихонова.

Смысл процедуры заключается в «стягивании» в ходе настройки вектора параметров модели  $\beta$  таким образом, чтобы они в среднем оказались несколько меньше по абсолютной величине, чем это было бы при оптимизации по МНК.

При этом достигается некоторый компромисс между ошибкой регрессии и размерностью используемого признакового пространства, выраженного суммой абсолютных значений коэффициентов  $\beta$ . В ходе минимизации некоторые коэффициенты становятся равными нулю, что, собственно, и определяет отбор информативных признаков.

**Гребневая регрессия** (ridge regression) реализует классическую  $L_2$ -регуляризацию Тихонова, при которой оценки параметров модели  $\beta_i$  находят из условия минимизации СКО оценок параметров модели регрессии [9]:

$$\hat{\beta} = \arg \min \left[ \sum_{i=1}^n \left( z_i - \sum_{j=1}^m \beta_j w_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^m \beta_j^2 \right]$$

В матричном виде гребневая регрессия представляет собой линейную модель

$$\hat{z} = H \cdot W \cdot \beta,$$

где  $H = W(W^T W + \lambda I)^{-1} W^T$ , т. е. к информационной матрице перед ее обращением добавляется диагональная матрица  $\lambda I$ , называемая «гребнем». В результате матрица становится хорошо обусловленной, оставаясь в то же время «похожей» на исходную.

В условиях мультиколлинеарности предикторов предпочтительны оценки смещенные, но имеющие меньшую дисперсию, чем несмещенные МНК-оценки.

При  $\lambda \rightarrow 0$  регуляризованное решение стремится к МНК-решению, т. е. обычной линейной модели. При увеличении  $\lambda$  вектор

коэффициентов  $\hat{\beta}$  становится всё более устойчивым и жёстко определённым (фактически, происходит понижение эффективной размерности решения). При  $\lambda \rightarrow \infty$  чрезмерная регуляризация приводит к вырожденному решению:  $\hat{\beta} \rightarrow 0$ . Оба крайних случая нежелательны, поэтому оптимальным является некоторое промежуточное значение параметра смещения  $\lambda$ . Для его нахождения применяется несколько методов: *kHKB* (аббревиатура, берущая начало от фамилий создателей метода – Hoerl, Kennard и Baldwin), *kLW* и обобщенная перекрестная проверка на основе внешнего критерия *GCV* (от англ. generalized cross-validation):

$$GCV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{z_i - \hat{z}_i}{1 - \text{tr}(H)/n} \right)^2.$$

Коэффициент смещения лежит в диапазоне  $0 \leq \lambda \leq 1$ . В данной работе была рассчитана серия из 10 моделей для каждой переменной-отклика со значениями  $\lambda$  от 0.1 до 1. На рис. 3 приведены графики зависимостей значения критерия *GCV* от смещения  $\lambda$ .

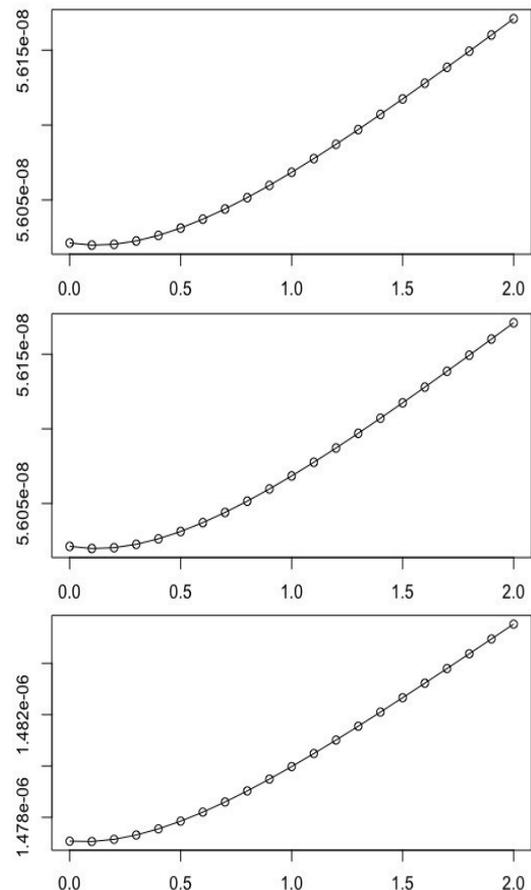


Рисунок 3 – Зависимость *GCV* 10-6 от  $\lambda$  для модели гребневой регрессии с переменной-откликом *YI*

Модели гребневой регрессии имеют вид, описываемый формулами:

$$Y1 = 0.026935209 X1 - 0.495355311 X2 + 0.111965296 X3 + 0.060571464 X4 + 0.538728237 X5 + 0.586891343 Y2 - 0.006001552 Y3 + 2.295470545 \quad (6)$$

$$Y2 = -0.04274227 X1 + 0.29505350 X2 + 0.02355006 X3 + 0.09996256 X4 - 0.67215631 X5 + 1.54099163 Y1 + 0.02994147 Y3 - 3.01774940 \quad (7)$$

$$Y3 = 0.2000331 X1 - 3.3500077 X2 - 0.7256510 X3 + 2.9943899 X4 + 0.8500513 X5 - 0.1612681 Y1 + 0.3064189 Y2 - 2.9716366 \quad (8)$$

На рис. 4 приведены временные ряды предсказанных по моделям гребневой регрессии значений  $Y1$ - $Y3$  и их реальных значений, взятых из тестовой выборки.

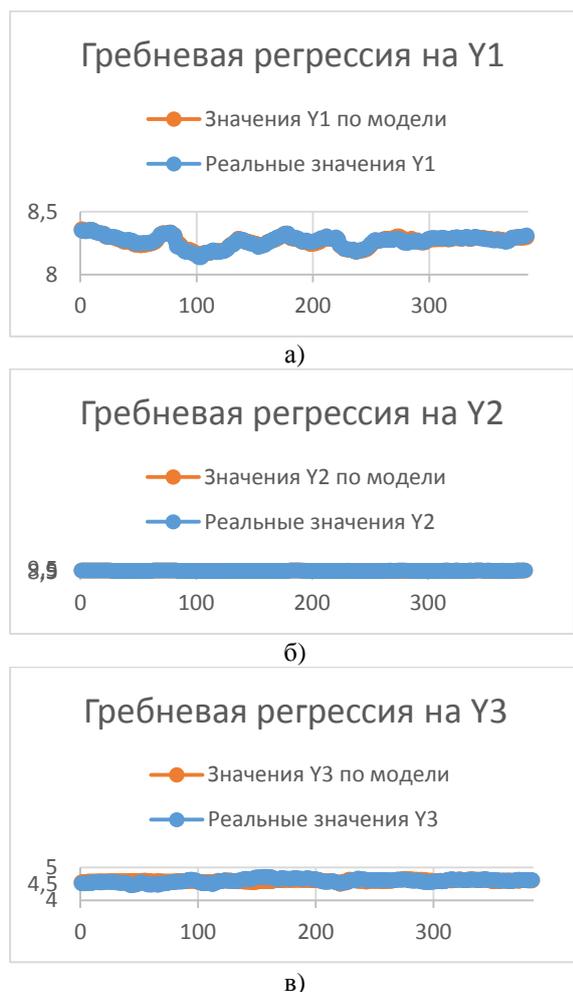


Рисунок 4 – Временные ряды предсказанных по модели гребневой регрессии значений и реальных значений для переменной  $Y1$  (а),  $Y2$  (б),  $Y3$  (в).

Исходя из визуального анализа, можно сделать вывод о плохом качестве модели гребневой регрессии для предсказания  $Y3$ .

**Лассо-регрессия** (LASSO, от англ. Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) реализует иной подход к определению параметров множественной регрессии, когда на основе матрицы парных коэффициентов корреляции строится уравнение регрессии в стандартизованном масштабе, т. е. в модели вместо исходных значений переменной отклика  $z$  и предикторов  $w_j$  берутся их стандартизованные значения  $z^0, w_j^0$ , для которых среднее значение равно нулю, а среднее квадратическое отклонение равно единице.

Лассо-регрессия внешне похожа на гребневую регрессию, т. е. оценки параметров модели  $\beta_i$  также находят из условия минимизации функции потерь с учетом штрафа [10].

$$\hat{\beta} = \arg \min \left[ 0.5 \sum_{i=1}^n \left( y_i^0 - \sum_{j=1}^m \beta_j x_j^{0i} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^m |\beta_j| \right]$$

Замена штрафного слагаемого  $\lambda \sum_{j=1}^m \beta_j^2$  на  $\lambda \sum_{j=1}^m |\beta_j|$  приводит к качественно иному поведению вектора коэффициентов в ходе оптимизации: наряду с относительно равномерной подстройкой всего набора  $\beta$ , некоторые коэффициенты становятся равными нулю, что позволяет одновременно выполнить отбор информативных предикторов.

Иными словами, если ввести ограничение-неравенство, регулирующее слишком большую сумму модулей стандартизованных коэффициентов  $\sum_{j=1}^m |\beta_j| \leq \tau(\lambda)$ , то при  $\tau_{opt}$  достигается некоторый компромисс между величиной ошибки регрессии и размерностью используемого пространства предикторов, выраженного суммой абсолютных значений  $|\beta_j|$ .

При значении относительного параметра фракционирования  $s = \tau / \sum_{j=1}^m |\beta_j| = 1$  лассо-регрессия сводится к обычному методу наименьших квадратов, а по мере его уменьшения  $s \rightarrow 0$  формируемая модель становится все более лаконичной (с точки зрения числа входящих в нее параметров), пока все коэффициенты не станут равными 0. Оптимальную величину  $s$  находят путем минимизации  $C_p$ -критерия Мэллоу.

На рис. 5 (левый ряд) видно, как меняются значения стандартизованных коэффициентов регрессии при увеличении параметра фракционирования  $s$ . При  $s = 0$  все коэффициенты равны 0, а при  $s = 1$  получаем полную модель. Вертикальные линии отмечают значения  $s$  при которых происходит обнуление определенных коэффициентов.

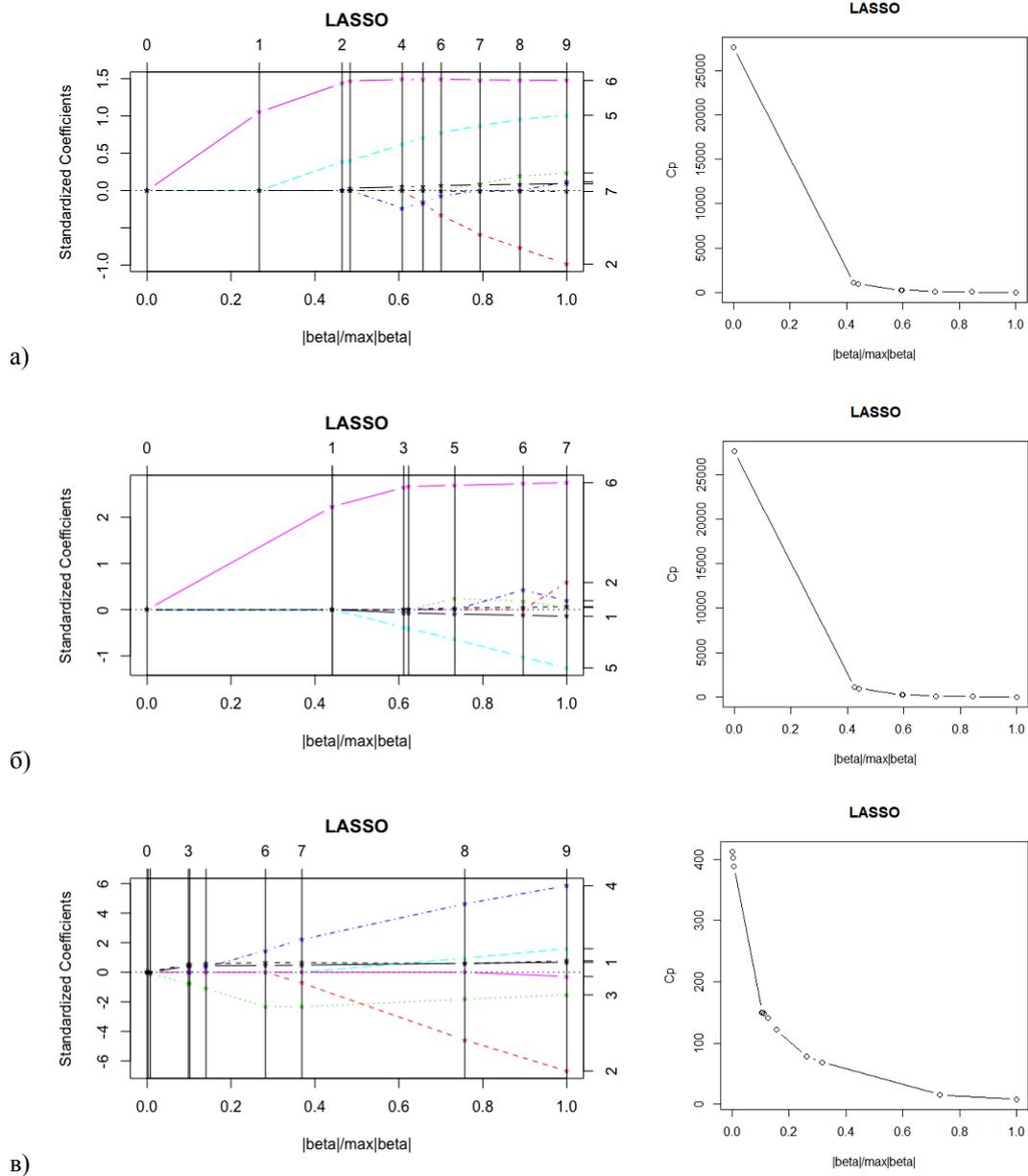


Рисунок 5 – Зависимость стандартизованных коэффициентов (слева) и Cp-критерия (справа) от значения параметра фракционирования в лассо-регрессии для переменной Y1 (а), Y2 (б), Y3 (в)

Правый ряд на рис. 5 демонстрирует, как в тех же условиях изменяется средний квадрат ошибки. Для всех зависимых переменных минимум ошибки наблюдается при  $s = 1$ , т. е. лассо регрессия свелась к МНК. Модели лассо-регрессии совпадают с моделями гребневой регрессии и имеют вид, описываемый формулами (6)-(8).

Для повышения результативности анализа многомерных данных большой эффект даёт снижение их размерности через выделение лидирующих факторов и комбинаций признаков. При этом строятся модели взаимного влияния признаков друг на друга и выявляются их независимые комбинации. Однако при большом количестве предикторов такой подход трудоемок и требует большой вычислительной мощности.

Альтернативным путем является выделение совокупности признаков и факторов, которые напрямую связаны с восстановлением зависимости без построения, по сути промежуточной, модели взаимодействия признаков. Такой подход означает трансформацию предикторов, распределения которых максимально различны, без построения их модели взаимодействия.

Анализ главных компонент (PCA, principal component analysis) является классическим методом снижения размерности данных, широко используемым в различных областях науки и техники и детально описанным в многочисленных руководствах [11, 12].

PCA выполняет симметричную обработку всей матрицы наблюдений. При этом алгоритм

стремится построить небольшое количество ортогональных плоскостей, ориентируя их относительно максимума вариации точек отображаемых объектов, т. е. при проецировании на эти плоскости вносятся минимально возможные искажения в геометрию исходных данных.

Пусть имеется  $m$  ( $m \gg 1$ ) случайных переменных  $W_1, W_2, \dots, W_m$ , имеющих совместное многомерное распределение (не обязательно нормальное), которым соответствует вектор средних  $\mu$ . Ковариационная матрица  $S$  размерностью  $m \times m$  определяет характер взаимосвязи между этими переменными или их структурную зависимость. PCA рассматривает в качестве допустимых преобразований всевозможные линейные ортогональные центрированные комбинации переменных:

$$r_k = \sum_{i=1}^m p_{ik}(W_i - \mu_i),$$

где  $p_{ik}$  – пересчетные коэффициенты,

$$\sum_{i=1}^m p_{ik} = 1, k = 1, 2, \dots, m.$$

Из этих комбинаций выбирается ортогональная система векторов, доставляющая максимум критерию информативности. Первой главной компонентой  $z_1$  называется такая линейная комбинация исходных переменных, которая обладает наибольшей дисперсией. В свою очередь, каждая следующая  $k$ -я главная компонента  $r_k$  ( $k = 2, \dots, m$ ) не коррелирована с  $k-1$  предыдущими главными компонентами и имеет наибольшую дисперсию по сравнению с остальными. Ранжирование по дисперсии осей найденных латентных переменных позволяет выполнить поиск такой  $u$ -мерной системы координат ( $m > u$ ), которая содержит сжатое описание структурной зависимости исследуемой системы признаков  $X$  небольшим числом  $u$  факторов и без существенной потери информации. Результатом PCA-анализа конкретной матрицы наблюдений  $W$  размерностью  $(n \times m)$ , где  $n$  – число наблюдаемых объектов,  $m$  – число независимых переменных, является матрица  $T$  счетов (scores) размерностью  $n \times u$ , содержащая проекции исходных точек выборки  $W$  в новом  $u$ -мерном базисе.

Другая матрица  $P$  размерностью  $(u \times m)$  содержит нагрузки, обеспечивающие пересчет данных из  $m$ -мерного пространства исходных переменных в  $u$ -мерное пространство главных компонент. Каждая  $k$ -я строка матрицы  $P$  состоит из оценок коэффициентов  $p_{ik}$ , показывающих долю участия каждой  $i$ -й переменной из  $w_1, \dots, w_m$  в формировании  $k$ -й главной компоненты. Фактически это – проекция

предиктора  $w_j$  на новую  $k$ -ю ось. Анализируя таблицу нагрузок, можно понять, какие исходные переменные связаны между собой, а какие независимы, и объяснить предметный смысл  $k$ -го предиктора.

Снижение размерности исходного пространства методом PCA можно представить как последовательный, итеративный процесс, который можно оборвать на любом шаге  $u$ . Вследствие ортогональности системы координат главных компонент нет необходимости перестраивать матрицы счетов  $T$  и нагрузок  $P$  при изменении числа компонент: к ним просто прибавляются или отбрасываются очередные столбцы (строки).

При этом важно знать, когда следует остановиться, т. е. определить «правильное» число главных компонент  $u$ . Если это число слишком мало, то описание данных будет не полным. С другой стороны, избыточное число главных компонент приводит к переоценке, т. е. к ситуации, когда моделируется шум, а не содержательная информация.

Обычно ориентируются на последовательность  $\lambda_1, \dots, \lambda_m$  собственных значений матрицы ковариаций предикторов и принимают решение, сколькими главными осями стоит ограничиться. Например, для интерпретации считается достаточным число осей  $u$ , объясняющих 75 % дисперсии в исходных данных, т. е.

$$Rd^2 = \frac{\sum_{i=1}^u \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} = 0.75,$$

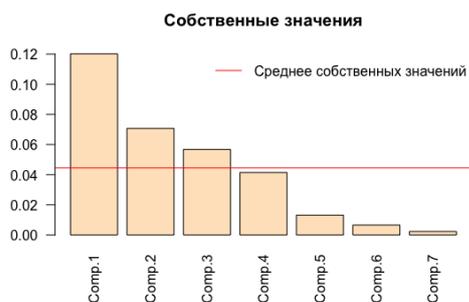
где  $Rd^2$  – некоторый аналог коэффициента детерминации в регрессионном анализе.

Критерий Кайзера-Гуттмана рекомендует оставить только те главные компоненты, собственные значения которых превышают среднее

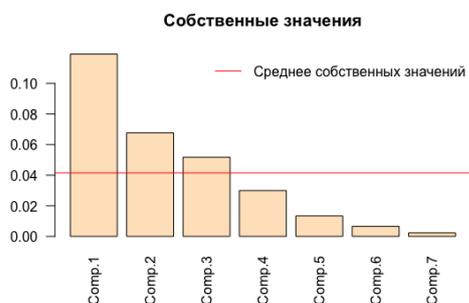
$$\frac{\sum_{i=1}^u \lambda_i}{u}.$$

На рис. 6 показаны значения собственные значения  $\lambda$  матрицы ковариаций предикторов для различных переменных-откликов. Красная линия соответствует среднему значению.

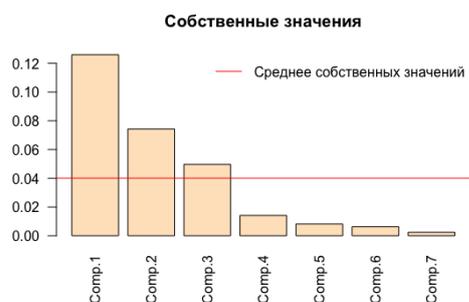
Исходя из рисунка, можно сделать вывод, что для моделей регрессии на главные компоненты достаточно 3-х главных компонент. Результаты вычислений доли объясненной вариации данных сведены в табл. 7. Так, первые главные компоненты объясняют 58-65 %, а все три – более 92 %.



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Собственные значения  $\lambda$  матрицы ковариаций предикторов для переменной  $Y1$  (а),  $Y2$  (б),  $Y3$  (в)

Таблица 7 – Доли объясненной главными компонентами вариации данных

Переменная-отклик	Comp1	Comp2	Comp3
$Y1$	0.5825552	0.78684939	0.92140135
$Y2$	0.6204269	0.82851341	0.9504274
$Y3$	0.6506126	0.87867811	0.98666252

В табл. 8 представлены нагрузки на главные компоненты. Жирным выделены максимальные нагрузки для каждой компоненты. Анализируя таблицу, можно предположить, что первые главные компоненты для всех трех моделей связаны с наблюдаемыми переменными  $X1$  и  $X3$ , вторые – с переменной  $X1$ .

Модели РСА-регрессии имеют вид, описываемый формулами (9)-(11):

$$Y1 = 0,270468 \text{ Comp1} - 0,273705 \text{ Comp2} - 0,314577 \text{ Comp3} + 3,04795233 \quad (9)$$

$$Y2 = 0,287668 \text{ Comp1} - 0,280072 \text{ Comp2} - 0,471153 \text{ Comp3} + 3,843464683 \quad (10)$$

$$Y3 = -0,0006908 \text{ Comp1} + 0,0423181 \text{ Comp2} + 0,3337942 \text{ Comp3} + 2,662009237 \quad (11)$$

На рис. 7 приведены временные ряды предсказанных по моделям регрессии на главные компоненты значений  $Y1$ - $Y3$  и их реальных значений, взятых из тестовой выборки.

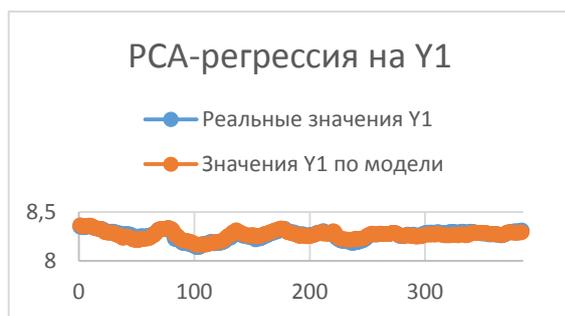
Исходя из визуального анализа, можно сделать вывод о плохом качестве модели РСА-регрессии на  $Y2$  и  $Y3$ .

Таблица 8 – Факторные нагрузки на главные компоненты

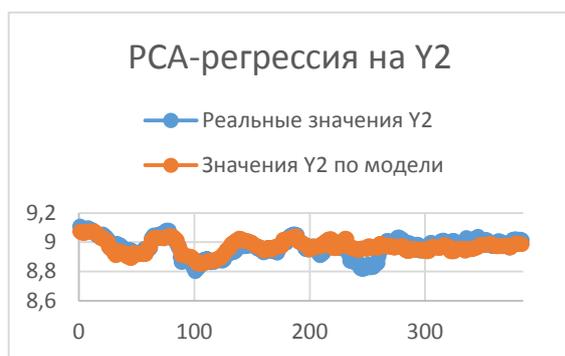
Переменная $Y1$			
	Comp 1	Comp 2	Comp 3
$X1$	<b>0.534889</b>	<b>0.7994</b>	0.005413
$X2$	0.398771	-0.1692	0.120405
$X3$	<b>0.412480</b>	-0.2179	0.129931
$X4$	0.386992	-0.1816	0.096542
$X5$	0.364031	-0.1692	0.081301
$Y2$	0.320020	<b>-0.4282</b>	<b>-0.552238</b>
$Y3$	-0.006545	0.1998	<b>-0.804794</b>
Переменная $Y2$			
	Comp 1	Comp 2	Comp 3
$X1$	<b>0.55970</b>	<b>0.7806</b>	0.25753
$X2$	0.40306	-0.2303	-0.03765
$X3$	<b>0.41448</b>	-0.2767	-0.02087
$X4$	0.39016	-0.2368	-0.06485
$X5$	0.36808	-0.2223	-0.07981
$Y1$	0.25419	-0.2000	<b>-0.30399</b>
$Y3$	-0.01278	<b>0.3398</b>	<b>-0.91041</b>

Продолжение таблицы 8

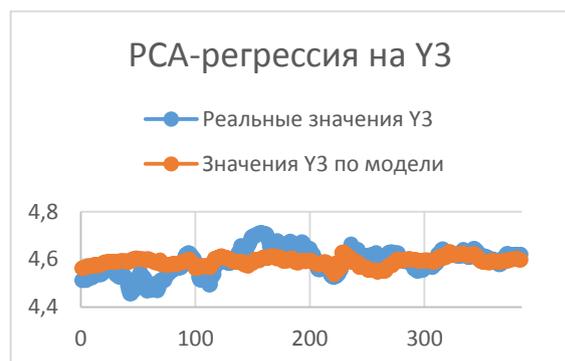
Переменная УЗ			
	Comp 1	Comp 2	Comp 3
<b>X1</b>	<b>0.4858</b>	<b>0.79946</b>	<b>0.3526</b>
X2	0.3825	-0.07176	-0.3279
<b>X3</b>	<b>0.3974</b>	-0.11376	-0.3217
X4	0.3719	-0.08859	-0.3197
X5	0.3512	-0.08713	-0.2885
Y1	0.2830	-0.29908	0.3277
Y2	0.3435	<b>-0.48773</b>	<b>0.6098</b>



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Временные ряды предсказанных по модели PCA-регрессии значений и реальных значений для переменной Y1 (а), Y2 (б), Y3 (в)

### Сравнительный анализ качества полученных моделей

Для предсказания Y1-Y3 нами были получены следующие регрессионные модели: линейная регрессия с исключёнными коллинеарными предикторами, гребневая и лассо-регрессия, которые совпали, а также регрессия на главные компоненты. Все модели имеют разное число параметров. Качество полученных моделей оценим по тестовой выборке по критериям, описанным во втором разделе. Результаты исследования качества моделей сведены в табл. 9.

Из значений критериев качества, приведенных в таблице, можно заключить следующее:

а) для моделей с переменной-откликом Y1 и Y2:

- все модели статистически значимы в целом, поскольку значение  $F$ -статистики гораздо больше 1, что соответствует  $p$ -значению  $< 1.032e-15$ ;

- наиболее значимой по значению критерия AIC является модель гребневой регрессии;

- наихудшей из рассмотренных моделей является PCA-регрессия;

- значение  $R^2$  для PCA-регрессии на Y2 близко к 0.5, это свидетельствует о том, что модель может не отражать реальное положение вещей;

б) для моделей с переменной-откликом Y3:

- все модели имеют низкие коэффициенты детерминации, что не позволяет использовать их для предсказания Y3;

- значение  $F$ -статистики ниже критического на уровне значимости  $\alpha = 0.05$ , следовательно, принимается нулевая гипотеза о статистической незначимости уравнения регрессии в целом;

- наилучшей для предсказания Y3 среди рассмотренных моделей является гребневая регрессия.

Таблица 9 – Значения качественных показателей для полученных моделей

<b>Линейная регрессия с неколлинеарными предикторами</b>						
<b>Переменная-отклик</b>	<b>TSS</b>	<b>RSS</b>	<b>RSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>F-статистика</b>	<b>AIC</b>
<b>Y1</b>	0,7571646	0,0374452	0,00995303	0,9998032	887,4882336	-1251,3923
<b>Y2</b>	1,5441833	0,0961286	0,01594705	0,9377479	690,7173013	-889,35421
<b>Y3</b>	1,14979782	1,0208347	0,0518989	0,1121616	1,613796285	15,918314
<b>Гребневая (лассо-) регрессия</b>						
<b>Y1</b>	0,7571646	0,03335648	0,00943136	0,9998247	569,6517658	-1289,7932
<b>Y2</b>	1,5441833	0,0846401	0,01502355	0,9451878	450,077109	-932,22910
<b>Y3</b>	1,1497978	0,9341717	0,04991112	0,187534	1,957935321	-10,148492
<b>РСА-регрессия</b>						
<b>Y1</b>	0,7571646	0,11307461	0,01727281	0,9994057	331,6448884	-829,00766
<b>Y2</b>	1,5441833	0,7413971	0,04422887	0,5198775	46,91414772	-106,90006
<b>Y3</b>	1,1497978	1,0568418	0,05280626	0,0808455	0,833339677	29,2294581

### Выводы

С целью построения регрессионных моделей был проведен разведочный анализ данных, выявлена мультиколлинеарность между переменными и выбран оптимальный состав предикторов для каждой переменной.

Построены модели множественной регрессии: гребневая и лассо-регрессия. При этом модели, построенные с помощью метода лассо-регрессии, совпали с моделями, использующими гребневую регрессию.

Построена модель с помощью регрессии на главные компоненты. Для повышения результативности анализа многомерных данных была снижена их размерность с использованием анализа главных компонент.

Произведена оценка статистической значимости трех моделей и произведено сравнение эффективности построенных моделей при прогнозировании. Показано, что для двух переменных выбраны оптимальные модели для прогноза. В то время как для третьей переменной ни одна из моделей не позволяет использовать их для предсказания. Для данного случая предполагается использование нелинейных регрессионных моделей.

### Литература

1. Романчук С. М. Автоматизированная система мониторинга и управления водоснабжением города Донецка / С. М. Романчук. – Вестник ДоНУ Сер. А, 2009, вып.2 – 133 с.
2. Романчук С. М. Направления развития городских АСУ ТП водоснабжения и водоотведения / С. М. Романчук – Наукові праці Донецького національного технічного університету – Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка» №1 (19) 2014 – 131 с.
3. Романчук С. М. Применение информационно-аналитических систем в управлении водоснабжением города Донецка / С. М. Романчук. – XII Міжнародної науково-

технічної конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика», ДонНТУ, Донецк, 2011. – 129 с.

4. Романчук С. М. Мониторинг и анализ данных в процессе управления водоснабжением города Донецка / С.М. Романчук. – Системний аналіз та інформаційні технології у науках про природу та суспільство, №1 2011. – 133 с.

5. Романчук С. М. Закономерности и статистические модели режимов работы городских водораспределительных сетей / С. М. Романчук. – Наукові праці ДонНТУ, серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка», вип. 16, 2012. – 208 с.

6. Романчук С. М. Алгоритмы управления технологическими режимами водоснабжения городов / С.М. Романчук. – Вестник ДоНУ, 2014, вып.1 – 103 с.

7. Тьюки Джон. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ. / Джон Тьюки – М.: Мир, 1981. – 696 с.

8. Мастицкий С. Э. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. М. / С. Э. Мастицкий, В. К. Шитиков – ДМК Пресс, 2015. – 496 с.

9. Дрейпер Норман. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. / Норман Дрейпер, Гарри Смит – М.: «Диалектика», 2007, 3-е изд. – С. 912. – ISBN 0-471-17082-8.

10. Tibshirani R. Regression shrinkage and Selection via the Lasso. / R. Tibshirani – Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 1996 Vol. 32, № 1 – p.267-288.

11. Шитиков В. К. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг – Тольятти: Кассандра, 2014. – 314 с.

12. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. / П. Флах – Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 400 с.

**Беспалова С. В., Романчук С. М., Ермоленко Т. В., Бондаренко В. И.** *Построение регрессионных моделей режимов работы водораспределительных сетей с помощью методов регуляризации и анализа главных компонент.* Задачи поддержания эффективных и оптимальных режимов работы объектов водораспределительной сети, позволяющих обеспечить экономию электроэнергии и воды, а также задачи распознавания внештатных режимов и аварийных ситуаций являются наиболее важными для предприятий водоснабжения. В этой статье исследуется эффективность методов регрессионного анализа для прогнозирования поведения водопроводной сети с использованием онлайн-данных автоматизированной системы сбора и передачи информации. Исходные данные представлены временными рядами значений давления воды в контрольных точках водопроводной сети. Проведен разведочный анализ, построены предсказательные модели для показаний датчиков давления воды в неактивных точках водораспределительной сети на основе моделей гребневой и лассо-регрессии, и регрессии на главные компоненты. Произведена оценка статистической значимости трех моделей и произведено сравнение эффективности построенных моделей при прогнозировании. Разработанные модели позволяют прогнозировать процессы, происходящие в водопроводных сетях. Показано, что для двух переменных выбраны оптимальные модели для прогноза. В то время как для третьей переменной ни одна из моделей не позволяет использовать их для предсказания. Для данного случая предполагается использование нелинейных регрессионных моделей.

**Ключевые слова:** мультиколлинеарность, гребневая регрессия, лассо-регрессия, анализ главных компонент.

**Bespalova S. V., Romanchuk S. M., Yermolenko T. V., Bondarenko V. I.** *Construction of regression models of modes of water distribution networks using methods of regularization and principal component analysis.* The support's problems of effective and definitive working conditions of objects of water distribution network, providing an opportunity to electricity and water saving and also the problems of identification of inappropriate conditions and emergencies are the most important for water supply organizations. This article examines the effectiveness of autoregressive methods for forecasting the behavior of the water supply network using online data of Computer-Assisted Acquisition System. The source data are represented by time series of water pressure values at control points of the water supply network. An exploratory analysis has been carried out, predictive models have been constructed for the registration of water pressure sensors in inert points of the water distribution network based on the ridged and lasso regression models, and the regression on the main components.

The statistical significance of the three models was evaluated and the efficiency of the models constructed was compared with the prediction. The developed models allow to predict the processes occurring in water supply networks. It is indicated that for two variables the optimal models for the forecast were chosen. While for the third variable, none of the models allows them to be used for prediction. As applicable the use of non-linear regression models is assumed.

**Keywords:** multicollinearity, ridge regression, LASSO, PCA, principal component analysis.

Статья поступила в редакцию 20.05.2019  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Прогнозирование финансовых временных рядов с помощью нейронных сетей с использованием библиотеки Keras в Python

Т. А. Васяева, Т. В. Мартыненко, Н. С. Суббота  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
[vasyaeva@gmail.com](mailto:vasyaeva@gmail.com), [tatyana.v.martynenko@gmail.com](mailto:tatyana.v.martynenko@gmail.com), [subbota.nikita@mail.ru](mailto:subbota.nikita@mail.ru)

### **Аннотация**

*В статье описаны основные способы биржевого анализа, рассмотрено применение глубоких нейронных сетей для прогнозирования цен акций сети аптек «36иб». Показано получение котировок акций, описан формат полученных данных. Рассмотрено формирование обучающей выборки в задачах машинного обучения. Для разработки и обучения нейронной сети использован язык программирования Python, а также библиотеки pandas; numpy; keras (в качестве основы tensorflow).*

### **Введение**

Рыночный путь развития предполагает, что главным законом функционирования субъектов хозяйственной деятельности является соотношение между спросом и предложением, а биржа как его элемент приобретает определяющее значение. Эффективные действия на бирже связаны с тщательным анализом происходящего на рынке.

Прогнозирование является основой биржевой торговли. Способность предугадывать движение цен лучше, чем остальные может сделать из трейдера обеспеченного человека в короткие сроки. Для того чтобы прогнозирование было максимально достоверным, а прогнозы – обоснованными, трейдеры используют биржевой анализ [1-2].

В последние годы, у финансовых аналитиков стал вызывать большой интерес к такому направлению как машинное обучение [3] и в частности искусственные нейронные [4-5].

### **Анализ предметной области**

В упрощённом варианте под биржей понимают место, где производится обмен. Это может быть обмен денег на товар или товар меняют на деньги, то есть происходит покупка и продажа чего-либо. При этом торг на биржах проходит не на физический товар, а на финансовые инструменты.

Особенностью биржевого товара является отсутствие понятия качества. Биржевой товар одного вида является полностью взаимозаменяемым и только цена имеет значение. Механизм работы биржи устроен так, что помогает покупателю и продавцу найти цену, которая устроит их обоих. Таким образом, биржа имеет существенные отличия рынка: и в первую очередь отличие это в том, что на биржах

торгуется однородный товар; обмен организован по принципу «гарантия лучшей цены, что даёт возможность однозначно определять цену биржевого товара в определенный момент времени.

Еще одно важное и существенное отличие от обычного рынка – это невозможность выбирать, с кем заключать, а с кем не заключать сделку. Заключая сделку, вообще неизвестно, у кого товар покупается и кому продается, т. к. напрямую вся работа ведется только с биржей. Именно биржа выступает арбитром всех сделок.

В мировой практике по виду товара (актива), биржи подразделяются на фондовые, валютные и товарные (товарно-сырьевые).

Фондовые биржи – это организаторы торговли на рынке ценных бумаг. Предметом деятельности таких бирж является обеспечение необходимых условий обращения ценных бумаг, определение их рыночных цен и поддержание высокого уровня профессионализма участников рынка ценных бумаг.

Валютные биржи оказывают большое влияние на деятельность рынков в мире финансов. Предметом торговли на валютных рынках выступают различные валюты. Деятельность таких структур состоит в предоставлении услуг по организации и проведению торгов иностранной валютой.

Отличительной особенностью товарных (товарно-сырьевых бирж) является их преимущественное влияние на формирование оптовых рынков. Именно товарные биржи регулируют торговлю такими товарами высокого спроса, как газ, нефть, золото, серебро, пшеница и многие другие.

### **Постановка проблемы**

Предметом исследования данной работы являются методы анализа фондовых бирж.

В данном контексте финансовые инструменты представляются ценными бумагами, такими как акции, облигации, фьючерсы, пифы и др. Прогнозирование биржевой торговли связано с анализом данных котировок. Мы будем прогнозировать цены акций, основываясь на ценах акций в предыдущие годы, а также дополнительных данных биржевой торговли за рассматриваемый период.

### Основные способы биржевого анализа

Выделяют три основных способа биржевого анализа:

- фундаментальный;
- технический;
- анализ объёмов.

**Фундаментальный анализ** фондового рынка [1-2] – процесс, предусматривающий сбор и всестороннее изучение показателей компании, (состояния ее активов) или отрасли с целью составления долгосрочного прогноза. Такой анализ всегда начинается с изучения положения дел в национальной экономике, рассматривают расстановку сил спроса и предложения в секторе, к которому относится интересующая компания (актив). Далее необходимо сравнить каждую компанию с конкурентами и оценить перспективы всех участников блока. Лидеры списка становятся объектами тщательного детального анализа, изучается вся доступная информация о конкретном объекте. По окончании такой процедуры на руках у трейдера оказывается максимально полная информация о заинтересовавших его компаниях.

**Технический анализ** рынка ценных бумаг [1-2] представляет собой систему прогнозирования цен, основанную на информации, полученной в результате рыночных торгов. В отличие от фундаментального анализа акций, основанного на изучении производственной деятельности предприятия, в основе технического анализа лежит выделение и изучение определенных закономерностей в движении графика котировок. Иными словами, при использовании технического анализа трейдер, совершая торговую операцию,

руководствуется только графическим изображением, при этом он может быть абсолютно не знаком с деятельностью компании ценными бумагами которой он торгует.

Технический анализ инвестиционных свойств ценных бумаг задействует множество инструментов, но основные факторы, от которых он зависит – это объем торгов, динамика цен и исторические данные.

Производить технический анализ можно разными способами:

– с применением индикаторов. Индикаторы – готовые алгоритмы, агрегирующие предыдущие ценовые значения за указанный трейдером период. Они представляют собой специальные инструменты для прогнозирования движения курса, которые позволяют определить наиболее благоприятный момент для открытия и закрытия сделки;

– с использованием графических инструментов. Трейдеры, которые не доверяют техническим индикаторам, производят биржевой анализ самостоятельно, расчерчивая график трендовыми линиями и уровнями поддержки и сопротивления. Один из самых популярных инструментов графического анализа – канал тренда. Для того чтобы упростить видение графика и спрогнозировать движение и силу тренда, применяются трендовые линии. Ценовой канал – наиболее эффективный инструмент для тех графиков, где амплитуда колебаний цены примерно одинакова. Ценовой канал строится из двух линий канала, которые образуют собой коридор для цены. Линии канала могут стать отличным помощником в принятии решений о закрытии и открытии сделки;

– по паттернам. Методы технического анализа на рынке включают в себя графический анализ, и как уже следует из названия, работает исключительно с представлением цены активов на графике. Основа графического анализа – паттерны (рис. 1).

Паттерны – повторяющиеся геометрические фигуры, по которым с высокой вероятностью можно предугадывать поведение рынка.

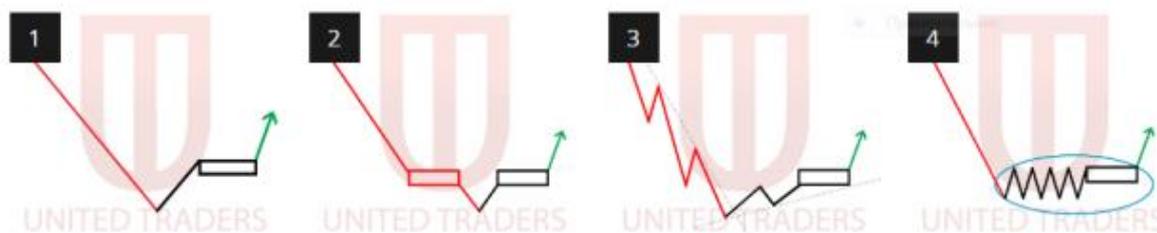


Рисунок 1 – Графические паттерны для торговли

Графический анализ базируется на одном из постулатов технического анализа о том, что история повторяется. То есть если на графике появляется определенный паттерн, то он уже имел место в прошлом. Конечно же, модели никогда в точности не повторяют друг друга. Но определить и классифицировать их можно по их контурам.

Каждая модель имеет определенные правила формирования. Трейдер может отслеживать ее появление еще на ранних стадиях и затем ждать завершения формирования для получения сигнала. Если паттерн соответствует всем правилам – он жизнеспособен и с ним можно работать.

**Анализ объемов** торговли набирает популярность [1-2]. Сторонники этого метода аргументируют свой выбор тем, что фундаментальный и технический способы рассматривают следствия, тогда как анализ объемов – причины формирования цены.

Объем – это количество контрактов, которое было продано или куплено за определенный период. График объемов оформляется в виде гистограммы. Анализ объемов заключается в том, чтобы выявить, на каких ценовых уровнях наблюдалась наибольшая заинтересованность. При исследовании объемов становится заметно, что цена актива идет от одного большого объема к следующему.

Рассмотренные методы анализа, к которым привыкли большинство участников рынка [1-2], не всегда эффективны. К счастью, с быстрым развитием высоких технологий и, соответственно, с появлением новых инструментов анализа данных открываются новые возможности.

### **Машинное обучение для прогнозирования цен акций**

Машинное обучение [3, 5] является одним из направлений искусственного интеллекта. Одним из главных преимуществ перед традиционными алгоритмами это возможность обучения. В настоящее время это наиболее перспективный инструмент для бизнеса, основанный на искусственном интеллекте.

Системы машинного обучения позволяют быстро применять знания, полученные при обучении на больших наборах данных, что позволяет им преуспевать в таких задачах, как распознавание лиц, распознавание речи, распознавание объектов, перевод, и многих других. В отличие от программ с закодированными вручную инструкциями для выполнения конкретных задач, машинное обучение позволяет системе научиться самостоятельно распознавать шаблоны и делать прогнозы.

Итак, для применения машинного обучения необходимо собрать данные биржевой торговли за предыдущий период. Программный сбор данных о котировках открывает широкие возможности для анализа данных биржевой торговли.

### **Получение данных**

Для получения котировок данных будем использовать услуги компании «ФИНАМ» и их интернет-ресурс [6]. Сервера «ФИНАМ» предоставляют замечательную возможность – скачивать котировки. Перечень бумаг (инструментов), которые предоставляются компанией «ФИНАМ», будем брать из источника [6].

С помощью инструментов, которые предоставляет данный ресурс (рис. 2), сформируем файл, который в дальнейшем будем использовать как данные для анализа. Возьмем, например, данные, предоставленные ПАО Московская Биржа, котировки акций сети аптек «36и6».

Данные получены в следующем формате: дата, время, цена открытия, максимальная цена, минимальная цена, цена закрытия, объем. Период анализа выберем 5 лет, интервал – один день. Полученные данные разделим части.

До наступления современной эры больших данных, общим правилом машинного обучения было разбиение данных на обучающие и тестовые в отношении 70 % на 30 %. Несмотря на то, что этот подход все еще работает, на сегодняшний день обычно используются следующие определения:

– обучающая выборка – выборка из данных, которая используется для обучения алгоритма;

– валидационная выборка – выборка данных, которая используется для подбора параметров, выбора признаков и принятия других решений, касающихся обучения алгоритма;

– тестовая выборка – выборка, которая используется для оценки качества работы алгоритма, при этом никак не используется для обучения алгоритма или используемым при этом обучении параметрам.

Размер тестовой выборки должен быть достаточно большой для получения высокой уверенности в качестве работы. Одной популярной эвристикой является использование 30% доступных для обучения данных для тестовой выборки. Это хорошо работает, если в распоряжении имеем небольшое количество примеров, например, от 100 до 10000 примеров.

Финам Про рынок Брокерские услуги Банк Управление активами Форекс Обучение О компании

МосБиржа акции Аптеки36и6

Интервал и периодичность 24.03.2017 — 24.03.2019 1 день

Имя выходного файла APTK\_170324\_190324 .csv

Имя контракта APTK

Формат даты: ггггммдд времени: ччммсс

Выдавать время:  начала свечи  окончания свечи  московское

Разделитель: полей: точка с запятой (,) разрядов: нет

Формат записи в файл: DATE, TIME, OPEN, HIGH, LOW, CLOSE, VOL

Добавить заголовок файла:

Заполнять периоды без сделок:

Получить файл

Рисунок 2 – Получение данных для анализа

Но в сегодняшнюю эпоху больших данных, когда перед машинным обучением стоят задачи, иногда имеющие больше миллиарда примеров, доля данных, используемых для тестовой и валидационной выборок сокращается, даже если растет абсолютное количество примеров в этих выборках. Нет никакой необходимости использовать чрезмерно большие валидационные / тестовые выборки, свыше того, что необходимо для оценки качества работы алгоритмов.

### **Применение нейросетей для прогнозирования цен на акции**

В качестве базовой модели прогнозирования будем использовать нейронные сети. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Также можно обучить нейронную сеть предсказать будущее значение некоторой последовательности на основе нескольких предыдущих значений.

Данные котировок, предоставленные ПАО Московская Биржа, представляют собой временной ряд [7], а нейронные сети хорошо зарекомендовали себя для решения задач прогнозирования временных рядов [8-10].

В настоящее время глубокие нейронные сети становятся одним из самых популярных подходов к решению самых разнообразных задач. Однозначного определения, что такое глубокая нейронная сеть, не существует. В данной работе под термином глубокой нейронной сети будем понимать нейронную сеть, которая содержит более одного скрытого слоя.

В настоящее время для обучения нейронных сетей, в том числе глубоких, используется алгоритм обратного распространения ошибки (error backpropagation algorithm) [11], основанный на методе градиентного спуска. Глубокие нейронные сети с большим количеством скрытых слоев трудно обучать из-за проблемы исчезающего градиента. Проблему исчезающего градиента позволяет решить архитектура рекуррентной нейронной сети, называемая сетью долго-краткосрочной памяти (Long Short-Term Memory) [11-12].

### **Рекуррентные нейронные сети**

Рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks) [12] это сети, содержащие обратные связи и позволяющие сохранять информацию. На рис. 3 изображен фрагмент нейронной сети.

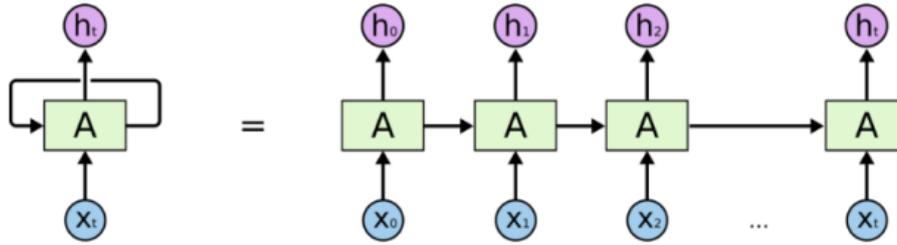


Рисунок 3 – Фрагмент рекуррентной нейронной сети и рекуррентная нейронная сеть в развертке

Сеть принимает входное значение  $x_i$  и возвращает значение  $h_i$ . Наличие обратной связи позволяет передавать информацию от одного шага сети к другому. Рекуррентную сеть можно рассматривать, как несколько копий одной и той же сети, каждая из которых передает информацию последующей копии. Если мы развернем обратную связь, то получим следующее (рис. 3).

Обратные связи придают рекуррентным нейронным сетям дополнительные возможности. Recurrent Neural Networks (RNN) – самая естественная архитектура нейронных сетей для работы с данными в виде последовательностей. В этом и состоит привлекательность RNN, что они потенциально умеют связывать предыдущую информацию с текущей задачей. Иногда для выполнения текущей задачи нам необходима только недавняя информация, т.е. когда дистанция между актуальной информацией и местом, где она понадобилась, невелика, в этом случае RNN могут обучиться использованию информации из прошлого.

Но бывают случаи, когда необходима более давняя информация. В этом случае разрыв между актуальной информацией и точкой ее применения может быть очень большим. К сожалению, по мере роста этого расстояния, RNN теряют способность связывать информацию.

Для решения задач прогнозирования долговременным зависимостям предназначена особая разновидность архитектуры рекуррентных нейронных сетей – Long short-term memory (LSTM). Нейронные сети такого типа были представлены Зеппом Хохрайтер и Юргеном Шмидхубером в 1997 году, а затем усовершенствованы и популярно изложены в работах многих других исследователей [12-15]. Они прекрасно решают целый ряд разнообразных задач и в настоящее время широко используются.

Любая рекуррентная нейронная сеть имеет форму цепочки повторяющихся модулей нейронной сети. Структура LSTM также напоминает цепочку, но модули выглядят иначе. Вместо одного слоя нейронной сети они содержат целых четыре, и эти слои взаимодействуют особенным образом.

На схеме (рис. 4) каждая линия переносит целый вектор от выхода одного узла к входу другого. Кружочками обозначены поточечные операции, такие, как сложение векторов, а прямоугольники – это обученные слои нейронной сети. Сливающиеся линии означают объединение, а разветвляющиеся стрелки говорят о том, что данные копируются и копии уходят в разные компоненты сети.

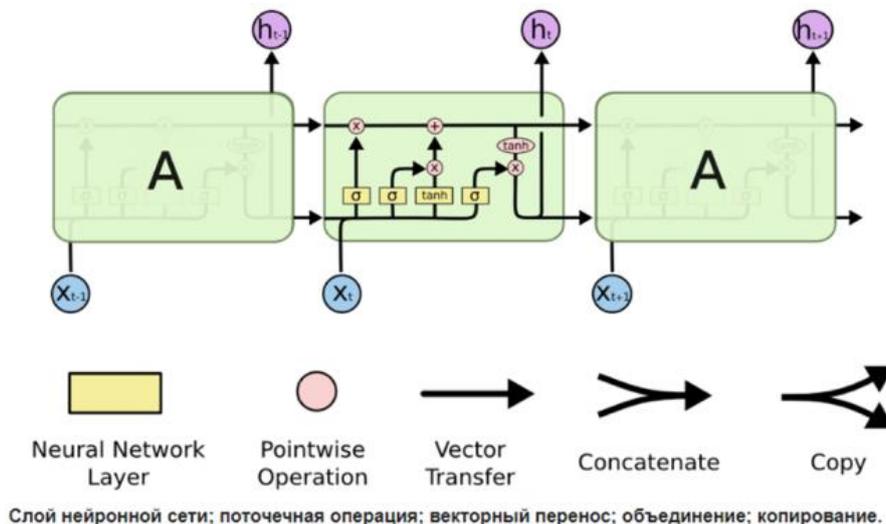


Рисунок 4 – Рекуррентная LSTM сеть

**Основная идея LSTM**

Ключевой компонент LSTM – это состояние ячейки [13-14]. Состояние ячейки участвует в нескольких линейных преобразованиях. LSTM может удалять информацию из состояния ячейки; этот процесс регулируется структурами, называемыми фильтрами.

Фильтры позволяют пропускать информацию на основании некоторых условий. Они состоят из слоя сигмоидальной нейронной сети и операции, например, поточечного умножения (рис. 5).

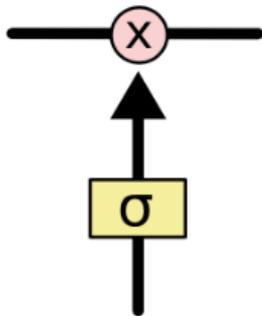


Рисунок 5 – Сигмоидальный слой

Фильтры LSTM-сети: входной, выходной и фильтр забвения.

Фильтр забвения (рис. 6). Управляет на основе нового входного значения и значения поступившего с предыдущей итерации стиранием или сохранением информации состояния ячейки. Сигмоидальный слой возвращает числа от нуля до единицы, которые обозначают, какую долю информации следует пропустить дальше по сети. Ноль в данном случае означает «не пропускать ничего», единица – «пропустить все».

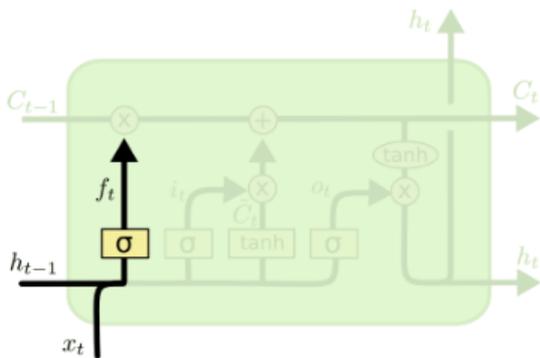


Рисунок 6 – Фильтр забвения

Входной фильтр (рис. 7).

Входной фильтр определяет когда данные нужно записать в ячейку. Сигмоидальный слой, как и ранее, возвращает числа от нуля

до единицы, на основе нового входного значения и значения, поступившего с предыдущей итерации. Теперь сигмоидальный слой обозначает, какая доля информации будет записана, а tanh-слой формирует значения, которые можно добавить в состояние ячейки.

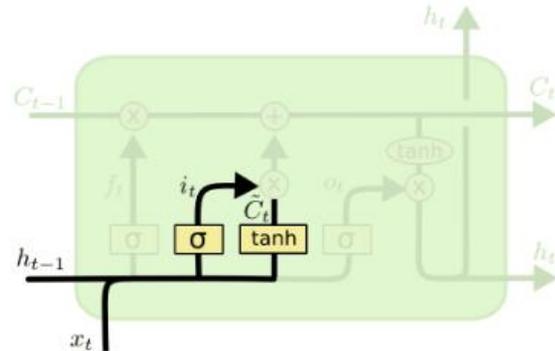


Рисунок 7 – Входной фильтр

В итоге, в состояние ячейки будет записана комбинация нового значения и предыдущего (рис. 8). Когда данные нужно сохранить и в каком объеме, а когда заменить новыми и в каком объеме нейронная сеть «решает сама» в процессе обучения.

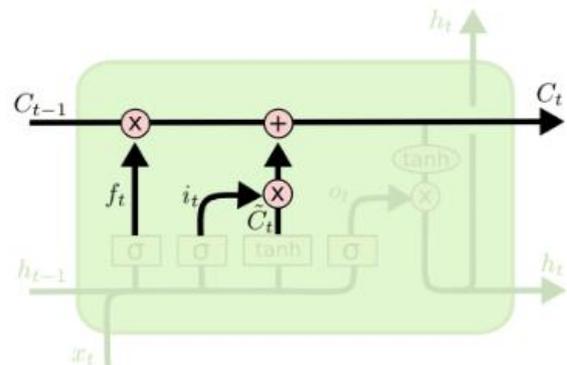


Рисунок 8 – Обновление состояния

Выходной фильтр (рис. 9).

Наконец, нужно решить, какую информацию мы хотим получать на выходе. Выходные данные будут основаны на нашем состоянии ячейки, к ним будут применены некоторые фильтры.

Сначала мы применяем сигмоидальный слой, который решает, какую информацию из состояния ячейки мы будем выводить. Затем значения состояния ячейки проходят через tanh-слой, чтобы получить на выходе значения из диапазона от -1 до 1, и перемножаются с выходными значениями сигмоидального слоя, что позволяет выводить только требуемую информацию.

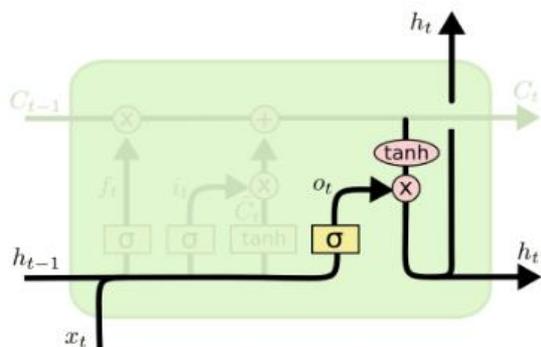


Рисунок 9 – Выходной фильтр

### Разработка нейронной сети с использованием библиотеки Keras в Python

Keras [16] – одна из самых мощных и простых в использовании библиотек Python [17] для разработки и оценки моделей глубокого обучения [9], охватывает эффективные библиотеки численных вычислений Theano и TensorFlow. Преимущество этого состоит

главным образом в том, есть возможность работать с нейронными сетями достаточно простым способом.

Для создания модели сети, в которой слои идут последовательно друг за другом используется функция Sequential(). Добавление LSTM слоев выполняется следующим образом – add(LSTM(units=50, return\_sequences=True, input\_shape=(points\_behind, 5))). Указывается количество нейронов, размер входного набора. Параметр «return\_sequences=True» показывает, что слой возвращает последовательность,

Создание сети выполняется следующим образом – compile(optimizer='adam', loss='mse', metrics=['mae']). Для обучения используется: fit(features\_set, labels, epochs = 100, batch\_size = 32). Для тестирования evaluate(set,lab)

Экспериментальным способом разработана следующая архитектура нейронной сети (рис. 10).

Программный код разработки нейронной сети с использованием библиотеки Keras в Python (рис. 11).

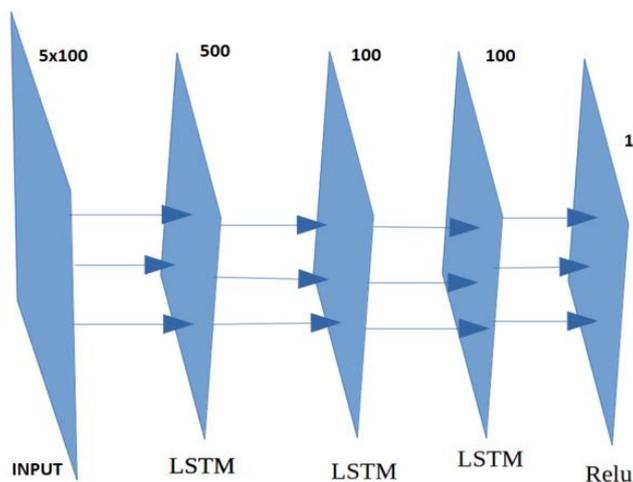


Рисунок 10 – Архитектура нейронной сети

```
model = Sequential()

model.add(LSTM(units=500, return_sequences=True, input_shape=(features_set.shape[1], 5)))
model.add(Dropout(0.2))

model.add(LSTM(units=100, return_sequences=True))
model.add(Dropout(0.2))

model.add(LSTM(units=100))
model.add(Dropout(0.2))

model.add(Dense(units = 1, activation = 'relu'))

model.compile(optimizer = 'rmsprop', loss = 'mean_squared_error', metrics = ['mae'])

model.fit(features_set, labels, epochs = 175, batch_size = 50, validation_split=0.1)
```

Рисунок 11 – Разработка сети с использованием библиотеки Keras в Python

### Экспериментальные исследования

Проведем эксперименты обучения нейронной сети (табл. 1-3).

В качестве оптимизатора традиционным для обучения нейронных сетей считается стохастический оптимизатор градиентного спуска, но в большинстве случаев лучше использовать оптимизационный алгоритм – Adam (адаптивная оценка моментов).

Функция потерь (функция оценки оптимизации) – mean squared error. Метрика (функция, которая используется для оценки модели) – mean absolute error.

Результаты экспериментов показаны на рис. 12-13 и в табл. 1-3.

Таблица 1 – Эксперименты обучения сети на обучающих данных

Epoch	Training set	
	MSE	MAE
75	0.0011	0.0246
100	$7.9841 \cdot 10^{-4}$	0.0215
125	$4.7347 \cdot 10^{-4}$	0.0159
150	$5.4378 \cdot 10^{-4}$	0.0174
175	$4.0838 \cdot 10^{-4}$	0.0153
200	$3.5473 \cdot 10^{-4}$	0.0141
250	$2.5653 \cdot 10^{-4}$	0.0117
275	0.0019	0.0306

Таблица 2 – Эксперименты обучения сети на валидационных данных

Epoch	Validation set	
	MSE	MAE
75	$4.7227 \cdot 10^{-5}$	0.0045
100	$3.7163 \cdot 10^{-5}$	0.0041
125	$1.1961 \cdot 10^{-4}$	0.0099
150	$2.5795 \cdot 10^{-5}$	0.0036
175	$2.1757 \cdot 10^{-5}$	0.0032
200	$2.7671 \cdot 10^{-4}$	0.0162
250	$5.3778 \cdot 10^{-5}$	0.0065
275	$2.2110 \cdot 10^{-4}$	0.0118

Таблица 3 – Эксперименты обучения сети на тестовых данных

Epoch	Test set	
	MSE	MAE
75	$9.9846 \cdot 10^{-5}$	0.0085
100	$3.6993 \cdot 10^{-5}$	0.0041
125	0.0305	0.1746
150	$3.4431 \cdot 10^{-5}$	0.0043
175	$4.7591 \cdot 10^{-5}$	0.0058
200	0.0003	0.0177
250	$4.5864 \cdot 10^{-5}$	0.0061
275	0.0003	0.01646



Рисунок 12 – Результаты прогноза на обучающей и тестовой выборке (Шагов = 150, optimizer = «adam»)



Рисунок 13 – Результаты прогноза на тестовой выборке (Шагов = 150, optimizer = «adam»)

### Выводы

В работе рассмотрено понятие биржи, показано что она выступает арбитром всех сделок. Приведена классификация бирж.

Выполнен анализ методов прогнозирования биржевой торговли. Показано, что машинное обучение и, в частности, искусственные нейронные могут быть инструментом для финансовых аналитиков.

Разработана архитектура LSTM сети для прогнозирования цен акций сети аптек «Збиб». Показана реализация сети с использованием библиотеки Keras в Python.

Проведены эксперименты, ошибка на тестовой выборке составляет  $MSE = 4.7591 \cdot 10^{-5}$ ,  $MAE = 0,0058$ . Такая ошибка говорит о возможности применения модели для прогнозирования биржевой торговли.

### Литература

1. Thomas S. Y. Ho, Sang Bin Lee.: The Oxford Guide to Financial Modeling: Applications for Capital Markets, Corporate Finance, Risk Management and Financial Institutions. Oxford University Press, Inc. 198 Madison Avenue, New York, New York 10016 (2004) г.
2. Iacomin R.: Stock market prediction. In: 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Cheile Gradistei, pp. 200-205. (2015), DOI: 10.1109 / ICSTCC. 2015. 7321293
3. Shai Shalev-Shwartz, Shai Ben-David: Understanding Machine Learning: From Theory

to Algorithms. Cambridge University Press. 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473, USA (2014)

4. Schmidhuber J. Deep Learning in Neural Networks: an Overview // Neural Networks. 2015. Vol. 1.P. 85-117, DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.003

5. Michael A. Nielsen: Neural Networks and Deep Learning, Determination Press. (2015)

6. Котировки на мировых биржах онлайн / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.finam.ru/quotes> (дата обращения 29.03.2019).

7. Peter J. Brockwell, Richard A. Davis: Introduction to Time Series and Forecasting. Second Edition. Springer-Verlag New York, Inc., 175 Fifth Avenue, New York, NY 10010, USA (2002)

8. Васяева Т. А., Хмелевой С. В., Алексеева Е. В. Нейросетевое прогнозирование потребления природного газа. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 31. 37-41 с.

9. Connor J., Martin D. R., Atlas L. E. Recurrent Neural Networks and Robust Time Series Prediction // IEEE Transactions on Neural Networks. 1994. Vol. 5, No. 2. P. 240-254. DOI: 10.1109/72.279188

10. Sergii, K., Yurii, S., Tatyana, V., Natalia, A.: Feature Selection for Time-Series Prediction in Case of Undetermined Estimation. In: Samsonovich A., Klimov V., Rybina G. (eds.) Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists, Advances in

Intelligent Systems and Computing, vol. 449, pp. 85-97. Springer, Cham (2016). DOI: 10.1007 / 978-3-319-32554-5\_12

11. Созыкин А. В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6, № 3. С. 28-59. DOI: 10.14529/cmse170303

12. Manaswi N. K. RNN and LSTM. In: Deep Learning with Applications Using Python. Apress, Berkeley, CA Recurrent Neural Networks (2018)

13. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9, No. 8. P. 1735-1780. DOI: 10.1162 / neco.1997.9.8.1735.

14. Gers F. A., Schmidhuber J., Cummins F.

Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM // Neural Computation. 2000. Vol. 12, No. 10. P. 2451-2471. DOI: 10.1162 / 089976600300015015.

15. P'erez-Ortiz J. A., Gers F. A., Eck D., et al. Kalman Filters Improve LSTM Network Performance in Problems Unsolvable by Traditional Recurrent Nets // Neural Networks. 2003. Vol. 16, No. 2. P. 241-250. DOI: 10.1016/s0893-6080 (02) 00219-8.

16. Keras: The Python Deep Learning library / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://keras.io/> (дата обращения 10.03.2019).

17. Майк МакГрат. Программирование на Python для начинающих. (перевод с английского М. А. Райтмон) Москва. – Эксмо 2015. – 192с.

**Васяева Т. А., Мартыненко Т. В., Суббота Н. С. Прогнозирование финансовых временных рядов с помощью нейронных сетей с использованием библиотеки Keras в Python.** В статье описаны основные способы биржевого анализа, рассмотрено применение глубоких нейронных сетей для прогнозирования цен акций сети аптек «Збиб». Показано получение котировок акций, описан формат полученных данных. Рассмотрено формирование обучающей выборки в задачах машинного обучения. Для разработки и обучения нейронной сети использован язык программирования Python, а также библиотеками pandas; numpy; keras (в качестве основы tensorflow).

**Ключевые слова:** глубокое обучение, нейронные сети, рекуррентные нейронные сети, машинное обучение, временные ряды, фундаментальный анализ, технический анализ, анализ объёмов, котировки, биржа.

**Vasyaeva T., Martynenko T., Subbota N. Financial Time Series Forecasting with Neural Networks using Python's Keras Library.** The main methods of stock prices analysis are described in this article. Deep neural networks forecasting of the stock prices of pharmacies network "36and6" is discussed in this work. The receipt of stock quotes is shown The format of this data is described. The formation of a training set in machine learning tasks is considered. There was developed and trained neural network for exchange trade forecasting with the use of the programming language Python, as well as libraries pandas; numpy; keras (as the basis of tensorflow).

**Keywords:** deep learning, neural networks, recurrent neural networks, machine learning, time series, fundamental analysis, technical analysis, volume analysis, quotes, stock prices.

Статья поступила в редакцию 27.04.2019  
Рекомендована к публикации профессором Миненко А. С.

УДК 004.75

## Пути повышения эффективности устройств сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры

А. А. Койбаш

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

[mr.koibash@gmail.com](mailto:mr.koibash@gmail.com)

### **Аннотация**

*В статье рассмотрены особенности сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры и проанализирована роль датчиков в Интернете вещей. Рассмотрены перспективы развития датчиков и необходимость интеграции разных видов сенсоров в единое мультисенсорное устройство, а также различные варианты использования таких устройств и систем. С целью улучшения эффективности мультисенсорных устройств выявлена необходимость использования постбинарного кодирования.*

### **Введение**

Высокие темпы развития вычислительных систем позволяют внедрять инновационные технологии во все сферы человеческой деятельности: от бытовых потребностей до промышленного производства и научной деятельности. Важную роль в этом играет использование умных устройств, которые характеризуются высокой вычислительной мощностью при относительно малых размерах. На текущий момент для таких устройств необходимо такое взаимодействие, при котором они смогут производить быстрый и точный обмен информацией между собой. Поэтому существующие тенденции и привели к созданию Интернета вещей, в котором такая коммуникация возможна без вмешательства человека.

Для взаимодействия Интернета вещей с реальным миром необходимы такие устройства, которые смогут получать, преобразовывать и передавать необходимую информацию, то есть датчики. Поскольку окружающая среда характеризуется множеством параметров, которые могут иметь комплексное воздействие, часто возникает необходимость учитывать сразу несколько видов получаемых данных. Их совокупность ведёт к формированию более точного результата, что позволит уменьшить погрешности при анализе и прогнозировании влияния окружающей среды на человека. Поэтому сейчас стоит вопрос о высокой степени интеграции датчиков в единую систему. Из-за того, что возможность решения проблемы размеров датчиков, энергопотребления и передачи данных на данный момент зависит от технического прогресса в области инженерии, необходимо искать новые подходы к компьютерингу. Следовательно, актуальной проблемой является анализ и оценка эффективности использования принципов

постбинарного компьютеринга для мультисенсоров.

### **Роль сенсоров в Интернете вещей**

С начала своего развития Интернет проделал интенсивный путь. На сегодняшний день количество устройств, подключенных к сети, превышает количество живущих на Земле людей. В этом контексте сейчас говорят об переходе от Интернета людей к Интернету вещей – совокупности подключенных к единой сети устройств, способных взаимодействовать друг с другом и обмениваться данными при помощи Интернета, а также влиять на окружающую среду. Такое понятие подразумевает исключение человека из части действий, производимыми этой системой.

Интернет вещей может предоставить человечеству огромные возможности в различных областях. Если говорить об экономике, то хорошим примером интеграции цифровых технологий может служить криптовалюта, основанная на принципе распределённой базы данных. В последнее время сосредоточено внимание и на проблеме здравоохранения – различные датчики могут собирать медицинские данные о человеке для улучшения качества жизни. Появляется всё больше встроенных устройств, позволяющих улучшить сбор и анализ информации, уменьшая влияние человеческого фактора.

Важным и актуальным направлением развития Интернета вещей является создание умных городов. Сеть устройств по всему городу позволит осуществлять эффективное управление городскими ресурсами. Такой принцип должен значительно улучшить качество жизни граждан и решить многие экономические, технологические и экологические проблемы, такие как оптимальность транспортной развязки, рациональный расход ресурсов и прочие.

Темпы роста населения в урбанизированных регионах достаточно высоки, поэтому в статье [1] исследователи предлагают переход от умных городов к супергородам – усовершенствованной форме умного города с дополнительными улучшениями и удобствами. Супергород имеет оптимальное планирование и серьёзное внедрение информационных технологий посредством использования

встроенных устройств. Такой переход предполагает большие возможности, удобства и безопасность в сравнении с умным городом.

При этом главными параметрами системы остаются время обработки данных (мс) и пропускная способность системы (Мб/с). Представленная на рис. 1 диаграмма показывает, что время обработки различных наборов данных растёт экспоненциально.



Рисунок 1 – Диаграмма времени обработки наборов данных [1]

### **Анализ возможностей сенсоров**

Из исследования видно, что такая сложная инфраструктура должна получать огромное количество информации, чтобы иметь возможность точного и корректного анализа. Поэтому для её получения и обработки в будущем понадобится множество сенсорных устройств, которые смогут воспринимать большие и объёмные потоки данных, а также детально измерять характеристики окружающей среды и различных объектов.

Таким образом, датчикам отведена значительная роль в Интернете вещей. Применение таких устройств достаточно широко: они могут использоваться как в научных исследованиях и экспериментах, так и в качестве сенсорных систем для устройств, которые могут решать повседневные задачи.

Уже сейчас есть возможность определения множества параметров, начиная с температуры и заканчивая наличием примесей в атмосфере. В дальнейшем будет улучшаться технологическая составляющая устройств, позволяющая принимать новые виды данных, осуществлять более точное представление уже получаемых, а также значительно уменьшить погрешность. Также будет происходить наращивание объёмов сенсорной информации, включая визуальные и аудиальные данные с последующим распознаванием. Всё это приведет к значительному росту количества сенсоров, и

как следствие, большим возможностям Интернета вещей.

### **Перспективы развития сенсоров и мультисенсорные устройства**

Многие системы такой инфраструктуры будут нуждаться в определении и локализации различных проблем. Сенсоры станут «глазами и ушами» Интернета вещей. Поэтому проблема создания устройств с множеством датчиков является для информационно-компьютерной инфраструктуры будущего крайне актуальной.

Такие системы могут обладать целым спектром возможностей. Например, способностью решить одну из самых главных задач современности – проблему с загрязнением окружающей среды. При этом не все влияние загрязнения изучено из-за достаточно малого времени воздействия веществ и излучений на организм. Ситуация усугубляется и тем, что исследования, как правило, ведутся без учета влияния различных видов загрязнений друг на друга. В ряде случаев одни проблемы могут дополнять другие, в иных случаях – серьёзно ухудшать положение вещей, и это может быть совершенно неочевидным. Поэтому создание суперсенсоров является необходимым для дальнейшего развития Интернета вещей. Схема суперсенсора изображена на рис. 2.



Рисунок 2 – Архитектура суперсенсора

Такие устройства будут обладать множеством различных датчиков, из которых будет поступать большое количество данных. Для продолжительной работы необходимо бесперебойное питание. Источником может выступать как обычная электросеть, так и различные аккумуляторы с возможностью пополнения энергии (например, солнечные батареи), что позволит устройству быть энергетически полностью автономным.

Также возникает вопрос о создании суперсенсорной системы, которая сможет воспринимать множество видов информации. Работы Аноприенко А. Я. и Варзара Р. Л. [2-4] посвящены данной тематике и ставили целью

создание суперсенсорного компьютера и системы модулей к нему.

Сейчас развитие Интернета позволяет создать систему взаимосвязанных датчиков, которые могут комплексно оценивать влияние как окружающей среды, так и организма человека в целом. Ответственные за обработку информации узлы системы могут находить взаимосвязь между различными потоками данных, производить оценку с высокой степенью точности [2]. В приведенных работах предлагается представить систему распределенной сети, как показано на рис. 3. При этом такая система будет обладать дешевой и достаточной портативностью.



Рисунок 3 – Архитектура интегрированной клиент-серверной суперсенсорной системы [3]

Исследования по этой теме могут существенно ускорить процесс сбора экологической или медицинской информации и удобного её представления в графическом виде. Например, полученные метеоданные могут использоваться для определения так называемой «ощущаемой» для человека температуры с использованием данных о скорости ветра, влажности воздуха и других параметров [4].

В будущем благодаря развитию вычислительной техники датчики смогут показывать более точные результаты измерений.

Однако помимо увеличения точности уже сейчас прослеживается тенденция создания мультисенсорных устройств, которые будут оснащены сразу множеством датчиков. К ним можно отнести смартфоны, которые оснащены сенсорным экраном, акселерометром и прочими функциями. Такие устройства смогут анализировать сразу несколько источников разной информации, в полном объеме определяя все параметры окружающей среды.

Поскольку датчик осуществляет связь компьютера с реальным миром, он оснащен

аналогово-цифровыми преобразователем (АЦП) и цифро-аналоговыми преобразователем (ЦАП). В работе Аноприенко А. Я., Варзара Р. Л. и Иваницы С. В. приведены расчеты и получен вывод, что развитие АЦП и ЦАП также подчинено определённой системе закономерностей, аналогичной другим известным системам, таким как закон Мура, Джоя, Хогланда и т. д. По результатам сделан вывод, что традиционные пути развития АЦП близки к исчерпанию и перспектива развития лежит в области постбинарного компьютеринга.

На рис. 4 отображен график роста разрядностей АЦП и ЦАП, на рис. 5 – экспоненциальная аппроксимация наблюдаемых тенденций до 2050 года [5].

С развитием Интернета происходит все более тесная интеграция вычислительных ресурсов. Идет формирование единой вычислительной сети, происходит становление ноосферы с присущими ей закономерностями [6-9]. В этой глобальной сети сенсорные системы займут свою, безусловно, важную нишу.

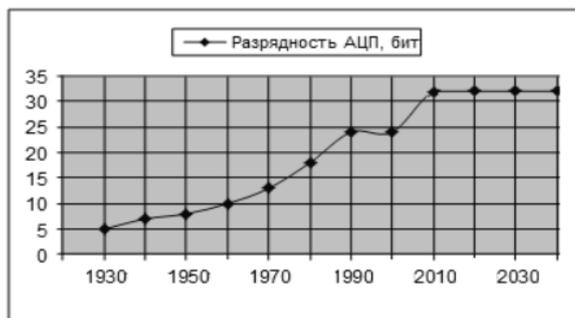


Рисунок 4 – Рост разрядности АЦП и ЦАП в период с 1930 года (с экстраполяцией до 2030 года) [5]

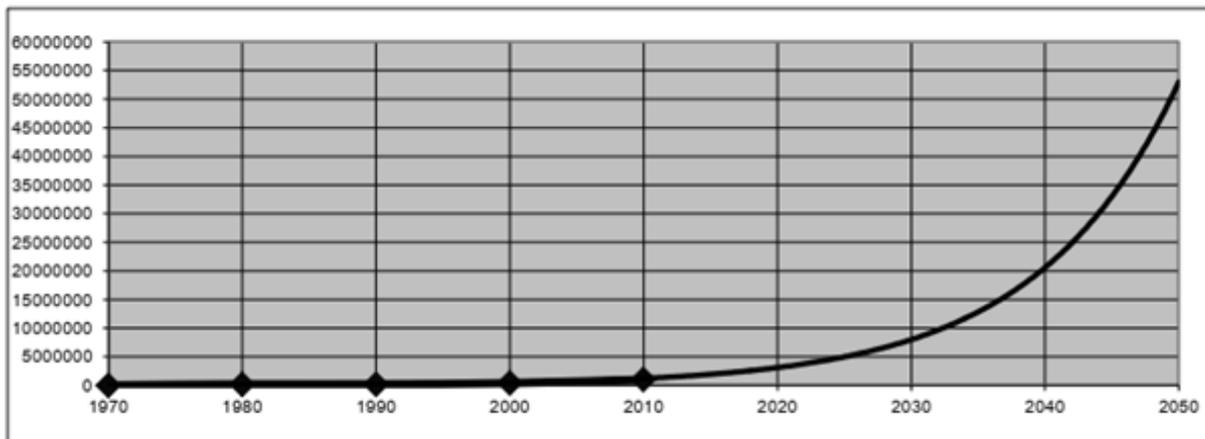


Рисунок 5 – Экстраполяция роста скорости преобразования (частоты дискретизации, кГц) АЦП и ЦАП до 2050 года [5]

### Применение сенсорных систем

Уже сейчас встроенные системы находят применение в различных областях. В статье [10] авторами предложен суперсенсор для 360-градусного восприятия окружающей среды. Такое устройство может быть монтировано на автомобиль и позволит распознавать окружающие объекты: пешеходов, другие автомобили, растения, строения и т. д.

Также разрабатываются носимые сенсоры для мониторинга физиологических параметров человека. В статье [11] авторы предлагают проект сети устройств под названием WE-Safe IoT project. Датчики этой сети помимо получения медицинских данных смогут предоставлять информацию об окружающей среде и её влиянии на здоровье человека. Такие устройства будут

интегрированы в Интернет вещей и позволят рабочим избежать пагубного влияния окружающей среды.

Подобные устройства будут иметь низкое энергопотребление и в целом будут энергонезависимы благодаря солнечным панелям. Передача собранных данных на удалённый сервер осуществляется при помощи технологии LoRa. Предложенная авторами диаграмма отображена на рис. 6.

Применение носимых сенсоров в Интернете вещей достаточно широко. В статье [12] авторами разработано устройство для раннего обнаружения болезни Альцгеймера. Встроенные в обувь датчики отслеживают походку здорового человека. При определённых отклонениях паттернов ходьбы от нормы

системой определяется возможность подверженности человека этой болезни.

Таким образом, область применения датчиков достаточно велика и в будущем сенсоры могут быть встроены повсеместно.

Следовательно, вся система будет генерировать огромный объём данных, на порядки превышающий текущие показатели. Другим важным параметром датчиков является точность получаемой из окружающей среды информации.

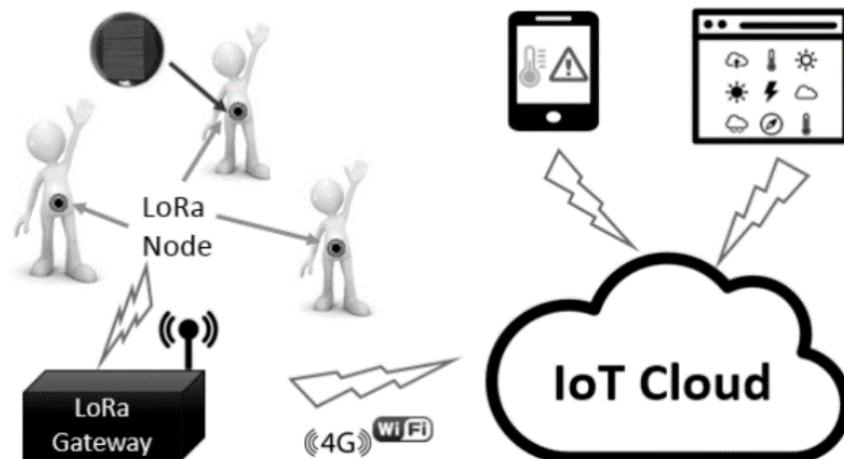


Рисунок 6 – Диаграмма сети носимой сенсорной системы [11]

Для проведения такого анализа целесообразно разделить окружающий мир на 3 категории:

– микромир – мир чрезвычайно малых объектов, таких как атомы и молекулы. Здесь необходимость повышенной точности может быть выражена в физических исследованиях. Крайне важно, чтобы датчик мог зафиксировать вовремя частицу, так как зачастую они обладают малыми размерами и временем жизни;

– макромир – мир сопоставимых с человеком объектов. Точность представления данных играет важную роль: от применения датчиков в быту до безопасности человеческой жизнедеятельности при передвижении или влиянии вредных условий окружающей среды;

– мегамир – мир космических объектов. При таких масштабах нужна не столько точность (так как в сравнении с человеком положения небесных тел определяются достаточно точно), сколько хранение и обработка огромных объёмов данных.

Для формирования результата данные могут взаимно дополнять друг друга. При мультипликативном дополнении требования к точности повышается на порядки. Следовательно, для обработки таких больших объёмов информации и сохранения её точности необходим поиск принципиально новых подходов к вычислениям.

### **Использование постбинарного кодирования для суперсенсоров**

Сейчас развитие техники стоит на пути многопоточности, так как рост тактовой частоты процессоров испытывает определённые

препятствия. В частности, увеличение степени интеграции транзисторов подходит к своему пределу и в дальнейшем будет осложнено квантовыми эффектами. Поэтому создаются параллельные и распределённые системы, вкладываются колоссальные суммы в создание суперкомпьютеров. Однако существуют и другие пути эволюции вычислительной техники.

В книге [13] Аноприенко А. Я. и Иваница С. В. определили закономерности развития компьютеринга и рассматривают переход от обычных вычислений к постбинарному компьютерингу. В мире ведётся множество исследований в области квантовых компьютеров, однако разрабатываются и альтернативные концепции в виде ДНК-компьютеров. Несмотря на то, что такие технологии еще не изобретены, уже сейчас есть возможность реализовать некоторые особенности таких вычислений. Поэтому авторами предложена концепция постбинарного компьютеринга, в определённой степени соответствующая квазиквантовому и квазигенетическому компьютерингу.

В соответствии с этим осуществляется переход от бинарной логики к тетралогике – логике четырёх состояний. Вводится и понятие «тетрит» по аналогии с «битом» двоичной логики. Его состояния кодируются следующим образом:

- логический тождественный ноль выражает ложность;
- неопределённость А выражает ни ложность, ни истинность;
- множественность М выражает одновременно и ложность и истинность;
- логическая тождественная единица выражает истинность [13].

В статье [14] проведено сравнение тетралогии с двоичной логикой. При анализе учитывалась энтропия, скорость передачи данных и длина строки данных. Среди преимуществ тетралогии, полученных путём симуляции на компьютере «QUATLOG», есть следующие:

- значительное сокращение длины блока кода;
- больший объём передаваемых данных по сравнению с двоичной (бинарной) логикой;
- возможность повышения точности при меньшей длине кода;
- реализация тетралогии достаточно осуществима по сравнению с логиками более высокого порядка (пятого, шестого и т. д.) [14].

Таким образом, исследование наглядно демонстрирует преимущества использования тетралогии, особенно в рамках вопроса создания суперсенсорных систем.

С помощью тетралогии возможно создание новой архитектуры компьютеров, и в статье [15] авторы приводят сравнительный анализ логических схем, основанных на двоичной и четвертичной логике. Поскольку большинство электронных систем сейчас спроектированы на основе двоичной логики, количество соединений увеличивают площадь микросхемы. Также растёт и уровень рассеивания энергии. Исследованный авторами блок сложения, спроектированный с использованием современных технологий и основанный на тетралогии, потребляет существенно меньше мощности по сравнению с двоичным аналогом.

Четвертичная логика достаточно хорошо совместима с двоичной. Учитывая возможность передачи гораздо больших объёмов информации, авторы в статье [16] авторы описывают и предлагают схемы, позволяющие осуществить как прямое преобразование двоичного числа в четвертичное, так и обратное. Преимуществом этих схем является то, что они полностью основаны на оптике и используют различные поляризованные состояния света для представления состояния числа.

Таким образом, для повышения точности датчиков, оптимизации энергопотребления и улучшения передающей способности необходимо использовать принципы постбинарного компьютеринга в проектировании сенсоров.

## **Выводы**

Развитие Интернета вещей набирает темпы, и в скором времени нас будет окружать множество встроенных систем. Однако такая инфраструктура не может существовать без сенсорной составляющей, которая позволит получать и преобразовывать информацию

для остальных устройств Интернета вещей. Поэтому возникает вопрос об оснащении окружающей среды датчиками, что позволит рационализировать расход ресурсов, уменьшить влияние на экологию, обезопасить человека и значительно улучшить качество его жизни.

В окружающем мире много видов информации и часто эти источники нельзя рассматривать отдельно друг от друга, поскольку они воздействуют комплексно. Поэтому в ряде случаев информация, собранная с различных датчиков, должна дополнять друг друга. Следовательно, возникает необходимость создания суперсенсоров, как системы сложной интеграции множества датчиков, способной к восприятию разных видов данных.

Для улучшения возможностей суперсенсоров можно использовать постбинарный компьютеринг, основанный на тетралогии. Использование такого подхода позволит суперсенсорам значительно уменьшить размер микросхемы, что даст возможность более обширной интеграции разных датчиков в единую систему при меньшем энергопотреблении. Принципы постбинарного кодирования позволят улучшить точность, а также повысить скорость и объёмы передачи данных суперсенсорами.

## **Литература**

1. Rathore M. M., Anand P., Awais A., Gwanggil J. IoT-Based Big Data: From Smart City towards Next Generation Super City Planning. *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)*, 13 (1), 2017, pp. 28-47.
2. Варзар Р. Л., Аноприенко А. Я. Аппаратная архитектура сенсорного модуля суперсенсорного компьютера и его параметры. В кн.: Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС КМ – 2013): сборник материалов IV Всеукраинской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – С. 720-728.
3. Варзар Р. Л., Аноприенко А. Я. Суперсенсорный компьютер для измерения и анализа параметров окружающей среды. В кн.: Информатика и компьютерные технологии – 2012: сборник трудов VIII международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, том 2, Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – С. 156-161.
4. Аноприенко А. Я., Варзар Р. Л. Разработка прототипа суперсенсорного компьютера: особенности реализации и визуализации результатов измерений // *Материалы пятой международной научно-технической конференции «Моделирование и компьютерная графика»*, 24-27 сентября 2013 г., Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – С. 218-229.

5. Аноприенко А. Я., Варзар Р. Л., Иваница С. В. Закономерности развития аналого-цифровых преобразователей и перспективы использования постбинарного кодирования // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: «Информатика, кибернетика и вычислительная техника» (ИКВТ-2014). – 2014. – № 1 (19). – С. 5-10.

6. Аноприенко А. Я. Нооритмы и время в информационную эпоху // «Время в зеркале науки». Специальный выпуск сборника научных трудов «Гуманитарные студии». Часть 1. – К.: Центр учебной литературы, 2010. С. 291-305.

7. Аноприенко А. Я. Нооритмы: комплексная эмпирическая модель ноосферной динамики // Международный междисциплинарный симпозиум «Нанотехнология и ноосферология в контексте системного кризиса цивилизации». Сборник тезисов докладов. Симферополь – Ялта, 4-10 января, 2011 г. С. 30-32.

8. Аноприенко А. Я. Нооритмы: модели синхронизации человека и космоса. – Донецк: УНИТЕХ, 2007. – 372 с.

9. Аноприенко А. Я. Цивилизация, ноосфера и нооритмы // «Ноосфера и цивилизация». Научный журнал. Выпуск 7 (10) – Донецк, 2009, с. 62-69.

10. Varga R., Costea A., Florea H., Giosan I., Nedevschi S. Super-sensor for 360-degree Environment Perception: Point Cloud Segmentation Using Image Features. IEEE 20th International

Conference on Intelligent Transportation Systems, Yokohama (2017), pp. 1-8.

11. Wu F., Redouté J., Yuce M. R. WE-Safe: A Self-Powered Wearable IoT Sensor Network for Safety Applications Based on LoRa. IEEEAccess, 2018, Vol. 6, pp. 40847-40853, Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8419707> (accessed 25 February 2019).

12. Varatharajan R., Manogaran G., Priyan M. K., Sundarasekar R. Wearable sensor devices for early detection of Alzheimer disease using dynamic time warping algorithm. Cluster Computing, 2017, Vol. 21, Issue 2, pp. 681-690.

13. Аноприенко А. Я., Иваница С. В. Введение в постбинарный компьютеринг. Арифметикологические основы и программно-аппаратная реализация - Донецк: ДонНТУ, УНИТЕХ, 2017. - 308 с.

14. Gupte A. N., Goel A. K.. Study of quaternary logic versus binary logic, [1991] Proceedings. First Great Lakes Symposium on VLSI, Kalamazoo, MI, USA, 1991, pp. 336-337.

15. Dawley S. S., Gajbhiye P. A.. Design and comparative analysis of binary and quaternary logic circuits. 2016 World Conference on Futuristic Trends in Research and Innovation for Social Welfare (Startup Conclave), Coimbatore, 2016, pp. 1-6.

16. Chattopadhyay T., Roy J. N. All-optical conversion scheme: Binary to quaternary and quaternary to binary number. Optics & Laser Technology, 2009, Vol. 41, Issue 3, pp. 289-294.

**Койбаш А. А. Пути повышения эффективности устройств сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры.** В статье рассмотрены особенности сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры и проанализирована роль датчиков в Интернете вещей. Рассмотрены перспективы развития датчиков и необходимость интеграции разных видов сенсоров в единое мультисенсорное устройство, а также различные варианты использования таких устройств и систем. С целью улучшения эффективности мультисенсорных устройств выявлена необходимость использования постбинарного кодирования.

**Ключевые слова:** Интернет вещей, сенсорная система, датчик, суперсенсор, постбинарный компьютеринг, тетралогика.

**Koibash A. Ways to improve the efficiency of devices of sensory component of information and computer infrastructure.** This paper discusses the features of the sensory component of the information and computer infrastructure and analyzes the role of sensors in the Internet of Things. Prospects are considered for the development of sensors and the need to integrate different types of sensors into a single multisensory device, as well as various uses of such devices and systems. The need to use post-binary coding has been revealed in order to improve the efficiency of multisensor devices.

**Keywords:** Internet of Things, sensor system, sensor, supersensor, post-binary computing, quaternary logic.

Статья поступила в редакцию 21.05.2019

Рекомендована к публикации профессором Миненко А. С.

## Современные архитектуры и модели автономных наземных подвижных объектов

Т. В. Завадская

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
[tatyana.zavadskaja@gmail.com](mailto:tatyana.zavadskaja@gmail.com)

### Аннотация

*В статье дана классификация автономных подвижных объектов и выполнен обзор их современных типов и возможностей. Исследованы модели наземных объектов и способы управления ими. Проанализирована структура автономного наземного подвижного объекта и описано назначение его отдельных модулей. Разработана общая архитектура системы с несколькими автономными наземными подвижными объектами. Рассмотрены средства для реализации подобных систем. Намечены задачи их дальнейшего развития и применения.*

### Введение

Развитие технологий предоставило возможность для создания беспилотных автомобилей, судов и поездов или с минимальным участием человека. Управление такими объектами возможно с помощью беспроводных компьютерных сетевых технологий посредством бортового вычислительного комплекса. Беспилотные системы состоят из устройств или машин, будь то на суше, в воздухе или на море, которые оснащены необходимыми блоками обработки данных и телеметрии, датчиками и блоками автоматического управления, которые позволяют выполнять миссии без вмешательства человека.

Управление автономным транспортным средством полностью автоматизировано и осуществляется без водителя при помощи оптических датчиков, радиолокации и компьютерных алгоритмов.

Транспортные средства, доступные для потребителей в настоящее время, содержат функции вождения, такие как парковочный автопилот или круиз-контроль. Эти особенности рассматриваются как базовый уровень автономии. К стандартным функциям добавляется способность предупреждать водителей об опасности, контроль тормозов, рулевого управления и т. д. Эти системы часто используются как для тактических, так и для гражданских целей, когда присутствие оператора-человека неудобно, опасно или невозможно [1].

При разработке подобных устройств широко используются симуляторы, позволяющие моделировать поведение транспортного средства в условиях изменяющейся обстановки [2].

Целью данной работы является обзор современных типов автономных подвижных объектов, анализ структуры автономного

подвижного объекта и разработка общей архитектуры системы с несколькими подвижными объектами.

### Классификация современных автономных подвижных объектов

Автономные беспилотные объекты используются во многих сферах жизни современного человека и с каждым годом их распространение и количество решаемых задач увеличивается. Они могут использоваться для разведывательных работ, мониторинга зданий и инфраструктуры, наблюдения за границами, поисково-спасательных операций и транспортировки товаров, а также для обезвреживания взрывоопасных предметов и разминирования.

Автономные подвижные объекты можно классифицировать следующим образом.

*Наземные* – объекты, предназначенные для передвижения по поверхности земли. Данный класс используется, как в учебном процессе студентами для познания азов, так и в специализированном направлении, строительных работ, военных роботов саперов.

*Наводные* – объекты, предназначенные для передвижения на воде. Данный класс используется как в военной отрасли, для доставки оружия, так и в гражданской области, для научных исследований.

*Подводные* – объекты, предназначенные для передвижения под водой. Данный класс используется как в военной отрасли, для задач разведки и обнаружения, так и в гражданской области, для обследования кабелей, проложенных по дну водоемов.

*Воздушные* – объекты, предназначенные для передвижения по воздуху. Данный класс используется как в военной отрасли – самолеты-разведчики, так и в повседневном использовании – доставка товаров с помощью

беспилотных мультироторных (квадро-, гексакоптеры) систем.

*Космические* – объекты, предназначенные для сбора и анализа образцов поверхности, атмосферы, фото, видеосъемки в космосе с отправкой результатов на землю.

Для учебных целей наиболее популярным классом является класс наземных автономных подвижных объектов, так как включает в себя множество различных по назначению автономных подвижных объектов, которые являются относительно других простыми и безопасными. Этот класс позволяет изучить основы создания автономных подвижных объектов и программирования контроллеров, а в случае отказа каких-либо блоков они не представляют особой опасности как с точки зрения возможности аварии с окружающими объектами, так и с точки зрения потери самого наземного автономного подвижного объекта.

За последнее время большими темпами развивается техническая база и появляются все более компактные компоненты с высокой энергоэффективностью. А так как для реализации наземных автономных подвижных объектов необходимы цифровые элементы, контроллеры, датчики и т.п., то, следовательно, класс наземных автономных подвижных объектов развивается тоже.

В зависимости от среды перемещения распространенность современных автономных подвижных объектов можно продемонстрировать диаграммой, показанной на рис. 1.

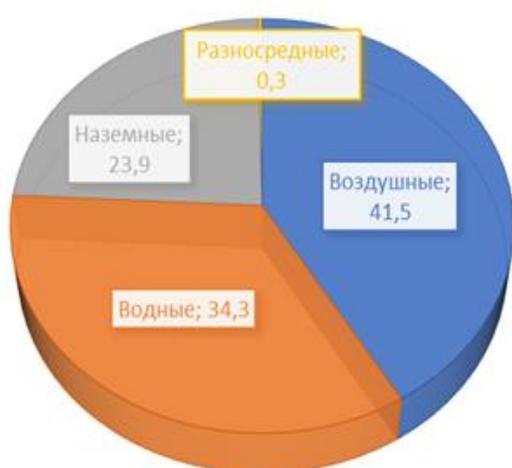


Рисунок 1 – Распределение автономных объектов по видам среды перемещения

Наиболее массовыми представителями автономных подвижных объектов являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). БПЛА представляет собой самолет без пилота-человека на борту. Полет БПЛА может осуществляться с различной степенью

автономности: либо под дистанционным управлением оператора-человека, либо автономно с помощью бортового вычислительного комплекса [3]. По сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами, БПЛА первоначально использовались для задач, которые являются опасными для человека. Однако их применение достаточно быстро перешло от военных целей в коммерческие, научные, развлекательные, сельскохозяйственные и другие сферы применения, такие как полицейская деятельность, наблюдение, поставки продукции, аэрофотосъемка, сельское хозяйство. Во многих случаях БПЛА являются единственным и безальтернативным средством для сохранения жизни и здоровья человека.

Другим направлением применения автономных подвижных объектов является водная среда. Системы беспилотных морских транспортных средств используются для широкого спектра военных и коммерческих применений. Для коммерческого использования беспилотники имеют функции разведки для поиска месторождения нефти и газа, сбор океанографических данных, гидрографические, океанографические и экологические исследования [4]. Основными задачами автономных подвижных объектов являются:

- перемещение и корректировка своего позиционирования в пространстве на основе некоторого набора входных данных;
- способность манипуляции с окружающими объектами, то есть сбор, отправка или анализ данных;
- автономная работа с возможностью перехвата управления вручную.

Для решения этих задач автономный подвижный объект должен иметь структуру, которая представлена на рис. 2.

Автономный подвижный объект работает в режиме автономного управления, где вмешательство оператора необходимо только для того, чтобы был передан пункт назначения. В контексте навигации это означает, что изначально был задан маршрут, но в дальнейшем управление автономными подвижными объектами должно осуществляться автономными системами на месте без вмешательства человека.

В данной настройке соответствующие входные параметры для процесса автономной навигации в основном представляются модулем определения состояния автономного подвижного объекта, что обеспечивает автономной навигационной системе восприятие от внешних факторов, включая условия окружающей среды в модуле планирования перехода в зависимости от метеорологических условий, а также данные для обнаруженных объектов в модуле предотвращения столкновений.

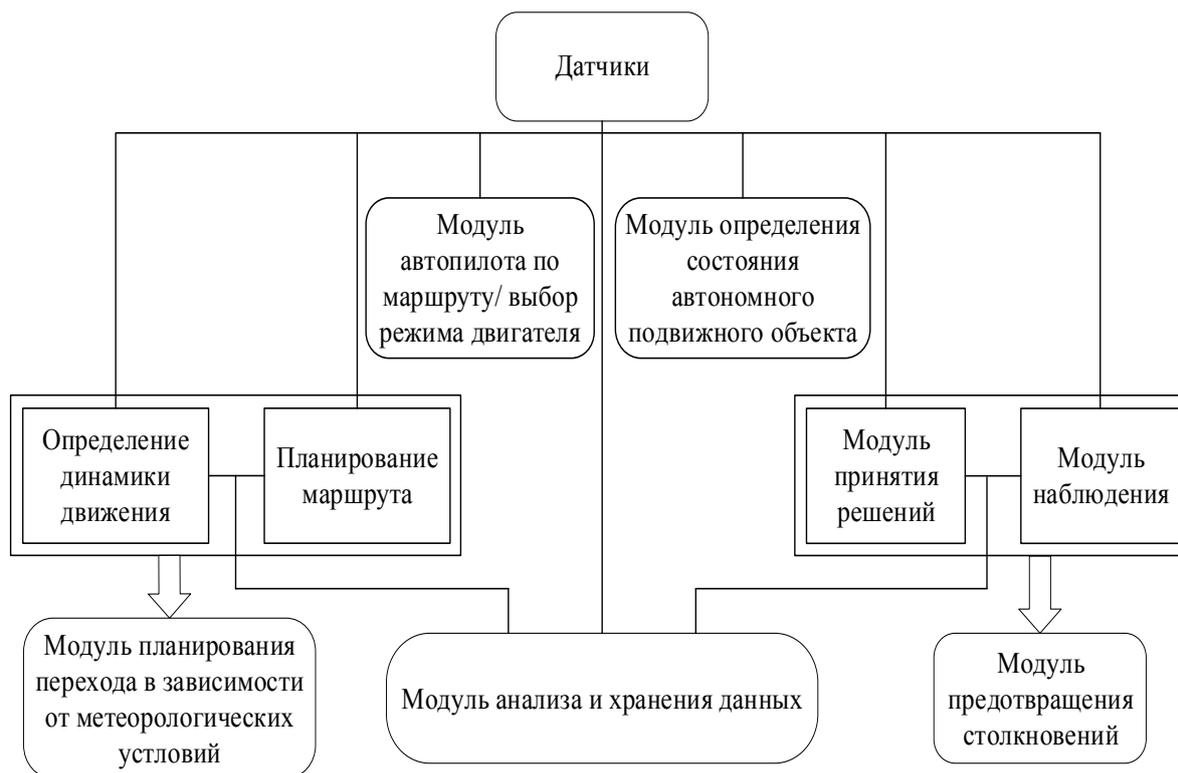


Рисунок 2 – Структура автономного подвижного объекта

Для этого используется метод, основанный на использовании датчиков, где в модуле анализа и хранения собираются данные с существующих навигационных датчиков, извлекается информация, а затем все это сопоставляется между собой в модуле определения состояния автономного подвижного объекта для надежной модели окружающей среды объекта и поступает команда в модуль автопилота и выбора режима двигателя.

### **Разработка архитектуры системы с наземными подвижными объектами**

Беспилотные наземные транспортные средства используются для мониторинга и защиты окружающей среды, спасательных операций в опасных средах, для выполнения задач, в которых необходимо снизить влияние человеческого фактора. Беспилотные наземные аппараты обычно используются для разведывательных работ, мониторинга зданий и инфраструктуры, наблюдения за границами, поисково-спасательных операций и транспортировки товаров, а также для обезвреживания взрывоопасных предметов и разминирования.

На рис. 3 изображена архитектура системы с несколькими наземными автономными подвижными объектами, в которой

учитываются только части взаимодействий между модулями.

Исследованием и разработкой наземных беспилотных комплексов на сегодняшний день заняты более 900 научно-исследовательских организаций. Самые интенсивные исследования происходят в следующих странах: Россия, США, Великобритания, Германия, Франция, Израиль, Китай, Япония и Южная Корея [5].

В настоящее время, исследования в отслеживании беспилотного наземного объекта широко привлекает внимание как в ученых и промышленности из-за их важной роли. Например, применение в опасной среде, где небезопасно для человека. Изучение подвижной техники является широкой областью в научных исследованиях, в таких как транспорт, спасение, промышленность и других областях. Как и во многих других механических системах, комплексы автономных объектов часто требует присвоения назначения или формирования рисунка движения [6]. Для формирования рисунка движения объекта предусматривается ряд шаблонов формирования маневренных точек, что позволяет использовать относительную динамику для управления.

Самоуправляемый градиент  $EG$  является необходимой величиной для характеристики поведения движущегося транспортного средства. Его значение остается постоянным во время исследований движения объекта.

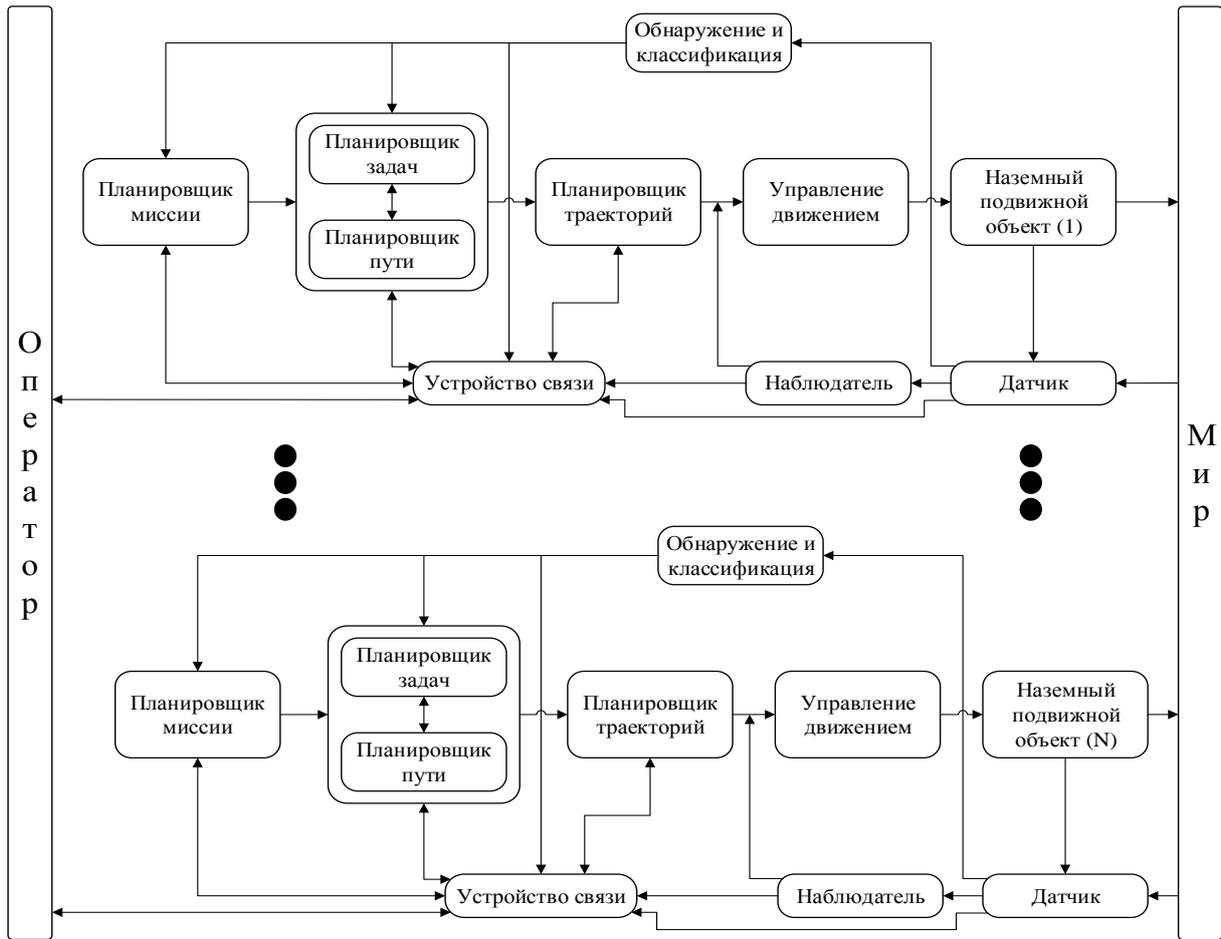


Рисунок 3 – Архитектура системы с несколькими автономными подвижными объектами

Это зависит от массы  $m$ , колесной базы  $l$ , расстояния между передним колесом и центром тяжести  $l_v$ , расстояние между задним колесом и центром тяжести  $l_h$  и жесткости на поворотах  $c_{x,h}$  и  $c_{x,v}$ . Его значение можно определить по следующей формуле:

$$EG = \frac{m}{1} \cdot \left( \frac{l_h \cdot c_{x,h} - l_v \cdot c_{x,v}}{c_{x,v} \cdot c_{x,v}} \right).$$

Когда значение  $EG$  ниже или выше нуля, поведение транспортного средства называться избыточной управляемостью или недостаточной управляемостью, соответственно.

Для заданного пути радиусы поворотов известны в каждой точке. Чтобы следовать этому пути, необходим угол поворота рулевого колеса, который можно определить по следующей формуле:

$$\delta = \frac{1}{p} (1 + EG \cdot v^2),$$

где  $v$  – скорость центра тяжести.

В противном случае, если задан угол поворота, можно определить радиус поворота следующим образом:

$$p = \frac{1 + EG \cdot v^2}{\delta}.$$

Уравнение движения дано в форме пространства состояний:

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A} \cdot \underline{x} + \underline{b} \cdot u,$$

где  $\underline{A}$  – это матрица системы:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

и  $a_{11}, a_{12}, a_{21}$ , а также  $a_{22}$  даны как:

$$a_{11} = -\frac{1}{v} \cdot \frac{c_{x,v} \cdot l_v^2 + c_{x,h} \cdot l_h^2}{0};$$

$$a_{12} = -\frac{c_{x,v} \cdot l_v - c_{x,h} \cdot l_h}{0};$$

$$a_{21} = -1 - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{c_{x,v} \cdot l_v - c_{x,h} \cdot l_h}{m};$$

$$a_{22} = -\frac{1}{v} \cdot \frac{c_{x,v} + c_{x,h}}{m}.$$

Причем  $0$  – момент инерции, а вектор состояния имеет вид:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\psi}_v \\ \beta \\ \psi_v \end{bmatrix},$$

точка обозначает дифференцирование по времени,

$\underline{b}$  – контрольный вектор, вычисляемый как:

$$\underline{b} = \begin{bmatrix} c_{x,v} \cdot l_v \\ 0 \\ \frac{1}{v} \cdot \frac{c_{x,v}}{m} \\ 0 \end{bmatrix};$$

вход системы – угол поворота рулевого колеса, т. е.  $u = \delta$  [6].

### Реализация модели наземного подвижного объекта

Одним из направлений является применение монокристаллических микрокомпьютеров. Яркими представителями этого направления являются платы Raspberry Pi и Arduino, которые применимы для разных задач.

Raspberry Pi – это универсальный одноплатный компьютер со своей операционной системой, который может программироваться на разных языках программирования, к примеру, на Java, Python и др. Этот компьютер в основном предназначен для описания сложных алгоритмов, но также на нем можно послушать музыку, посмотреть видео и подключать различные периферийные устройства.

Arduino – это одноплатный компьютер, который способен обрабатывать одну задачу. Главное преимущество этого компьютера заключается в простоте, так как для работы с ним необходимо изучить только программную оболочку. Также к достоинству можно отнести энергопотребление платы, которое на порядок меньше, чем у Raspberry Pi.

Из описания плат можно сделать вывод, что применение каждой из них зависит от поставленной задачи, но иногда возможно использовать их в паре.

Для вычисления траектории движения объекта необходимо использовать системы,

на которых возможно рассчитать маршрут, используя специальные алгоритмы его построения [8-10]. Для построения более точной линии движения и поворотов необходимы и более мощные процессоры, причем зависимость – прямо пропорциональная, т. е. более мощный процессор способен построить более точный маршрут. К примеру, процессор Intel Core i9 из семейства процессоров Intel с архитектурой X86-64 с частотой ЦП 2.4-5 GHz и 8-18 ядрами способен вычислить движение на порядок точнее, чем процессоры предыдущих поколений.

### Выводы

Подвижные наземные комплексы способны выполнять множество недоступных для других видов техники и людей задач, облегчать повседневную работу человеку. Однако человек все также остаётся неотъемлемым компонентом наземного подвижного объекта, но его влияние на поведение системы в целом существенно снижается.

Задачи автономного движения в условиях агрессивной среды и в условиях чрезвычайных ситуаций, таких как инспекция и обследование аварийных зон с целью визуального и радиационно-химического контроля, определение местоположения объектов и состояния технологического оборудования в зоне аварии, выявление мест и характера повреждений аварийного оборудования, проведение инженерных работ по расчистке завалов и разборке аварийных конструкций, сбор и транспортировка опасных объектов в район их утилизации – требуют от разработчика выполнения специальных требований по надежности и прочности [1].

### Литература

1. Колесников Д. С. Автономные роботизированные транспортные средства наземного применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aftershock.news/?q=node/377800&full>
2. Мальчева Р. В. Разработка симуляторов транспортных средств с использованием операционной системы Android / Р. В. Мальчева, С. В. Кривошеев, Т. В. Завадская // Информатика и кибернетика, 2015. - № 2. - С. 76-81.
3. Фиговский О. Беспилотные транспортные средства: развитие технологий и место в мировом сообществе [Электронный ресурс] / О. Фиговский, В. Гумаров // Наука и техника, 2018. - № 5 (338). - Режим доступа: <http://www.relga.ru/Environ/WebObjects/tgu-www.woa/wa/Main?textid=5393&level1=main&level2=articles>

4. Буренок В. М. Военно-экономические и инновационные аспекты интеграции нетрадиционных видов оружия в состав системы вооружения / В. М. Буренок, А. В. Леонов, А. Ю. Пронин. - М.: Издательская группа «Граница», 2014. – 238 с..

5. Каляев И. А. Боевым роботам нужна программа / И. А. Каляев, И. В. Рубцов // Национальная оборона, 2012. - С. 34–48.

6. Рубцов И. В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2013. - № 3 (140). – С.14-21.

7. Крей Д. Дж. Введение в робототехнику. Механика и управление. - М.: Институт компьютерных исследований, 2013. – 564 с.

8. Кравченко М. К. Реализация алгоритма поиска пути для транспортного средства /

М. К. Кравченко, С. В. Кривошеев, Р. В. Мальчева // Современные тенденции развития и перспективы внедрения технологий в машиностроении, образовании и экономике, 2018. – Т. 4. - № 1(3). - С. 105-110.

9. Койбаш А. А. Модификация алгоритма A\* для прогнозирования траектории движения подвижного объекта в распределенных вычислительных системах / А. А. Койбаш, Т. В. Завадская, С. В. Кривошеев // Проблемы искусственного интеллекта, 2018. - № 3 (10). - С. 65-73.

10. Кривошеев С. В. Пути снижения времени прогнозирования траектории движения подвижного объекта распределенного симулятора тяжелой инженерной техники / С. В. Кривошеев, А. А. Койбаш // Современные тенденции развития и перспективы внедрения технологий в машиностроении, образовании и экономике, 2017. – Т. 3. - № 1 (2). - С. 51-54.

***Завадская Т. В. Современные архитектуры и модели автономных наземных подвижных объектов.*** В статье дана классификация автономных подвижных объектов и выполнен обзор их современных типов и возможностей. Исследованы модели наземных объектов и способы управления ими. Проанализирована структура автономного наземного подвижного объекта и описано назначение его отдельных модулей. Разработана общая архитектура системы с несколькими автономными наземными подвижными объектами. Рассмотрены средства для реализации подобных систем. Намечены задачи их дальнейшего развития и применения.

***Ключевые слова:*** автономный подвижной объект, модуль, архитектура, компьютерная реализация.

***Zavadskaya T. Modern architectures and types of autonomous ground mobile objects.*** The article gives a classification of Autonomous mobile objects and provides an overview of their modern types and capabilities. Models of ground objects and methods of their management are investigated. The structure of an Autonomous ground mobile object is analyzed and the purpose of its individual modules is described. The General architecture of the system with several Autonomous ground mobile objects is developed. Means for realization of similar systems are considered. The tasks of their further development and application are outlined.

***Keywords:*** autonomous mobile object, modul, architecture, computer realization.

Поступила в редколлегию 02.06.2019.  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Статистический анализ современных методов распознавания лиц и эмоций

Т. В. Ванжа

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

[vanzha\\_tv7@mail.ru](mailto:vanzha_tv7@mail.ru)

### **Аннотация**

*Рассмотрены разнообразные методы распознавания лиц и эмоций, описан принцип работы, их особенности, недостатки и эффективность. Затронута проблема автоматизации и формализации процесса распознавания лиц и эмоций. Дан один из вариантов её решения. Наиболее эффективным методом оказался метод распознавания лиц и мимики с помощью сверточных нейронных сетей. Точность распознавания данного метода составила 97,4 %. Для большинства современных систем автоматического распознавания лиц и эмоций основной задачей является задача сравнения данного изображения лица с набором изображений лиц из базы данных. Характеристики систем автоматического распознавания лиц в этом случае, оцениваются путем определения вероятностей ошибочного отказа в распознавании и ошибочного распознавания. Перспективным может являться создание гибридных методов, использующих преимущества и нивелирующие недостатки рассмотренных выше различных современных методов распознавания лиц и эмоций.*

### **Введение**

Распознавание лиц является одним из практических применений теории распознавания образов, задача которого включает автоматическую локализацию лица на изображении и идентификацию человека по его лицу, если это требуется. Системы распознавания лиц актуальны в наше время.

Значительный интерес вызывают процедуры, которые лежат в основе процесса локализации и распознавания лиц и эмоций в связи с разнообразием их практического применения в следующих областях: криминалистическая экспертиза, охранные системы, телеконференции, верификация и другие. Технология идентификации личности на основе изображения лица, в отличие от использования других биометрических показателей, не требует физического контакта с устройством. Учитывая стремительное развитие цифровой техники, эта технология является наиболее приемлемой для массового применения. Основной трудностью есть зависимость качества результата распознавания человека по изображению лица от положения, условий освещенности ракурса и т. д.

Существует большое количество методов и алгоритмов для распознавания лиц и эмоций, в которых особые усилия направлены на автоматическое выделение элементов лица (глаза, нос, рот, подбородок и др.). Именно эти характеристики служат для решения задачи идентификации.

Актуальной проблемой в этом случае есть анализ современных существующих и перспективных методов и алгоритмов для распознавания лиц и эмоций.

### **Системы компьютерного зрения и распознавание лиц**

Проблема автоматизации и формализации процесса распознавания лиц и эмоций была затронута на ранних этапах развития систем идентификации образов и остается актуальной и сейчас. На самых ранних этапах компьютерного зрения рассматривалась проблема распознавания лиц. В разрабатываемых алгоритмах идентификации особые усилия были направлены на автоматическое выделение элементов лица (глаза, нос, рот, подбородок и др.). Именно эти характеристики служат для решения задачи распознавания.

На рис. 1 представлена общая структура процесса распознавания лиц [1].

В наше время есть довольно много готовых программных продуктов, которые в той или иной степени решают задачу обнаружения и распознавания эмоций на лице человека. Технологии компьютерного зрения интегрированы в повседневную жизнь, как и другие технологии интеллектуальных информационных систем таких как: распознавание речи, автоматизированный анализ большого количества данных, системы идентификации биометрических данных и другие.

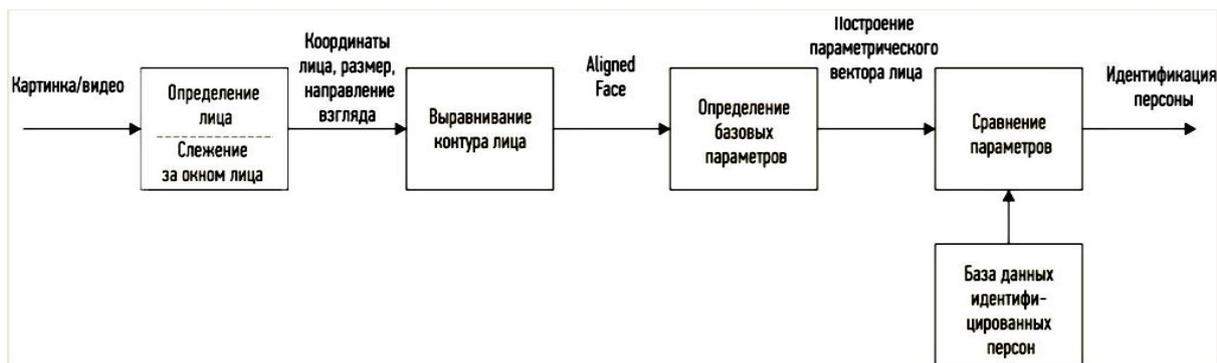


Рисунок 1 – Общий процесс обработки изображения лица при идентификации

Так, камеры современных смартфонов обучены не только распознаванию лиц во время съёмки и фокусированию на обнаруженном лице объектива камеры, но и могут фиксировать жесты рук и воспринимать человеческую речь, чтобы сделать снимок.

Например, технология Face ID от Apple 2017 года, сканирующая с помощью фронтальной камеры лицо человека для разблокировки экрана.

Распознавание эмоций занимает значительное место в компьютерном зрении. В настоящее время разработано огромное количество самых разных методов распознавания эмоций. У всех этих методов есть ряд общих проблем:

- ориентированность на фронтальные изображения;
- особенности окклюзии (наличие очков, бороды, усов или шляпы вводят в заблуждение алгоритмы распознавания, либо вообще не позволяют распознать лицо);
- условия съёмки (качество съёмки камеры, качество освещения).

Разработанная в 1978 году Уоллесом Фризенем и Полом Экманом, система кодирования лицевых движений (СКЛиД) стала одной из первых успешных попыток для систематизирования лицевых эмоций. При помощи этой системы есть возможность закодировать выражение лица. Создается модель из определенных этапов и фиксированного промежутка времени для воспроизведения разных выражений лица. Система кодирования имеет фиксированные номера дескрипторов, имеющие существенную разницу с единицами действия [2].

Хоть и система кодирования лицевых движений требует хорошо обученных экспертов, есть положительный опыт интегрирования СКЛиД в программное обеспечение. Система кодирования лицевых движений не получила широкого применения в технологиях компьютерного зрения. Ниже рассмотрены методы, позволяющие добиться более высокой эффективности распознавания эмоций.

### Активные модели внешнего вида

Активные модели внешнего вида (АМВ) – модели изображений, которые могут быть подогнаны под настоящее изображение, путем разных деформаций. Этот вид моделей в двумерном варианте предложили Тим Кутс и Крис Тейлор в 1998 году. В первое время активные модели внешнего вида использовались для анализа и оценки параметров изображений лиц и эмоций.

Эта модель состоит из двух типов параметров, а именно: параметров, которые связаны с формой (параметры формы), и параметров, которые связаны со статистической моделью пикселей изображения или текстурой (параметры внешнего вида).

До использования модель нужно обучить на множестве ранее размеченных изображений, разметка которых выполняется вручную. Любая из меток имеет номер и показывает характерную точку, которую находит модель при адаптации к новому изображению [3, 4].

С нормализации форм на размеченных изображениях начинается процедура обучения данной модели для компенсации различий в наклоне, масштабе и смещении. Здесь применяется обобщенный Прокрустов анализ, затем выделяются главные компоненты.

После этого из пикселей внутри треугольников, которые образуются точками формы, формируется матрица. Каждый столбец, этой матрицы содержит значения пикселей соответствующей текстуры.

При использовании многоканальных текстур, векторы пикселей формируются отдельно по каждому из каналов, выполняется их конкатенация. После нахождения главных компонент матрицы текстур модель активных моделей внешнего вида считается обученной. Эффективность данного метода: до 88 %.

### Метод на основе информации о текстуре

Даже в случае отсутствия информации о положении и форме ключевых элементов лица, существует возможность определения выражения лица человека.

Предполагается, что эмоции на лице человека кодируются положением ключевых точек и другими признаками. Что бы это проверить, достаточно преобразовать лица, которые выражают эмоции, к усредненной форме. После этого определить его изначальное выражение.

На рис. 2 приведен ряд лиц, к которым применили приведение к средней форме.

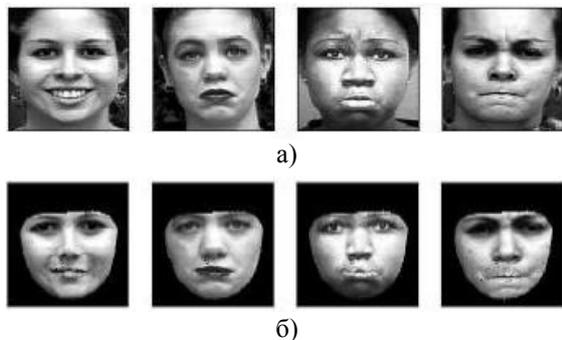


Рисунок 2 – Примеры приведения к средней форме: а) исходные изображения лиц; б) соответствующие изображения

Можно заметить, что все ключевые точки губ, глаз, бровей, носа и подбородка находятся в идентичном положении. Эти изображения получены при помощи триангуляции по ключевым точкам, и при помощи применения кусочно-аффинного преобразования к фотографиям лиц, которые выражают эмоции.

Эмоции на лице можно легко угадать по теням, морщинам и остальным элементам текстуры, несмотря на выравнивание положения ключевых элементов лица. Это полностью подтверждает данную гипотезу.

Преобразование к усредненной форме позволяет сделать для каждого изображения соответствующий вектор текстуры, точно так, как и в методе на основе положения ключевых точек. Вектор, представленный формулой (1):

$$t = (t_1, t_2, \dots, t_n)^T, \quad (1)$$

где  $n$  – количество пикселей внутри внешнего контура формы.

Этот вектор можно напрямую использовать в качестве вектора признаков при классификации. В качестве классификатора можно применять метод опорных векторов [4, 5].

Получаем следующий алгоритм. Изображения подвергаются предварительной обработке на этапе обучения. При помощи моделей активного образа на них определяются положения ключевых точек. После кусочно-аффинным преобразованием лица на изображениях приводится к усредненной форме.

Пиксели полученных изображений вместе с метками эмоций используются для обучения методом опорных векторов. Преобразование

данных изображений классифицируется при помощи ранее обученной модели на этапе применения. Эффективность метода: 86,3 %.

### Метод опорных векторов

Метод опорных векторов был предложен российскими учеными Червоненкисом и Вапником. Это метод есть линейным классификатором. Он применяется к решению задач классификации и регрессионного анализа.

Применение данного метода к решению задачи классификации объектов на изображениях можно представить следующим образом. Есть множество точек в пространстве. Эти очки сгруппированы по двум классам.

Проведем разделяющую гиперплоскость, чтобы разделить множество точек на классы. Со стороны классификации нужно найти оптимальную гиперплоскость. Расстояние от этой плоскости до каждого класса максимально.

Ошибка классификации уменьшается с увеличением расстояния от разделяющей гиперплоскости до каждого класса. Вектора, которые лежат в пространстве ближе всего к гиперплоскости, называются опорными векторами [5].

Найдем классифицирующую функцию  $f(x)$ , применяющую различные значения для векторов других классов. Для определения  $f(x)$  используется следующий обучающий набор данных  $(x_1 y_1) \dots (x_n y_n)$ .

Наиболее оптимальной функцией есть та, при которой ожидаемая ошибка классификации принимает минимальное значение.

Классифицирующую функцию можно представить формулой (2):

$$f(x) = \text{sign}(\langle w, x \rangle + b), \quad (2)$$

где  $x$  – объект, который принадлежит пространству;  $w$  – вектор нормали к гиперплоскости;  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  – скалярное произведение;  $b$  – вспомогательный параметр.

Функция  $f(x)$  принимает значения равные 1, -1 для объектов, которые принадлежат к разным классам. Выбираем параметры  $w$  и  $b$  таким образом, чтобы расстояние до каждого класса было максимальным.

Часто на практике бывают случаи, где данные нельзя разделить линейным способом.

В данной ситуации чтобы решить эту задачу, нужно выполнить преобразование исходного пространства  $x$  в пространство, которое более высокой размерности с помощью специального отображения, которое представлено формулой:

$$\varphi: R^n \rightarrow X. \quad (3)$$

Отображение выбирается так, чтобы в полученном пространстве множество данных было линейно разделимо. Сложность в том, что с увеличением размерности пространства, увеличивается сложность процесса классификации.

Достоинством этого метода есть его классификация объектов, которая проводится на наборе данных небольшого размера.

При помощи метода опорных векторов можно построить классификатор, который минимизирует верхнюю оценку предполагаемой ошибки классификации, и для неизвестных объектов, для тех, которых не было в начальном наборе данных.

Суть метода заключается в задаче обнаружения лиц и сводится к нахождению гиперплоскости в пространстве признаков. Эта плоскость и есть границей между пространством изображений лиц и теми изображениями, где лица отсутствуют [6, 7].

Недостатком этого метода в процессе классификации является использование только некоторой части образцов, которая находится на границах области классификации.

Достоинством является то, что классификация этим методом проводится на небольшом общем наборе данных. Эффективность метода может достигать до 90 %.

### **Метод на основе ключевых точек**

Для метода на основе ключевых точек алгоритм выполнения делится на два этапа: получение координат ключевых точек и классификация эмоций на их основе.

Входные данные для этого метода: набор изображений лиц. Каждому изображению соответствует файл разметки, который содержит координаты ключевых точек. Точки выбираются человеком. Именно на этих данных можно построить две статистические модели: формы и текстуры [8].

Модель формы – параметрическая линейная модель. Она описывает возможные варианты положения ключевых точек. Формой называется вектор координат ключевых точек, представленный формулой:

$$s = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n)^T. \quad (4)$$

Модель текстуры похожая на предыдущую модель, но она описывает уже возможные вариации интенсивности пикселей. Текстурой называется вектор всех пикселей внутри внешнего контура формы. Этот вектор представлен формулой:

$$s = (t_1, t_2, \dots, t_n)^T. \quad (5)$$

Так как на различных изображениях количество пикселей внутри внешнего контура формы может быть разным – перед созданием модели текстуры все изображения лиц приводятся к единой усредненной форме посредством кусочно-аффинного преобразования.

Множество точек формы триангулируется (операция разбиения). После любой симплекс обычным аффинным преобразованием транслируется в новые координаты.

Эффективность метода на основе ключевых точек – 89,4 %.

### **Локальные бинарные шаблоны**

Локальные бинарные шаблоны (ЛБШ) – это бинарные коды определенной разрядности. Они используются для классификации в компьютерном зрении.

Этот метод был предложен в 1996 году для анализа текстуры полутоновых изображений. Дальнейшие исследования показывают, что ЛБШ инвариантны к изменениям в условиях освещения и поворотам изображения.

Локальные бинарные шаблоны описывают окрестности пикселя изображения в двоичном представлении. Чтобы вычислить базовый локальный бинарный шаблон, в некоторой точке изображения применяется восемь пикселей ее окрестности. Порогом считается значение интенсивности центрального пикселя.

Пиксели со значением интенсивности, который больше или равный пороговому значению, принимают значения, которые равны единице. Остальные пиксели принимают значения, равные нулю. В этом случае, результат операции – восьмиразрядный бинарный код. Этот код описывает окрестность этого пикселя.

Чтобы сделать более гибкий анализ текстурных особенностей изображения используют билинейную интерполяцию значений интенсивностей пикселей. Они позволяют сделать расширенный локальный бинарный шаблон с произвольным числом точек  $P$  и радиусом  $R$ .

Перед построением гистограммы локальный бинарный шаблон вычисляется для каждого пикселя изображения. Каждому равномерному коду локального бинарного шаблона соответствует отдельный столбец. Формируется вспомогательный столбец. В нём содержится информация обо всех неравномерных шаблонах [9].

Набором всевозможных локальных особенностей представлены изображения лиц. Эти особенности хорошо описываются с помощью ЛБШ.

Гистограмма, которая построена для всего изображения полностью, кодирует только наличие локальных особенностей. При этом она не содержит информацию о расположении

особенностей на изображении. Чтобы учесть пространственное расположение

Чтобы учитывать пространственное расположение, изображение разбивается на подобласти. Для каждой подобласти вычисляется своя гистограмма локального бинарного шаблона.

Разбиение изображения лица на подобласти показано на рис. 3.



Рисунок 3 – Разбиение изображения лица на подобласти

При помощи конкатенации (операции склеивания) гистограмм строится общая гистограмма. Она учитывает локальные и глобальные особенности изображения. Для лучшего извлечения признаков выполняется варьирование параметров оператора ЛБШ и числа разбиений изображения на подобласти.

Эффективность метода может достигать 86 %.

### Распознавание лиц с помощью сверточных нейронных сетей

Сверточные нейронные сети (СНС) – вид нейронных сетей, которые работают на основе принципа зрительной системы человека. Этот метод в 1998 г. предложили исследователи Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio и P. Haffner.

Эти сети являются особым классом многослойного персептрона. Его структура двумерна, хорошо подходит для обработки изображений с высокой степенью инвариантности к поворотам, масштабированию, смещению, и другим искажениям входных данных.

Структурно сверточные нейронные сети содержат последовательность из сверточных и подвыборочных видов слоев, которые представлены набором плоскостей (карт характеристик). Эти наборы плоскостей состоят из нейронов. В сверточном слое каждый нейрон имеет связь с небольшим количеством нейронов предыдущего слоя (локальное рецептивное поле). Частично локальные рецептивные поля нейронов сверточного слоя накладываются друг на друга (принцип черепицы). Значения этих нейронов умножаются на матрицу синаптических коэффициентов. Результатом

здесь выступает соответственный нейрон сверточного слоя. На рис. 4 показано функционирование слоев в сверточной нейронной сети.

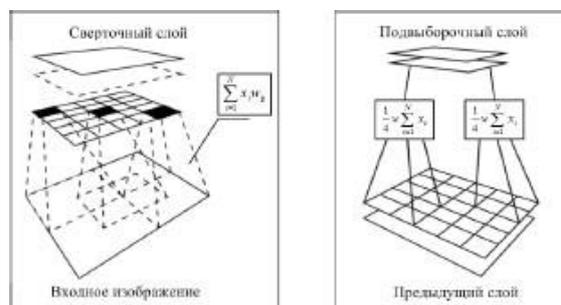


Рисунок 4 – Функционирование слоев в СНС

Подвыборочный слой – это слой, обеспечивающий частичную инвариантность нейронной сети к изменению масштаба входного изображения. Количество плоскостей в этом слое, как и в предыдущем, локальные рецептивные поля не пересекаются и имеют фиксированный размер нейрона (2 × 2).

Каждый нейрон вычисляет среднее значение четырех входов, умножает их на синаптические коэффициенты. Результатом здесь выступает в виде функции активации. А значит, подвыборочный слой уменьшает размерность плоскостей сверточного слоя в два раза.

Количество плоскостей растет в количестве, а их размеры уменьшаются. Чередование слоев позволяет формировать различные наборы плоскостей, что наделяет данный метод возможностью идентификации более сложных иерархических признаков. Несколько слоев в конце представляют собой классический персептрон. Эти слои включают обычные нейроны, классифицируют выделенные признаки.

Для всех нейронов в пределах плоскости используется общая матрица весовых коэффициентов – это является важным свойством СНС. Это свойство дает возможность использовать меньшее число настраиваемых параметров (весовых коэффициентов) при большом количестве связей, повышает скорость процесса обучения.

Плоскости СНС – это фильтры, осуществляющие поиск индивидуальных характерных признаков входного изображения. СНС запоминает взаимосвязь пространственно зависимых областей изображения.

Характерные признаки определяются в процессе обучения. Смешанный результат на выходе будет, если входное изображение искажено или смещено. Обеспечивается устойчивость сверточной нейронной сети к искажениям входных данных [10].

Сложность настройки оптимальных параметров (нейронов, плоскостей, количества слоев и так далее) есть недостатком метода СНС.

Преимуществами данного метода есть удобная структура для обработки двумерных данных, взаимосвязь пространственно-зависимых областей изображения, повышенная устойчивость к аффинным и проекционным искажениям входных данных, шумам, изменению масштаба.

Метод СНС активно используются для обнаружения лиц и других объектов на изображениях и видео последовательностях. Эффективность данного метода – 97,4 %.

### Анализ методов

Основная задача для большинства современных систем автоматической идентификации лиц и эмоций – это сравнение изображения лица с набором изображений из базы данных. Характеристики данных систем в этом случае оцениваются при помощи определения вероятностей ошибочного отказа в распознавании и ошибочного распознавания.

В табл. 1 представлены результаты анализа эффективности каждого с рассмотренных выше методов. На рис. 5 представлен график эффективности методов.

Таблица 1 – Процент эффективности методов распознавания

Метод	Активные модели внешнего вида	Информация о текстуре	Опорные векторы	Ключевые точки	Локальные бинарные шаблоны	Сверточные нейронные сети
% эффективности	88	86,3	90	89,4	86	97,4

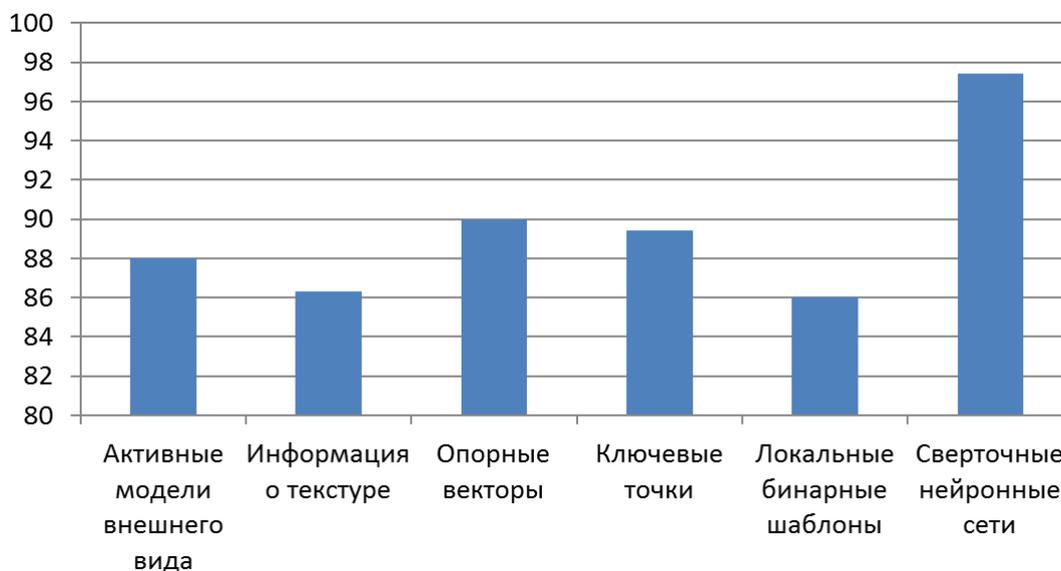


Рисунок 5 – Анализ эффективности методов распознавания лиц и эмоций

Наиболее эффективным методом оказался метод распознавания лиц и мимики с помощью свёрточных нейронных сетей. Эффективность данного метода составила 97,4 %. Выбор метода идентификации лиц для создания практических систем автоматического распознавания лиц, должен основываться на ограничениях конкретной системы, и определяется непосредственно на этапе проектирования.

С вышеизложенного можно вывести следующее: чтобы повысить качество результата, перспективным может быть создание гибридных методов. Эти методы могут использовать преимущества и недостатки (мало влияющие на результат) рассмотренных выше различных современных методов распознавания лиц и эмоций.

### Выводы

Рассмотрены разнообразные методы распознавания эмоций, описан принцип работы, их особенности, недостатки и эффективность. В среднем эффективность рассмотренных методов 86-90 %. В отличие от метода главных компонент, метод опорных векторов увеличивает размерность пространства с целью поиска базиса, в котором кластеры изображений будут являться линейно разделенными. Наиболее эффективным методом оказался метод распознавания лиц и мимики с помощью свёрточных нейронных сетей. Эффективность данного метода составила 97,4 %. Перспективным может быть создание гибридных методов.

## Литература

1. Кривонос Ю. Г., Ефимов Г. М. Моделирование и анализ мимических проявлений эмоций. // Доповіді НАНУ. – 2008. – № 12. – С. 51-55.
2. Санников К. А. Разработка алгоритмов распознавания эмоционального состояния человека по изображению его лица: дис. ... студент 09.04.01. – Томск, 2017. – 98 с.
3. Заболевая-Зотова А. В., Орлова Ю. А., Бобков А. С. Развитие системы автоматизированного определения эмоций и возможные сферы применения. // Открытое образование. – Волгоград, – 2011. – Т.2. – С. 59-62.
4. Розалиев В. Л. Построение математической модели эмоций. Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. // Сборник науч. тр. V междунар. науч.-практ. конф., 28-30 мая 2009 г., Коломна. – М: Коломна, 2009. – Т.2. – С. 950-957.
5. Потапов А. С. Системы Компьютерного Зрения. – Санкт-Петербург, 2016. – 162 с.
6. Ильин Е. П. Эмоции и чувства. – СПб: Питер, 2001. – 752 с.
7. Леонтьев В. О. Классификация эмоций. – Одесса: Инновационно-ипотечный центр, 2002. – 84 с.
8. Розалиев В. Л., Бобков А. С., Федоров О. С. Система распознавания эмоционального состояния человека на основе анализа видео ряда. Нечёткие системы и мягкие вычисления (НСМВ-2009). // Сб. ст. 3-й всерос. науч. конф., 21-24 сент. 2009. - Волгоград, 2009. - Т. 2. - С. 245-253
9. Розалиев В. Л., Заболевая-Зотова А. В. Моделирование эмоционального состояния пользователя. // Инф. технол. в науке, образ., телеком. и бизнесе (IT+SE'07): прилож. к журн. по матер. XXXIV междунар. конф., 20-30 мая 2007. – Ялта-Гурзуф: [Б/н], 2007. – С.172-173.
10. Макаренко А. А., Калайда В. Т. Методика локализации изображения лица для систем видеоконтроля на основе нейронной сети. // Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2006. – Т.309. – № 309. – С. 113-118.

**Ванжа Т. В.** *Статистический анализ современных методов распознавания лиц и эмоций.* Рассмотрены разнообразные методы распознавания лиц и эмоций, описан принцип работы, их особенности, недостатки и эффективность. Затронута проблема автоматизации и формализации процесса распознавания лиц и эмоций. Дан один из вариантов её решения. Наиболее эффективным методом оказался метод распознавания лиц и мимики с помощью сверточных нейронных сетей. Точность распознавания данного метода составила 97,4%. Для большинства современных систем автоматического распознавания лиц и эмоций основной задачей является задача сравнения данного изображения лица с набором изображений лиц из базы данных. Характеристики систем автоматического распознавания лиц в этом случае, оцениваются путем определения вероятностей ошибочного отказа в распознавании и ошибочного распознавания. Перспективным может являться создание гибридных методов, использующих преимущества и нивелирующие недостатки рассмотренных выше различных современных методов распознавания лиц и эмоций.

**Ключевые слова:** идентификация, распознавание лиц, компьютерное зрение, оценка эффективности, статистический анализ.

**Vanzha T.** *Statistical analysis of modern methods of recognition of faces and emotions.* Various methods of recognition of faces and emotions are considered, the principle of work, their features, shortcomings and effectiveness are described. The problem of automating and formalizing the process of recognizing faces and emotions is addressed. One of the solutions is given. The most effective method was the method of face recognition and facial expressions using convolutional neural networks. The recognition accuracy of this method was 97.4%. For most modern systems of automatic recognition of faces and emotions, the main task is to compare this face image with a set of face images from the database. The characteristics of automatic facial recognition systems in this case are evaluated by determining the probabilities of an erroneous failure in recognition and erroneous recognition. Promising may be the creation of hybrid methods that use the advantages and leveling the disadvantages of the various modern methods of recognizing faces and emotions discussed above.

**Keywords:** identification, face recognition, computer vision, performance evaluation, statistical analysis.

Статья поступила в редакцию 10.05.2019  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

# **Компьютерные и информационные науки**

## Алгоритм трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению методом перспективных масштабов

М. П. Руденко

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

[m.p.rudenko@mail.ru](mailto:m.p.rudenko@mail.ru)

### Аннотация

*В статье рассматривается алгоритм трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению, основанный на методе перспективных масштабов, и реализованный в графической среде AutoCAD с помощью языка AutoLisp. Производится проверка на погрешность результатов построения трехмерной модели архитектурного сооружения, результаты которой показали, что алгоритм работает в пределах допустимой погрешности и что он может быть использован в задачах проектирования и трехмерной реконструкции архитектурных зданий и сооружений.*

### Введение

Трехмерная реконструкция архитектурных сооружений является актуальной задачей для работы архитекторов и археологов, а также специалистов, занимающихся трехмерным моделированием архитектурных и городских сред.

Создание трехмерных моделей применяется при решении таких задач как: проектирование интерьера и экстерьера; виртуальная реконструкция утраченных памятников архитектуры; виртуальные музеи.

Целью данной статьи является рассмотрение алгоритма трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению методом перспективных масштабов.

### Трехмерная реконструкция на основе фотографий

Основные методы и инструментальные средства трехмерной реконструкции архитектурных сооружений по фотоизображению описаны в [1-5].

В [6-10] рассматривается метод трехмерной реконструкции сцены по фотографическим изображениям Structure-from-Motion (SFM), в [11-13] предлагается его модификация.

Данный метод трехмерного моделирования по фотоизображению был взят как пример для решения задачи построения трехмерной реконструкции архитектурных сооружений, и в [14] приводится сравнение метода SFM и метода перспективных масштабов, который был разработан как его альтернатива. Был сделан вывод о том, что метод перспективных масштабов как метод поиска натуральных величин отрезков, отмеченный на фотографии, является более простым

в исполнении, так как не требует вычисления параметров камеры и фокусного расстояния.

### Программная реализация метода перспективных масштабов

В [14] описан общий алгоритм определения натуральных величин отрезков методом перспективных масштабов, отмеченных на фотографии, для трехмерного моделирования архитектурных сооружений.

Перспективные масштабы передают на картине не действительные размеры фигуры, а их пропорциональные отношения. Истинная величина отрезка либо фигуры соответствует действительным размерам при условии, что отрезок либо фигура расположены непосредственно на картине плоскости.

Для определения перспективных масштабов фигуры выделяют такие направления в предметном пространстве [15]:

- направление широты;
- направление высоты;
- направление глубины;
- произвольное направление.

Структура алгоритма представлена на рис. 1.

Для программной реализации метода перспективных масштабов была выбрана графическая среда Autodesk AutoCAD, так как в ней есть встроенный функциональный язык AutoLisp. Он позволяет написать программу автоматизации любого геометрического построения модели.

Структура алгоритма трехмерного моделирования архитектурного сооружения представлена на рис. 2.



Рисунок 1 – Структура алгоритма построения трехмерной модели архитектурного сооружения методом перспективных масштабов

Часть кода приводится ниже:

```
(vl-load-com)
(setq acad_object (vlax-get-acad-object))
(setq active_document (vla-get-activedocument acad_object))
(setq model_space (vla-get-modelspace active_document))
(setq ans (getstring "\nПостроить трехмерную модель? Введите Y или N: "))
(while (= ans "Y")
  (setq L1 (getdist "\nУкажите ширину фигуры :"));
  (setq L2 (getdist "\nУкажите глубину фигуры :"));
  (setq H1 (getdist "\nУкажите высоту фигуры :"));
  (setq bp (getpoint "\nУкажите базовую точку :"));
  (setq vla_box (vla-AddBox model_space (vlax-3D-point bp) L1 L2 H1));
  (setq ans (getstring "\nПовторить построение? Введите Y или N: ")))
```

### Примеры трехмерной реконструкции архитектурных сооружений

Для практического применения алгоритма трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению были выбраны два объекта, выполненные в одинаковом кирпичном стиле и построенные в юзовский период: существующее здание на пр. Труда (г. Донецк) (рис. 3), и частично утраченное здание – дом Юза-Свицына (рис. 4).



Рисунок 3 – Фотография здания на пр. Труда

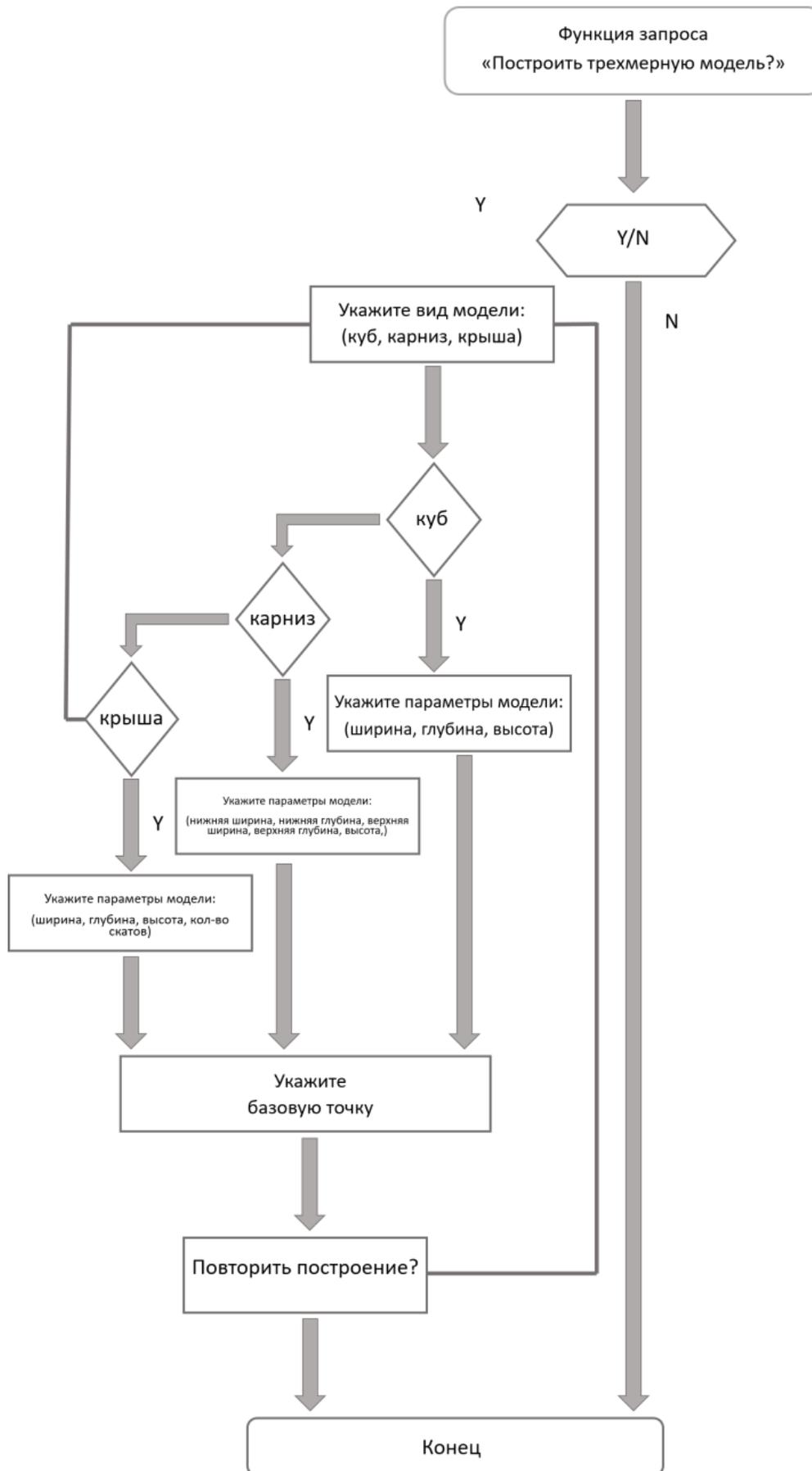


Рисунок 2 – Структура алгоритма трехмерного моделирования архитектурного сооружения



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Фотографии дома Юза: а) начало XX века; б) нынешнее состояние дома Юза; в) боковой фасад дома [16]

Существующее здание было взято для последующей проверки алгоритма на погрешность. Частично утраченное здание было взято для того, чтобы показать, что при наличии дополнительных иконографических материалов (рисунки и старые фотографии) возможно выполнить трехмерную реконструкцию его первоначального вида.

Импорт трехмерных моделей в графическую среду 3DsMax. Графический редактор 3DsMax позволяет создавать реалистичную картинку с материалами, освещением и окружающей средой. Поэтому созданные в графической среде AutoCAD модели зданий были импортированы в 3DsMax для придания им более привлекательного вида (рис. 5).



а)



б)

Рисунок 5 – Трехмерные модели:  
а) здания на пр. Труда; б) дома Юза-Свицына

Здание на пр. Труда. Для построения трехмерной модели здания был использован алгоритм (рис. 1, 2). Это здание несложное по форме, и поэтому подходит для эксперимента. Результаты применения алгоритма представлены на рис. 6.

Дом Юза-Свицына. Для построения трехмерной модели здания был также использован алгоритм (рис. 1, 2), результаты представлены на рис. 7.

Задача трехмерной реконструкции дома Юза-Свицына является более сложной, так как идет речь о частично утраченном здании. Для реконструкции первоначального облика здания понадобились дополнительные фотографии, сделанные в начале XX века, а также карта местности. Это здание уже сложнее по форме, в отличие от первого здания, так как состоит из нескольких блоков.

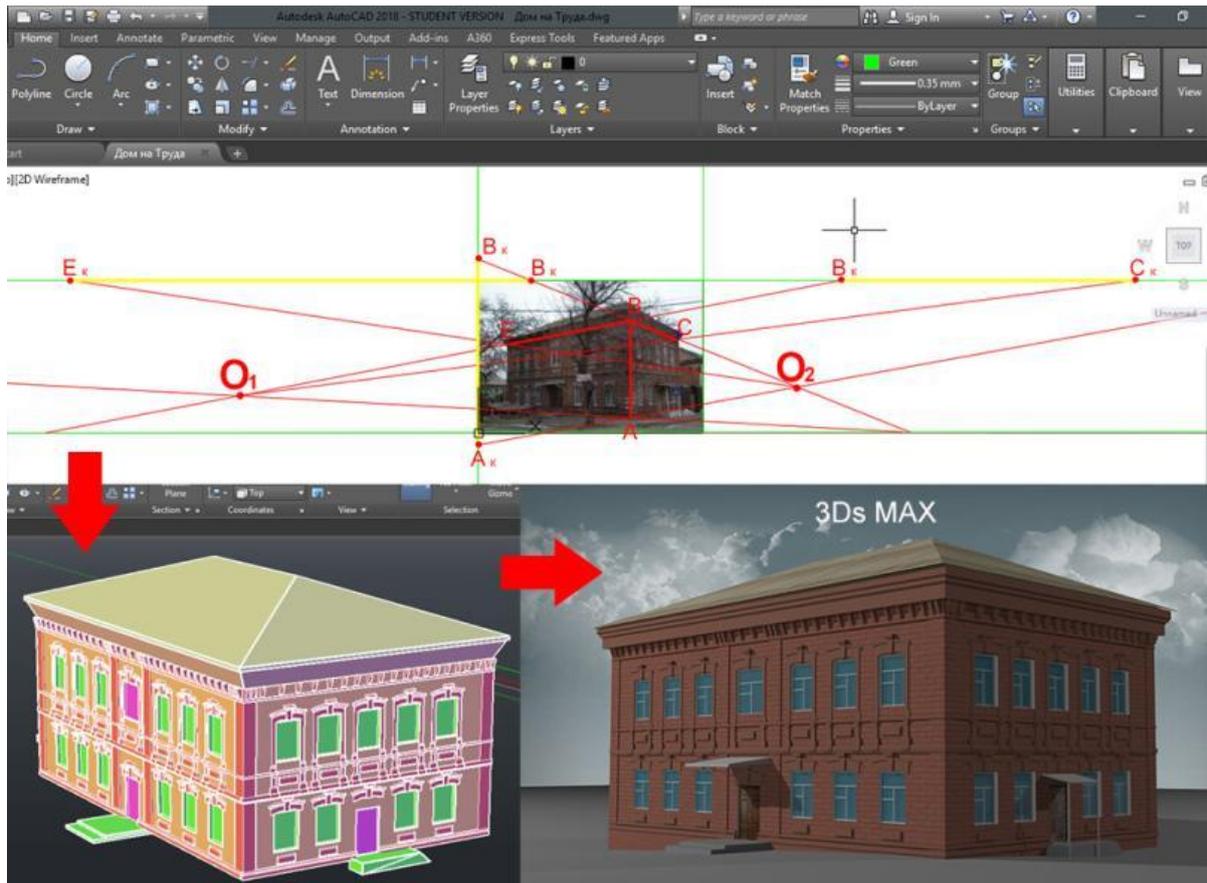


Рисунок 6 – Применение алгоритма автоматизации трехмерного моделирования здания на пр. Труда

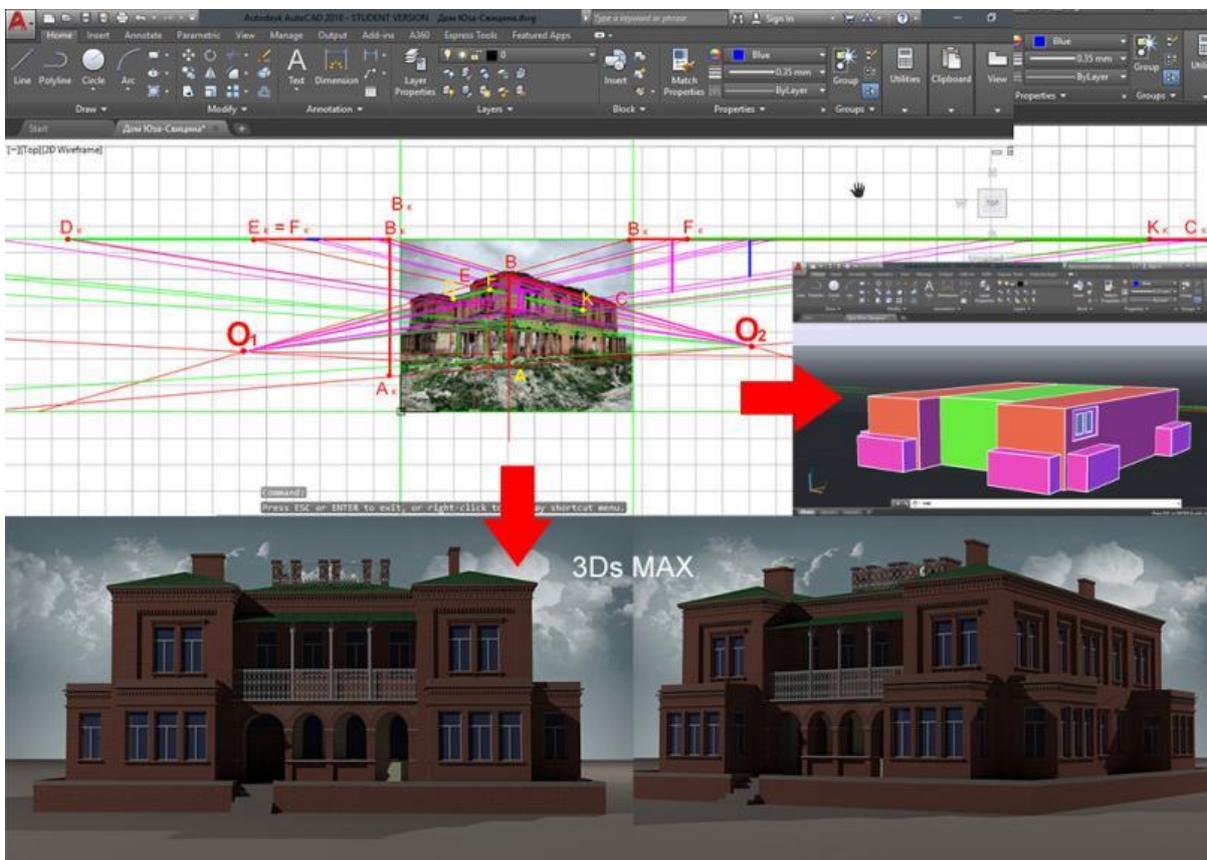


Рисунок 7 – Применение алгоритма автоматизации трехмерного моделирования дома Юза-Свицины

## Проверка на погрешность

Для того, чтобы проверить алгоритм на погрешность, были сделаны физические замеры окна и центральной входной двери здания на пр. Труда (рис. 8а, б), также контур трехмерной модели здания был помещен на карту местности для контрольной проверки (рис. 8в). Данные размеров занесены в табл. 1.

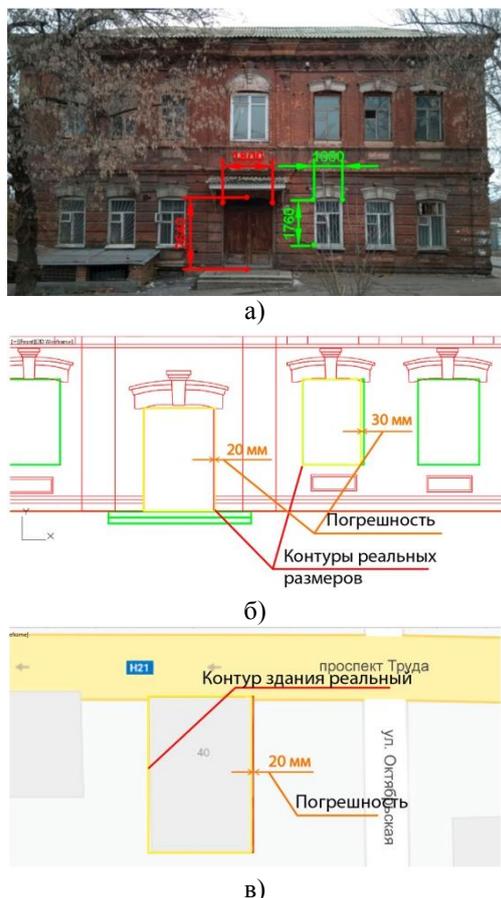


Рисунок 8 – Проверка моделей: а) физические размеры окна и входной двери здания; б) сравнение контуров реальных и созданных размеров окна и двери; в) сравнение реального и созданного контуров здания на карте местности.

Таблица 1. Реальные размеры объектов и размеры объектов трехмерной модели

	Реальные размеры, мм	Размеры трехмерной модели, мм
Окно	1050×1760	1080×1760
Дверь	1800×2640	1780×2640
Контур здания на карте	21520×32500	21500×32500

Погрешность в размерах равна: окно – 30 мм, дверь – 20 мм, контур здания на карте – 20 мм.

Согласно ГОСТ 21779-82 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски» [17] погрешность 20-30 мм является допустимым значением погрешности при производстве замеров. Следовательно, применение алгоритма автоматизации трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению является целесообразным для использования в проектировании и трехмерной реконструкции, так как дает допустимую погрешность в размерах и правильные пропорции при построении модели.

## Выводы

Рассмотрение алгоритма трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению методом перспективных масштабов показало, что алгоритм работает в пределах допустимой погрешности и что он может быть использован в задачах проектирования и трехмерной реконструкции архитектурных зданий и сооружений.

Перспективы дальнейшего исследования следующие:

- автоматизация алгоритма определения натуральных величин отрезков методом перспективных масштабов средствами графической среды AutoCAD с использованием встроенного языка программирования AutoLisp;
- применение алгоритма для построения более сложных трехмерных объектов, созданных из окружностей, многоугольников и кривых;
- устранение погрешности в работе алгоритма.

## Литература

1. Руденко М. П. Методы виртуальной реконструкции памятников архитектуры // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, № 1(8) – 2(9), 2015. – С. 110-116.
2. Руденко М. П. Инструментальные средства виртуальной реконструкции утраченных памятников архитектуры // Информатика и кибернетика. – 2016. - № 2(4). – С. 62-67
3. Крейдун Ю. А., Жилин С. И. Построение пространственных моделей утраченных архитектурных памятников по одиночным изображениям // Ползуновский вестник, № 3, 2004. – С. 83-88.
4. Меженин А. В., Тозик В. Т. Реконструкция трехмерных моделей по растровым изображениям // Научно-технический вестник информационных технологий, механики, оптики, № 45, 2007. – С. 203-207.

5. Захаров А. А., Тужилкин А. Ю. Трехмерная реконструкция визуальной обстановки по видеоизображениям на основе вероятностного подхода // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, № 2, 2014. – С. 45-49.
6. Camillo J. Taylor and David J. Kriegman. Structure and motion from line segments in multiple images. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 17(11), November 1995.
7. Debevec P. E. Modeling and Rendering Architecture from Photographs. Doctoral dissertation. University of California at Berkeley. 1996.
8. Camillo J. Taylor and David J. Kriegman. Minimization on the lie group  $so(3)$  and related manifolds. Technical Report 9405, Center for Systems Science, Dept. of Electrical Engineering, Yale University, New Haven, CT, April 1994.
9. Eric N. Mortensen and William A. Barrett. Intelligent scissors for image composition. In SIGGRAPH '95, 1995.
10. Steven Smith. Geometric Optimization Methods for Adaptive Filtering. PhD thesis, Harvard University, Division of Applied Sciences, Cambridge MA, September 1993.
11. Ковальский С. В., Зори С. А. Исследование алгоритма извлечения трехмерной структуры объектов из их фотоизображений для реконструкции геометрических моделей сцен городских ландшафтов. В кн. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка (ИКВТ-2005). Донецк: ДонНТУ, 2005, с.12-21.
12. Ковальский С. В., Зори С. А. Модифицированный алгоритм реконструкции трехмерных сцен городских ландшафтов на основе фотоизображений // Моделирование и компьютерная графика: Материалы I-й Международной научно-технической конференции. – Донецк, ДонНТУ, Министерство образования и науки Украины, 2005. – С. 70-76.
13. Зори С. А., Ковальский С. В. Автоматизация создания трехмерных моделей реальных ландшафтов на основе фотографий // Известия ЮФУ. Техн. науки, 2010. – № 5 (106). С. 134-140.
14. Руденко М. П. Трехмерная реконструкция утраченных памятников архитектуры по фотографическому изображению методом перспективных масштабов // Информатика и кибернетика. – 2018. - №2(12). – С. 64-68.
15. Соловьев С. А., Буланже Г. В. Черчение и перспектива. – М.: Высшая школа, 1982. – 319 с: ил.
16. Российская Империя в фотографиях / [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://all-photo.ru/empire/index.ru.html?kk=2e4b12b045&big=on&img=18604>
17. ГОСТ 21779-82: Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски: утв. постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 10.06.82 № 156, срок введения установлен с 01.01.83 // Издательство стандартов: - Москва, 1983. – 24 с.

**Руденко М. П. Алгоритм трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению методом перспективных масштабов.** В статье рассматривается алгоритм трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению, основанный на методе перспективных масштабов, и реализованный в графической среде AutoCAD с помощью языка AutoLisp. На основе использования алгоритма производится проверка на погрешность результатов построения трехмерной модели архитектурного сооружения. Приводятся примеры трехмерной реконструкции сохранившегося, а также частично утраченного архитектурных сооружений.

**Ключевые слова:** трехмерное моделирование, архитектурные сооружения, автоматизация, AutoCAD, AutoLisp, 3dsMax, перспективные масштабы, перспектива.

**Rudenko M. The architectural structures three-dimensional modeling from photograph algorithm by the perspective scales method.** The article discusses an algorithm for three-dimensional modeling of architectural structures from photograph, based on the perspective-scale method, and implemented in the AutoCAD graphics environment using the AutoLisp language. Based on the use of the algorithm, an error is checked for the results of constructing a three-dimensional model of an architectural structure. Examples of three-dimensional reconstruction of the preserved, as well as partially lost architectural structures are given.

**Keywords:** three-dimensional modeling, architectural structures, automation, AutoCAD, AutoLisp, 3dsMax, perspective scales, perspective.

Статья поступила в редакцию 05.06.2019  
Рекомендована к публикации профессором Зори С. А.

## Полигоны над полугруппами, унарные алгебры и автоматы

И. Б. Кожухов\*, А. В. Михалёв\*\*

\* Московский институт электронной техники, г. Москва,

\*\* Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва

[kozuhov\\_i\\_b@mail.ru](mailto:kozuhov_i_b@mail.ru), [aamikhalev@mail.ru](mailto:aamikhalev@mail.ru)

### Аннотация

Рассматриваются полигоны над полугруппами, унарные алгебры и абстрактные автоматы Мура с единой точки зрения. Изложены элементы структурной теории полигонов, детально разобрано строение полигонов над группами и над вполне (0-) простыми полугруппами. Получены условия инъективности или проективности полигона, построены инъективные оболочки и проективные накрытия полигонов. Показано, что результаты, касающиеся унарных алгебр, автоматически становятся результатами по теории полигонов и наоборот. Таким образом, каждый из этих результатов вносит вклад в алгебраическую теорию автоматов. Приведен обзор результатов по теории полигонов за последнее время.

### Введение

Полугруппой называется множество  $S$  с одной ассоциативной бинарной операцией. Полигон над полугруппой  $S$  [1] – это множество, на котором действует полугруппа  $S$  т. е. определено отображение  $X \times S \rightarrow X$   $(x, s) \mapsto xs$ , такое, что  $x(st) = (xs)t$  при всех  $x \in X$   $s, t \in S$ . Унарная алгебра – алгебра, на которой заданы унарные операции. Автомат Мура (автомат без выхода) [2] – тройка  $A = (Q, \Gamma, \varphi)$ , где  $Q$  – множество состояний,  $\Gamma$  – входной алфавит,  $\varphi : Q \times \Gamma \rightarrow Q$  – функция переходов. Цель данной работы – показать тождественность этих трёх понятий и привести последние результаты теории полигонов.

### Связь полигонов с унарными алгебрами и автоматами

Пусть  $S$  – полугруппа, т. е. множество с бинарной операцией, удовлетворяющей закону ассоциативности  $(ab)c = a(bc)$  при всех  $a, b, c \in S$ . Обозначим через  $S^1$  наименьшую полугруппу с единицей, содержащую  $S$  в качестве подполугруппы, т. е.

$$S^1 = \begin{cases} S, & \text{если } S \text{ имеет единицу,} \\ S \cup \{1\}, & \text{если } S \text{ не имеет единицы.} \end{cases}$$

Основные сведения из теории полугрупп можно найти в монографии [3]. Важную роль в теории полугрупп играет полугруппа преобразований  $T(X)$   $A$  именно, пусть  $X$  – произвольное множество. Обозначим через  $T(X)$  множество всех отображений  $\alpha : X \rightarrow X$  с умножением, определяемым равенством  $x(\alpha\beta) = (x\alpha)\beta$  при  $x \in X$ ,  $s, t \in S$ . Аналогично теореме Кэли из теории групп в теории полугрупп доказывается, что всякая полугруппа

изоморфно вкладывается в полугруппу преобразований. Точнее: полугруппа  $S$  вкладывается в  $T(S^1)$ .

Полигон  $X$  над полугруппой  $S$  называется точным (по-другому: полугруппа  $S$  действует на  $X$  эффективно), если

$$\forall s, t \in S \quad ((\forall x \in X \quad xs = xt) \Rightarrow s = t).$$

Введём для каждого  $a \in S$  отображение  $\varphi_a : X \rightarrow X$ , полагая  $x\varphi_a = xa$  для всех  $x \in X$ . Нетрудно видеть, что отображение  $\Phi : S \rightarrow T(X)$ ,  $a \mapsto \varphi_a$  является гомоморфизмом полугруппы  $S$  в полугруппу  $T(X)$ . Пусть  $\rho = \ker \Phi$  – ядро отображения  $\Phi$  и  $\bar{S} = S / \rho$  – фактор-полугруппа. Тогда  $X$  можно будет рассматривать как полигон над полугруппой  $\bar{S}$ , причём этот полигон уже будет точным. Гомоморфизм  $\Phi : S \rightarrow T(X)$  называется представлением полугруппы  $S$  преобразованиями множества  $X$ . При этом точный полигон соответствует точному представлению (т. е. инъективному гомоморфизму  $\Phi : S \rightarrow T(X)$ ).

Отметим, что полигон над полугруппой является унарной алгеброй. Действительно, отображения  $\varphi_a$  ( $a \in S$ ), определённые выше, можно рассматривать как унарные операции на множестве  $X$ . Более того, всякую унарную алгебру можно превратить в полигон над полугруппой следующим образом. Пусть  $A$  – унарная алгебра с совокупностью унарных операций  $\Omega$  Для каждого  $\omega \in \Omega$  пусть  $\varphi_\omega : A \rightarrow A$ ,  $x \mapsto x\omega$ , – отображение, тогда  $\varphi_\omega \in T(A)$ . Обозначим через  $S'$  подполугруппу полугруппы  $T(A)$ , порождённую всеми  $\varphi_\omega$  ( $\omega \in \Omega$ ). Положим  $S = \Omega \cup S'$  и введём умножение на множестве  $S$ , руководствуясь правилами  $\omega \cdot s' = \varphi_\omega \cdot s'$ ,  $s' \cdot \omega = s' \cdot \varphi_\omega$ ,  $\omega_1 \cdot \omega_2 = \varphi_{\omega_1} \cdot \varphi_{\omega_2}$  для  $\omega, \omega_1, \omega_2 \in \Omega$   $s' \in S'$ . Тогда  $A$  будет полигоном над

полугруппой  $S$ . Наконец, отметим, что полигон  $X$  над полугруппой  $S$  – это алгебраическая модель автомата [3], в котором  $X$  – множество состояний, а  $S$  – полугруппа входных сигналов. В классической теории автоматов в качестве  $S$  выступает полугруппа слов (конечных последовательностей) букв входного алфавита.

Таким образом, оказывается, что изучаемые в алгебре полигон над полугруппой и унарная алгебра, а также изучаемый в дискретной математике абстрактный автомат – это один и тот же объект. При этом множество  $X$ , рассматриваемое как полигон над полугруппой, и то же множество, рассматриваемое как унарная алгебра, имеют одни и те же подалгебры (подполигоны), одни и те же конгруэнции. Для них одинаково решаются вопросы о том, когда решётка конгруэнций обладает теми или иными свойствами (удовлетворяет условию максимальности, минимальности, имеет наименьший ненулевой элемент и т. д.).

Таким образом, результаты, касающиеся унарных алгебр, автоматически становятся результатами по теории полигонов и наоборот, и каждый из этих результатов даёт вклад в алгебраическую теорию автоматов.

Обзор результатов по некоторым направлениям теории полигонов (структурная теория, проективность и инъективность, решётки конгруэнций, диагональные полигоны) содержится в работе [4]. О результатах и проблемах теории унарных алгебр см. работу [5]. Алгебраической теории автоматов посвящена книга [6].

### Структурная теория полигонов

К структурной теории относятся работы, в которых выясняется строение полигонов с теми или иными свойствами или полигонов над полугруппами определённого класса.

На любом полигоне можно ввести отношение квазипорядка: если  $X$  – полигон над полугруппой  $S$ , то для  $x, y \in X$  полагаем

$$x \leq y \Leftrightarrow x \in yS^1.$$

*Полурешёткой* называется коммутативная полугруппа идемпотентов, т. е. полугруппа, удовлетворяющая тождествам  $xu = ux$  (коммутативность) и  $x^2 = x$  (идемпотентность). Оказывается, что в случае полигонов над полурешётками отношение квазипорядка  $\leq$  является отношением порядка. Интересный вопрос о том, какие частично упорядоченные множества являются полигонами над полурешётками, решён в [7, теорема 4]. Ранее были описаны полигоны над конечной цепью [8, теорема 4].

Полигон  $X$  над полугруппой  $S$  называется *унитарным*, если  $S$  имеет единицу  $e$  и  $xe = x$  для всех  $x \in X$ . Полигон называется *циклическим* (в другой терминологии: моногенным, однопорождённым), если он порождается одним элементом, т. е.  $X = x_0S^1$  при некотором  $x_0 \in X$ . Конечно порождённый полигон  $X$  – это полигон, порождаемый конечным множеством элементов, т. е.  $X = x_1S^1 \cup \dots \cup x_nS^1$ .

Если полигон  $X$  является дизъюнктивным объединением своих подполигонов  $X_i$  ( $i \in I$ ), то говорят, что  $X$  является *копроизведением* полигонов  $X_i$ , и пишут  $X = \coprod_{i \in I} X_i$ .

Весьма прозрачное строение имеют полигоны над группами. Пусть  $G$  – группа,  $H$  – её подгруппа (не обязательно нормальная). Обозначим через  $G/H$  множество всех правых смежных классов  $Hg$  ( $g \in G$ ). Оно становится полигоном над группой  $G$ , если положить  $Hg \cdot g' = Hgg'$  для  $g' \in G$ . Нетрудно проверить, что:

- любой унитарный циклический полигон над группой  $G$  имеет вид  $G/H$ , где  $H$  – некоторая подгруппа группы  $G$ ;
- унитарный конечно порождённый полигон имеет вид  $G/H_1 \sqcup \dots \sqcup G/H_n$ , где  $H_1, \dots, H_n$  – некоторые подгруппы,
- произвольный унитарный полигон имеет вид  $\coprod_{i \in I} G/H_i$ , где  $\{H_i \mid i \in I\}$  – семейство подгрупп группы  $G$ .

Неунитарный полигон над группой (даже над любой полугруппой с единицей) может быть построен способом, изложенным ниже. Пусть  $X$  – произвольный полигон над полугруппой  $S$  с единицей  $e$ . Положим  $Y = Xe$ . Нетрудно проверить, что  $Y$  является унитарным подполигоном полигона  $X$ . Очевидно,  $Y = XS$  и  $Y = \{x \in X \mid xe = x\}$ . Следовательно,  $Y$  – наибольший унитарный подполигон полигона  $X$ . Назовём его унитарной частью полигона  $X$ .

Теперь можно взять произвольный унитарный полигон  $Y$  над полугруппой  $S$ , множество  $A$  такое, что  $A \cap Y = \emptyset$ , и любое отображение  $\mu : A \rightarrow Y$ . Тогда множество  $X = Y \cup A$  превращается в полигон над  $S$  с умножением

$$x \cdot s = \begin{cases} xs, & \text{если } x \in Y, \\ \mu(x)s, & \text{если } x \in A. \end{cases}$$

В работе [9, теорема 4] доказано, что любой полигон над полугруппой  $S$  с единицей получается из унитарного полигона над этой полугруппой вышеописанным способом. При этом ясно, что  $\mu(x) = xe$  при всех  $x \in A$ . Так как унитарные полигоны над группой описаны

(напомним, что они имеют вид  $\prod_{i \in I} (G/H_i)$ ), то мы можем считать описанными все полигоны над группой. Среди последних результатов, относящихся к полигонам над группой, отметим два. Но вначале дадим одно определение.

Универсальная алгебра называется *хопфовой*, если любой её сюръективный эндоморфизм  $\varphi: A \rightarrow A$  является инъективным, а значит, является автоморфизмом. Так как все конечные алгебры, очевидно, хопфовы, то хопфовость является условием конечности. В. К. Карташов [10] доказал, что любой конечно порождённый коммутативный полигон хопфов. Коммутативным называется полигон  $X$  над полугруппой  $S$  такой, что  $x(st) = x(ts)$  при  $x \in X, s, t \in S$ ; при этом полугруппа  $S$  необязательно коммутативна. И. Б. Кожухов и К. А. Колесникова (2019 г.) нашли необходимые и достаточные условия хопфовости унитарного полигона над группой.

Хорошо известна теорема Кантора – Бернштейна о том, что если для двух множеств  $A$  и  $B$  существуют вложения  $A \rightarrow B$  и  $B \rightarrow A$ , то существует и взаимно однозначное отображение  $A$  на  $B$ . Интересно спросить: в каких случаях эта теорема останется верной, если вместо произвольных множеств и отображений рассматривать универсальные алгебры и гомоморфизмы? Конечно, в общем случае это неверно: пусть  $G(2)$  и  $G(3)$  – свободные группы с 2 и 3 свободными образующими; известно, что каждая из них изоморфно вкладывается в другую, но  $G(2) \not\cong G(3)$ . Тем не менее, как доказано А. С. Сотовым (2019 г.), для унитарных полигонов над группами теорема, аналогичная теореме Кантора – Бернштейна, верна.

### Полигоны над вполне (0-)простыми полугруппами

На множестве идемпотентов любой полугруппы отношение  $e \leq f \Leftrightarrow ef = fe = e$  является отношением частичного порядка. Оно называется естественным порядком. Полугруппа  $S$  называется *простой*, если она не имеет нетривиальных идеалов (это равносильно тому, что  $SaS = S$  для всех  $a \in S$ ). Простая полугруппа называется *вполне простой*, если она имеет минимальный в смысле естественного порядка идемпотент. Для полугрупп с нулём вводятся аналогичные понятия.  $A$  именно, полугруппа  $S$  с нулём *0-проста*, если она не имеет идеалов, отличных от  $\{0\}$  и  $S$ , и *вполне 0-проста*, если она *0-проста*,  $S^2 \neq \{0\}$  и существует минимальный ненулевой идемпотент.

Пусть  $G$  – группа,  $G^0 = G \cup \{0\}$  – группа с нулём,  $I$  и  $\Lambda$  – произвольные множества,  $P = \|p_{\lambda i}\|$  –  $(\Lambda \times I)$ -матрица с элементами  $p_{\lambda i} \in G^0$ . Полугруппа  $S = M^0(G, I, \Lambda, P)$  состоит из

элементов вида  $(g)_{i\lambda}$ , где  $g \in G, i \in I, \lambda \in \Lambda$ , и элемента  $0$ , умножение на  $S$  определяется правилами  $0 \cdot s = s \cdot 0 = 0$  для всех  $s \in S$  и

$$(g)_{i\lambda} \cdot (h)_{j\mu} = \begin{cases} (gp_{\lambda j}h)_{i\mu}, & \text{если } p_{\lambda j} \neq 0, \\ 0, & \text{если } p_{\lambda j} = 0. \end{cases}$$

Полугруппа  $M^0(G, I, \Lambda, P)$  называется *рисовской матричной полугруппой*. Рисовская матричная полугруппа регулярна, если в каждой строке и в каждом столбце матрицы  $P$  имеется хотя бы один ненулевой элемент. Рисовская матричная полугруппа  $M(G, I, \Lambda, P)$  без нуля определяется как множество элементов вида  $(g)_{i\lambda}$  ( $g \in G, i \in I, \lambda \in \Lambda$ ) с умножением  $(g)_{i\lambda} \cdot (h)_{j\mu} = (gp_{\lambda j}h)_{i\mu}$ . Рисовские матричные полугруппы обобщают такие теоретико-полугрупповые конструкции, как полугруппа правых / левых нулей, прямоугольная связка, прямоугольная группа.

Связь между вполне (0-)простыми и рисовскими матричными полугруппами осуществляет теорема Сушкевича – Риса [3, теорема 3.5]: вполне 0-простые полугруппы – это в точности регулярные рисовские матричные полугруппы с нулём, а вполне простые полугруппы – рисовские матричные полугруппы без нуля. Эту теорему считают аналогом теоремы Молина – Веддербёрна – Артина теории колец. Мы не будем различать (0-)простые полугруппы и регулярные рисовские матричные полугруппы (с нулём).

В работе [11] было получено описание всех полигонов над вполне простой полугруппой и полигонов с нулём над вполне 0-простой полугруппой. Приведём это описание для случая полугруппы без нуля.

Пусть  $S = M(G, I, \Lambda, P)$  – вполне простая полугруппа и  $Q = \prod_{\gamma \in \Gamma} (G/H_\gamma)$  – унитарный полигон над группой  $G$ . Далее, пусть  $X$  – произвольное множество и определены отображения  $\pi_i: X \rightarrow Q$  для каждого  $i \in I$  и  $\kappa_\lambda: Q \rightarrow X$  для каждого  $\lambda \in \Lambda$  такие, что  $q\kappa_\lambda\pi_i = q \cdot p_{\lambda i}$  для всех  $q \in Q, i \in I, \lambda \in \Lambda$ . Тогда  $X$  будет являться полигоном над полугруппой  $S$ , если определить умножение по формуле  $x \cdot (g)_{i\lambda} = (x\pi_i \cdot g)\kappa_\lambda$ . И наоборот, каждый полигон над полугруппой  $S$  изоморфен полигону, построенному таким способом.

Пусть  $X$  – полигон над полугруппой  $S = M(G, I, \Lambda, P)$ . Мы имеем:  $Q = \prod_{\gamma \in \Gamma} Q_\gamma$ , где  $Q_\gamma \cong G/H_\gamma$ . Положим  $Y = XS$  и для каждого  $\gamma \in \Gamma$  положим  $Y^{(\gamma)} = \{q\kappa_\lambda \mid q \in Q_\gamma, \lambda \in \Lambda\}$ . Тогда, как нетрудно проверить, будут иметь место следующие утверждения:

- $Y^{(\gamma)}$  – подполигон полигона  $X$ ;

- $Y^{(\gamma)} \cap Y^{(\delta)} = \emptyset$  при  $\gamma \neq \delta$ ;
- $Y^{(\gamma)} = yS$  при любом  $y \in Y^{(\gamma)}$ .

Таким образом,  $Y^{(\gamma)}$  – циклические подполигоны, каждый из которых порождается любым своим элементом. Более того, для  $i \in I$  положим

$$R_i = \{(g)_{i\lambda} \mid g \in G, \lambda \in \Lambda\}.$$

Тогда  $R_i$  будет являться правым идеалом полугруппы  $S$ , а значит, полигоном над  $S$ , причём все подполигоны  $R_i$  полигона  $S$  изоморфны друг другу и  $S = \coprod_{i \in I} R_i$ . Как полугруппы  $R_i$  также изоморфны друг другу и  $R_i \cong G \times \Lambda$ , где  $\Lambda$  рассматривается как полугруппа правых нулей. Возвращаясь к подполигонам  $Y^{(\gamma)}$ , можно отметить, что  $Y^{(\gamma)} = yR_i$  при любых  $\gamma \in \Gamma$ ,  $y \in Y^{(\gamma)}$ ,  $i \in I$ .

Из сказанного ранее следует, что всякий полигон  $X$  над вполне простой полугруппой представим в виде

$$X = (X \setminus XS) \cup \coprod_{\gamma \in \Gamma} y_\gamma S,$$

где  $y_\gamma \in Y^{(\gamma)}$  (элементы  $y_\gamma$  могут быть выбраны в  $Y^{(\gamma)}$  произвольным образом).

Для полигонов с нулём над вполне 0-простой полугруппой  $S = M^0(G, I, \Lambda, P)$  имеют место аналогичные результаты. Однако, вместо обычного копроизведения следует рассматривать копроизведения с объединённым нулём (будем обозначать их  $\sqcup^0$ ). Подполигоны  $Y^{(\gamma)}$  в этом случае попарно пересекаются по подполигону  $\{0\}$ , а элементы  $y_\gamma$  выбираются отличными от 0. Разложение полигона  $X$  тогда принимает вид

$$X = (X \setminus XS) \cup \coprod_{\gamma \in \Gamma}^0 y_\gamma S.$$

С помощью этих разложений могут быть получены ответы на многие вопросы о полигонах над вполне простой или вполне 0-простой полугруппой. В частности, получены условия инъективности или проективности полигона, построены инъективные оболочки и проективные накрытия полигонов.

### Выводы

В статье изложены элементы структурной теории полигонов, а также детально разобрано строение полигонов над группами и над вполне

(0-) простыми полугруппами. Получены условия инъективности или проективности полигона, построены инъективные оболочки и проективные накрытия полигонов.

Приведен обзор новейших результатов по теории полигонов. Показано, что результаты, касающиеся унарных алгебр, автоматически становятся результатами по теории полигонов и наоборот, результаты унарных алгебр справедливы для теории полигонов. Т. о., каждый из этих результатов вносит вклад в алгебраическую теорию автоматов.

### Литература

1. Kilp M., Knauer U., Mikhalev A. V. Monoids, acts and categories: N.Y. – Berlin, W. de Gruyter, 2000. – 529 pp.
2. Кудрявцев В. Б., Подколзин А. С., Ушчумлич Ш. Введение в теорию абстрактных автоматов: М., МГУ, 1985. – 174 с.
3. Клиффорд А., Престон Г. Алгебраическая теория полугрупп, тт. 1, 2. Перевод с английского: М., Мир, 1972; т. 1 – 286 с., т. 2 – 423 с.
4. Кожухов И. Б., Михалёв А. В. Кожухов И. Б., Михалёв А. В. Некоторые аспекты теории полигонов. // Фундам. и прикл. матем., т. 22, вып. 5, 2018. – с. 21-46.
5. Карташов В. К. О некоторых результатах и нерешенных задачах теории унарных алгебр // Чебышевский сб., т. 12, вып. 2, 2011. – с. 18–26.
6. Плоткин Б. И., Гринглаз Л. Я., Гварамя А. А. Элементы алгебраической теории автоматов: М., Высшая школа, 1994. – 192 с.
7. Апраксина Т. В., Максимовский М. Ю. Полигоны и частичные полигоны над полурешетками. // Известия Саратовского ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика, т. 12, вып. 1. – 2012. – с. 3–7.
8. Кожухов И. Б., Максимовский М. Ю. Об автоматах над полурешётками. // Системный анализ и информационно-управляющие системы. Сб. научн. трудов (под ред. проф. Бархоткина В. А.). М., МИЭТ, 2006. – с. 19-34.
9. Максимовский М. Ю. О биполигонах и мультиполигонах над полугруппами. // Матем. заметки, т. 87, вып. 6, 2010. – с. 855–866.
10. Карташов В. К. Независимые системы порождающих и свойство Хопфа для унарных алгебр. // Дискретн. матем., т. 20, № 4, 2008. – с. 79–84.
11. Avdeyev A. Yu., Kozhukhov I. B. Acts over Acts over completely 0-simple semigroups. // Acta Cybernetica, v. 14, iss. 4, 2000. – pp. 523-531.

**Кожухов И. Б., Михалёв А. В. Полигоны над полугруппами, унарные алгебры и автоматы.** Рассматриваются полигоны над полугруппами, унарные алгебры и абстрактные автоматы Мура с единой точки зрения. Изложены элементы структурной теории полигонов, детально разобрано строение полигонов над группами и над вполне (0-) простыми полугруппами. Получены условия инъективности или проективности полигона, построены инъективные оболочки и проективные накрытия полигонов. Показано, что результаты, касающиеся унарных алгебр, автоматически становятся результатами по теории полигонов и наоборот. Таким образом, каждый из этих результатов вносит вклад в алгебраическую теорию автоматов. Приведен обзор результатов по теории полигонов за последнее время.

**Ключевые слова:** Полигон над полугруппой, унарная алгебра, абстрактный автомат.

**Kozhukhov I., Mikhalev A. Acts over semigroups, unary algebras and automata.** The acts over semigroups, unary algebras and abstract automata are considered from a single point of view. Elements of the structural theory of acts are presented, the structure of acts over groups and over completely (0-) simple semigroups is analyzed in detail. The conditions of injectivity or projectivity of acts are obtained, injective shells and projective covers of acts are constructed. It is shown that the results concerning unary algebras are automatically results in the theory of acts and Vice versa. Thus, each of these results contributes to algebraic automata theory. A review of recent results on polygon theory is given.

**Keywords:** Act over semigroup, unary algebra, abstract automaton.

Статья поступила в редакцию 02.05.2019  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

**Требования к статьям,  
направляемым в редакцию научного журнала  
«Информатика и кибернетика»**

Редколлегией принимаются к рассмотрению статьи, в которых рассматриваются важные вопросы в области информатики и кибернетики. Научный журнал издаётся с 2015 года, периодичность издания – 4 раза в год.

В журнале предусмотрены следующие рубрики:

- информатика и вычислительная техника;
- компьютерные и информационные науки;
- инженерное образование.

В соответствии с номенклатурой специальностей научных работников МОН ДНР первые две рубрики соответствуют следующим укрупненным группам специальностей научных работников:

05.01 – «Инженерная геометрия и компьютерная графика»,

05.13 – «Информатика, вычислительная техника и управление».

С 01.02.2019 Научный журнал включён в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (приказ МОН ДНР № 135) по группам специальностей 05.01.00 и 05.13.00.

Рубрика «Инженерное образование» предназначена опубликования сотрудниками научно-методических статей.

Журнал также включён в базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 425-07/2016 от 14.07.2016).

Статьи, представляемые в данный сборник, должны отвечать следующим требованиям. **Содержание статьи** должно быть посвящено актуальным научным проблемам и включать следующие необходимые элементы:

- постановку проблемы в общем виде, её связь с важными научными и практическими задачами;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых решается данная задача и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья;
- формулировка цели статьи и постановка задач, решаемых в ней;
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы и перспективы последующих исследований в данном направлении.

Каждый элемент должен быть выделен соответствующим названием раздела, например, «введение», «постановка задачи», «цель и задачи работы», «цель статьи», «цель исследования», «цель разработки», «анализ ... », «сравнительная оценка ... », «разработка ... », «проектирование ... », «программная реализация», «тестирование ... », «полученные результаты», «выводы», «литература». Разделы «введение», «выводы», «литература» являются **обязательными**. Включать в названия разделов нумерацию не разрешается.

В основном тексте статьи формулируются и обосновываются полученные авторами утверждения и результаты. Выводы должны полностью соответствовать содержанию основного текста. Языки публикаций: русский, английский.

**Объём статьи, формат страницы**

Для оформления статьи следует использовать листы формата А4 (210x297 мм) с полями по 2,5 см со всех сторон. Нумерацию страниц выполнять не нужно.

Рекомендуемый объём статьи – 6-12 страниц. Рукописи меньшего объёма могут быть рекомендованы к публикации в качестве коротких сообщений.

Последняя страница текста статьи должна быть заполнена не менее чем на две трети, но содержать не менее трёх пустых строк в конце.

### ***Форматирование текста***

Подготовка статьи осуществляется в текстовом редакторе Microsoft Office Word.

Весь текст статьи оформляется шрифтом Times New Roman 10 пт с одинарным междустрочным интервалом, если ниже в требованиях не сказано иного. Абзацный интервал «перед» – 0 пт, «после» – 0 пт.

На первой строке с выравниванием по левому краю располагается УДК.

Заголовок (название) статьи оформляется шрифтом Times New Roman 14 пт, полужирное начертание, с выравниванием по центру (без абзацных отступов). Заголовок статьи следует печатать с прописной буквы без точки в конце, переносы слов не допускаются. Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт.

После названия статьи следует информация об авторах, которая выравнивается по центру (без абзацных отступов). На одной строке указываются инициалы и фамилии всех авторов через запятую. Между двумя инициалами ставится пробел. С новой строки указывается название вуза (организации) и город (для каждого автора, если не совпадают). На следующей строке указываются адреса электронной почты (один адрес либо каждого автора – по желанию). Адрес электронной почты оформляется в виде гиперссылки.

К тексту аннотации применяется курсивное начертание, с выравниванием по ширине, отступы слева и справа по 1 см. Заголовок «Аннотация» выделяется полужирным начертанием. Объем аннотации – 450-550 символов (без пробелов). Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт.

Основной текст статьи разбивается на две колонки шириной по 7,5 см (промежуток между столбцами – 0,99 см), выравнивается по ширине. Абзацный отступ первой строки – 1 см. Автоматический перенос слов не применяется.

Заголовки разделов выполняются шрифтом Arial 10 пт, полужирное курсивное начертание. Абзацный отступ отсутствует, интервал перед абзацем – 12 пт, после абзаца – 6 пт. Для заголовка «Введение» установить интервал «перед» – 0 пт, «после» – 6 пт.

### ***Таблицы в тексте статьи***

Название следует помещать над таблицей с абзацного отступа (1 см) в формате: слово «Таблица», пробел, номер таблицы, пробел, тире, пробел, название таблицы. Название таблицы записывают с прописной буквы без точки в конце строки и выравнивают по ширине. В ячейках таблицы устанавливается выравнивание текста по центру по вертикали. По горизонтали текст выравнивается по центру либо по левому краю. Границы ячеек таблицы должны быть только чёрного цвета, толщина линии – 1 пт. На все таблицы должны быть приведены ссылки в тексте статьи, при ссылке следует писать слово «табл.» с указанием её номера, например, «... данные приведены в табл. 5». Таблицы нумеруются в пределах статьи. Таблица располагается сразу после ссылки на неё, если это возможно (например, после окончания абзаца). Если же таблица не помещается на текущей странице, то она должна быть расположена в начале следующей страницы (или колонки). При необходимости допускается включение в статью таблицы, ширина которой превышает ширину колонки. В этом случае таблица и её название размещаются по центру страницы. Таблица не должна выступать за границы полей страницы. Таблица и её название отделяются от основного текста статьи одной пустой строкой до и после.

### ***Рисунки в статье***

Ссылки на иллюстрации по тексту статьи обязательны и оформляются в виде «... на рис. 2» и т. п. Рисунок и его подпись выравниваются по центру колонки (без абзацных отступов), положение рисунка – «в тексте». Размещается рисунок после его первого упоминания в тексте, если это возможно (например, после окончания абзаца). Если же иллюстрация не помещается на текущей странице, то она должна быть расположена в начале следующей страницы (или колонки). При необходимости допускается включение в статью рисунка, ширина которого превышает ширину колонки. В этом случае рисунок и его подпись выравниваются по центру страницы. Иллюстрация не должна выступать за границы полей страницы. Подпись рисунка оформляется в формате: слово «Рисунок», пробел, номер иллюстрации, пробел, тире, пробел, название рисунка. Название рисунка записывают с прописной буквы без точки в конце строки. Для подписи иллюстрации применяют курсивное

начертание. Иллюстрация и её подпись отделяются от основного текста статьи одной пустой строкой до и после. Не допускается выполнять рисунки с помощью встроенного графического редактора Microsoft Office Word. Если на иллюстрации имеется текст, размер шрифта должен быть не менее чем аналогичный текст, набранный шрифтом Times New Roman 10-го размера. Иллюстрация не должна содержать много незаполненного пространства.

### ***Формулы***

Формулы и уравнения рекомендуется набирать с использованием MathType (предпочтительно) или MS Equation. Формулы и математические символы не должны существенно отличаться по размеру от основного текста. Обязательной является нумерация формул, на которые имеется ссылка в тексте статьи. Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например, «... согласно формуле (2)». Формулы размещаются по центру колонки, а их номера – по правому краю. Как для строки с формулой, так и для первой строки пояснений (при наличии), абзацный отступ убирается. Первая строка пояснения начинается со слова «где», после которого следует поставить табуляцию на 1 см, затем само пояснение в формате: символ, подлежащий объяснению, пробел, тире, пробел, поясняющий текст, запятая, обозначение единицы измерения физической величины. Пояснения перечисляются через точку с запятой, выравниваются по ширине. Вторая и последующие строки пояснений начинаются с абзацного отступа (1 см). Весь блок текста, связанный с формулой (только формула, несколько формул подряд или формула с пояснениями), отделяется от основного текста одной пустой строкой до и после. Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке умножения применяют знак « $\times$ ». Формулы и математические уравнений могут быть записаны в тексте документа, если их высота не превышает высоту строки. При этом следует учитывать, что знаки математических операций отделяются от чисел или символов пробелами с обеих сторон. Например, «Если учесть, что  $y < 0$  и  $2x + y = 1$ , то из формулы (3) можно выразить  $x...$ ». К символам, которые приведены в формуле, при дальнейшем их употреблении (в том числе в пояснениях к формуле) должно применяться курсивное начертание. При этом к любым числам (верхние и нижние индексы, содержащие цифры и т.п.), а также к математическим знакам курсивное начертание не применяется. Не допускается вставлять формулы, выполненные в виде рисунков.

### ***Перечисления: оформление списков***

Основной текст статьи может содержать перечисления, оформленные в виде маркированного списка. В качестве маркера элемента списка разрешается использовать только короткое тире «–». Каждый элемент перечисления записывается с новой строки с абзацного отступа, равного 1 см. После символа короткого тире текст располагается с отступом в 1,5 см от левой границы строки, выравнивается по ширине, при переносе на новые строки располагается без отступов. Нумерованные и многоуровневые списки включать в статью не разрешается.

### ***Литература***

В тексте статьи обязательны ссылки на все литературные источники, номер источника указывается в квадратных скобках. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Рекомендуемое количество источников, на которые ссылается автор, не менее 10. Перечень источников приводится в порядке их упоминания в статье. Библиографическое описание каждого литературного источника оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018. Перечень литературных источников оформляется в виде нумерованного списка. В качестве маркеров элементов списка используют порядковые арабские цифры с точкой. Каждый источник представляет собой отдельный элемент перечисления, записывается с новой строки с абзацного отступа, равного 1 см. После порядкового номера с точкой текст располагается с отступом в 1,5 см от левой границы строки, выравнивается по ширине, при переносе на новые строки располагается без отступов.

В конце статьи обязательно приводятся аннотации на русском и английском языках, каждая заканчивается перечнем 5-6 ключевых слов.

К тексту аннотации применяется курсивное начертание, с выравниванием по ширине, отступы слева и справа по 1 см. Слово «Аннотация» опускается. Текст аннотации начинается с ФИО авторов и названия статьи, выделяемых полужирным начертанием. Аннотация на русском языке совпадает с аннотацией, приведенной в начале статьи. В тексте аннотации на английском языке после фамилии автора указывается только первая буква имени с точкой. Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт. Ключевые слова оформляются с новой строки аналогично тексту аннотации. Заголовок «Ключевые слова:» (англ. «Keywords:») выделяется полужирным начертанием. Ключевые слова перечисляются через запятую.

#### ***Порядок представления статьи и сопроводительные документы***

В редакцию необходимо представить:

- файл с текстом статьи;
- файл, содержащий фамилию, имя и отчество авторов полностью; ученую степень, ученое звание; место работы с полным указанием должности, подразделения и наименования организации, города (страны); номера телефонов и e-mail для связи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи, подписанное руководителем и заверенное печатью организации, в которой работает автор статьи;
- выписка из заседания кафедры или письмо организации с просьбой об опубликовании и указанием, что изложенные в статье результаты ранее не публиковались.

Статьи и сопроводительные документы следует высылать на электронный адрес [infcyb.donntu@yandex.ru](mailto:infcyb.donntu@yandex.ru).

#### ***К сведению авторов***

Если статья оформлена с нарушением указанных выше требований и правил, редакция после предварительного рассмотрения может отклонить статью.

На рецензирование статьи направляются членам редакционной коллегии журнала. Все статьи публикуются при наличии положительной рецензии.

В статью могут быть внесены изменения редакционного характера без согласования с автором. Ответственность за содержание статьи и качество перевода аннотаций несут авторы.

Публикация статей в научном журнале «Информатика и кибернетика» осуществляется на некоммерческой основе.

Все номера Научного журнала размещаются на сайте <http://infcyb.donntu.org/>.

CONTENT

Informatics and computer engineering

<b>Starting device of automated control switching to a backup power source of the motor load</b> <i>Syvokobylenko V., Derkachev S.</i> .....	5
<b>The tasks of compiling the optimal schedule of part-processing programs for CNC machines and methods for solving them</b> <i>Lazebnaya L., Belkov D.</i> .....	13
<b>Method of measurement of electromagnetic elements' and fast-acting damper's parameters when commutating the coiling</b> <i>Zhorayev T., Manilova G.</i> .....	20
<b>Construction of regression models of modes of water distribution networks using methods of regularization and principal component analysis</b> <i>Bespalova S. V., Romanchuk S. M., Yermolenko T. V., Bondarenko V. I.</i> .....	28
<b>Financial Time Series Forecasting with Neural Networks using Python's Keras Library</b> <i>Vasyaeva T., Martynenko T., Subbota N.</i> .....	41
<b>Ways to improve the efficiency of devices of sensory component of information and computer infrastructure</b> <i>Koibash A.</i> .....	51
<b>Modern architectures and types of autonomous ground mobile objects</b> <i>Zavadskaya T.</i> .....	58
<b>Statistical analysis of modern methods of recognition of faces and emotions</b> <i>Vanzha T.</i> .....	64

Computer and information science

<b>The architectural structures three-dimensional modeling from photograph algorithm by the perspective scales method</b> <i>Rudenko M.</i> .....	72
<b>Acts over semigroups, unary algebras and automata</b> <i>Kozhukhov I., Mikhalev A.</i> .....	79
<u>Requirements to articles which are sent to the editors office of the scientific journal "Informatics and Cybernetics"</u> .....	84

Электронное периодическое издание

Научный журнал

ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА

(на русском, английском языках)

№ 2 (16) - 2019

Ответственный за выпуск Р. В. Мальчева

Технический редактор Р. В. Мальчева

Компьютерная верстка А. И. Воронова

Подписано к выпуску 20.06.2019. Усл. печ. лист. 10,3. Уч.-изд. лист. 5,9.  
Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУ ВПО «ДонНТУ»,  
4-й учебный корпус, к. 36., ул. Кобозева, 17.  
Тел.: +38 (062) 301-07-35, +38 (071) 334-89-11  
E-mail: infcyb.donntu@yandex.ru, URL: <http://infcyb.donntu.org>